

Природа эффекта Барра и аномальных эксцентриситетов экзопланет

© Авторы, 2016

© ЗАО «Издательство «Радиотехника», 2016

С.А. Семиков – магистр радиофизики, ассистент, инженер, кафедра «Общая физика», Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского
E-mail: sergey-semikov@yandex.ru; semisea@mail.ru

Рассмотрены возможные объяснения эффекта Барра – нелинейного преобразования графиков лучевых скоростей двойных звёзд, создающего иллюзию избыточного эксцентриситета звёздных орбит и преимущественной ориентации их длинных осей в направлении Земли (преобладания долгот периастров возле значения $\omega = 90^\circ$). Предложены критерии, позволяющие установить природу эффекта Барра. Показано, что объяснение эффекта на основе баллистической теории Ритца, впервые предсказавшей подобное искажение как результат влияния скорости звёзд на скорость испущенного ими света, соответствует этим критериям. Исследованы возможности эффекта Барра и теории Ритца в плане объяснения аномально высоких эксцентриситетов орбит экзопланет и ряда других аномалий, обнаруженных у экзопланет в последние годы.

Ключевые слова: двойные звёзды, эффект Барра, кривые лучевых скоростей, баллистическая теория, скорость света, эффект Ритца, экзопланеты, пульсары.

Potential explanations of the Barr effect have been studied as nonlinear transformation of radial velocity curves of binary stars which creates illusion of excessive eccentricity of stellar orbits and prevalent orientation of their major axes in the direction of the Earth (prevalence of periastron longitudes around the value $\omega = 90^\circ$). Criteria which allow to define the Barr effect nature have been suggested. It has been shown that explanation of the Barr effect on the basis of Ritz theory which was the first to predict such a distortion as the result of influence of stars velocities on the velocity of light emitted by them conforms to these criteria. Possibilities of the Barr effect and Ritz theory for explanation of anomalously high eccentricities of exoplanet orbits and a range of other anomalies discovered in exoplanet systems in the recent years are observed.

Keywords: binary stars, Barr effect, radial velocities curves, ballistic theory, Ritz effect, speed of light, exoplanets, pulsars.

Эффект Барра был открыт в 1908 г. канадским астрономом Дж. Миллером Барром [1] при анализе статистики орбитальных элементов спектрально-двойных звёзд. История этого открытия и его обсуждения подробно описаны в работе [2]. Статистика, изученная Барром, показала, что у большинства спектрально-двойных звёзд орбиты вытянуты преимущественно в сторону Земли, т.е. периастры звёзд чаще располагаются за картинной плоскостью: долготы периастров ω преобладают в диапазоне $0^\circ \leq \omega < 180^\circ$ (рис. 1). Этот эффект был позднее многократно подтверждён физиками [3] и астрономами [2, 4], в том числе отечественными [5–8], предложившими для эффекта Барра термин «В-эффект» [7].

Цель работы – объяснить природу эффекта Барра и аномальных эксцентриситетов экзопланет.

В силу принципа Коперника, трудно допустить, что Земля и Солнце выделены среди других планет и звёзд (противное означало бы возврат к геоцентризму). Поэтому, как отмечал сам Барр, эффект вызван искажением графиков лучевых скоростей звёзд $V_r(t)$, по которым и определялась долгота периастра ω , эксцентриситет e и другие орбитальные элементы. Это нелинейное

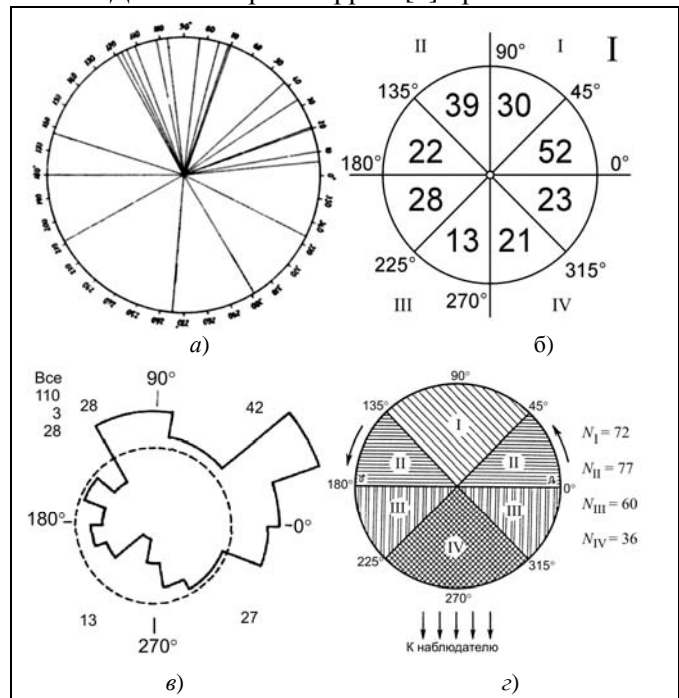


Рис. 1. Асимметричные угловые распределения периастров звёзд по долготам ω (числа указывают количество звёзд N_i с периастрами в данном секторе) как иллюстрация эффекта Барра, по данным разных авторов: а – Барр [1]; б – Фокс [3]; в – Бэттен [4]; г – Бражникова [6]

искажение проявляется таким образом, что кривая лучевых скоростей, соответствующая круговой орбите, преобразуется в кривую лучевых скоростей, которой соответствует эллиптическая орбита, вытянутая в сторону Земли. Иначе говоря, у двойных звёзд появляется избыточный кажущийся эксцентриситет e' , а долготы их периастров группируются возле значения $\omega = 90^\circ$ (рис. 1). У звёздных орбит, ориентированных случайным образом и обладающих истинными эксцентриситетами e , при добавлении к ним кажущихся эксцентриситетов e' создаётся иллюзия неравномерного распределения орбит $N(\omega)$ по долготам периастров ω . В итоге звёзды с $0^\circ \leq \omega < 180^\circ$ преобладают над звёздами с $180^\circ \leq \omega < 360^\circ$. Аналогичная аномалия обнаружена в последние годы у экзопланет, причём у них тоже наблюдается избыточный эксцентриситет, который не удаётся объяснить в рамках существующих теорий [9]. Поскольку эффект Барра пока не получил окончательного и однозначного объяснения, рассмотрим его известные интерпретации и исследуем, в каких случаях эффект может проявляться.

1. Гипотезы о природе эффекта Барра

Было предложено несколько гипотез для объяснения эффекта Барра, в том числе следующие (в скобках указаны авторы гипотез):

- 1) приливное искажение формы звёзд, вызывающее в ходе их синхронного вращения искажение графика лучевых скоростей (Барр [1]);
- 2) истинная вытянутость орбит звёзд в направлении Земли за счёт преимущественной ориентации орбит звёзд в Галактике (Барр [1]);
- 3) наблюдательная селекция, обусловленная упрощённым выявлением эксцентричных орбит, вытянутых к Земле (Бражникова [7]);
- 4) искажение кривой лучевых скоростей потоками газа и атмосферами, вращающимися вокруг двойных звёзд (Струве [10]);
- 5) разница скоростей света, испущенного звездой в разные моменты за счёт движения по орбите (Гутник [11], Фрейндлих [12]).

Рассмотрим перечисленные гипотезы подробнее.

1°. Первая гипотеза, выдвинутая самим Барром в 1908 г. [1], объясняет эффект Барра формированием у звёзд, образующих двойную систему, приливных горбов, которые синхронно вращаются с периодом, равным орбитальному. Если высота ΔR прилива велика и сопоставима с радиусом R звезды (т.е. форма звезды заметно искажена), то участки звезды в точках прилива и отлива, расположенные на разном удалении от центра звезды, обладают, по теореме фон Цайпеля, разной яркостью и дают спектральные линии разной интенсивности. Таким образом, определяющим для доплеровского смещения и найденных по нему кривых лучевых скоростей будет не скорость звезды, а скорость наиболее ярких участков, которая, за счёт вращения звезды, отлична от орбитальной и меняется более сложным образом в ходе изменения видимой площади ярких участков. Согласно Барру, это и вносит искажения в кривую лучевых скоростей. Однако этот механизм не был им рассмотрен подробно. Кроме того, асимметрия носила бы более сложный характер и вела бы к искажениям противоположным, нежели наблюдаемые в эффекте Барра: преобладали бы долготы периастра $\omega = 270^\circ$, а не $\omega = 90^\circ$ [13]. Наконец, как показали наблюдения, эффект Барра выражается не только в искажении кривых лучевых скоростей, но и в искажении визуальных движений звёзд, скажем, в затменных системах, у большинства которых орбиты, рассчитанные по кривой блеска, тоже оказываются вытянуты преимущественно в сторону Земли. Также эффект наблюдался у широких пар звёзд, компоненты которых достаточно далеки друг от друга [14, 15]. Поскольку в этих случаях приливные эффекты и яркие участки на поверхности звезды не могут вести к искажениям, очевидно, эффект имеет иную природу, и первая гипотеза отпадает.

2°. Вторая гипотеза, выдвинутая Барром в 1908 г. [1], предполагает, что большие оси орбит двойных звёзд преимущественно ориентированы в направлении галактического центра. В таком случае при наблюдении с Земли у орбит обнаружилась бы преимущественная ориентация. Сам Барр, пока положение Солнца в Галактике не было точно известно, предполагал, что Солнце расположено возле центра Галактики, что объясняло бы такую ориентацию. Впоследствии выяснилось, что Солнечная система расположена в спиральных рукавах на периферии Галактики. Но и в этом случае у ближайшего окружения Земли обнаружится рассмотренный эффект преимущественной ориентации орбит. В среднем боль-

шие оси орбит ориентированы под случайными углами к линии визирования. Однако у звёзд, лежащих между Солнцем и центром Галактики, т.е. наиболее многочисленных и легко открываемых, орбиты окажутся вытянуты примерно в направлении Земли. Возможные механизмы ориентации орбит в Галактике были подробно рассмотрены Э.Ф. Бражниковой и др. [8]. Данное объяснение эффекта Барра сомнительно по ряду причин.

Во-первых, как показал ещё в начале XX в. А.А. Белопольский [16], орбиты двойных звёзд, особенно в тесных системах, испытывают вековое вращение под влиянием возмущений, что исключает возможность постоянной ориентации их больших полуосей к центру Галактики или в каком-либо ином избранном направлении.

Во-вторых, у орбит звёзд-компонентов, входящих в двойную систему, долготы периастров орбит отличаются на 180° , т.е. не могут создать асимметричного распределения по ω . Поэтому приходится допускать существование дополнительных механизмов, вызывающих преимущественную ориентацию орбит более ярких компонентов, которые проще открыть [8].

В-третьих, ряд фактов свидетельствует, что реальные орбиты звёзд ориентированы случайным образом, и эффект Барра вызван именно искажением видимого движения звёзд и графиков $V_r(t)$. Такие факты подробно рассмотрены в монографии А. Бэттена [4], где на ряде примеров показано, что имеет место именно искажение измеренных орбитальных элементов неизвестным эффектом, а не действительная вытянутость орбит в заданном направлении. Подробнее эти факты будут рассмотрены далее.

3°. Третья гипотеза – гипотеза наблюдательной селекции – объясняет эффект Барра тем, что по неким причинам проще открыть двойные системы, в которых орбиты ярких компонентов вытянуты в направлении Земли, а не в обратном направлении, тогда как в целом у звёзд Галактики орбиты ориентированы случайным образом. Эта гипотеза была подробно разработана Бражниковой [5, 7], изучившей возможные механизмы наблюдательной селекции. Не останавливаясь подробно на этих механизмах, ещё нуждающихся в обосновании, отметим, что данная гипотеза сталкивается с тем же возражением, что и предыдущая, т.е. открыты двойные звёзды, для которых надёжно установлены круговые орбиты компонентов, тогда как кривая лучевой скорости соответствует эксцентрической орбите, вытянутой к Земле или в близком направлении. Такова затменная звезда U Цефея, у которой кривая блеска свидетельствует о круговой орбите, а кривая лучевых скоростей – об эллиптической орбите [4]. Другой пример – двойная звезда RX Кассиопеи, у которой кривая лучевых скоростей одного компонента соответствует круговой орбите, а второго – эллиптической. Поскольку орбиты должны иметь одинаковый эксцентриситет, очевидно, график лучевых скоростей одного из компонентов искажён. Эти примеры доказывают то, что причина эффекта Барра состоит не в истинной вытянутости орбит звёзд, выявленных благодаря эффекту наблюдательной селекции, а в эффекте искажения графиков лучевых скоростей неким неизвестным эффектом.

4°. Четвёртая гипотеза, предложенная Струве и Хуангом [10], объясняет эффект Барра как раз искажением кривых лучевых скоростей спектрально-двойных звёзд. По гипотезе Струве, это искажение вызывают потоки газа околозвёздных атмосфер, которые в ходе вращения дают линии поглощения, смещённые по эффекту Доплера от своих нормальных положений, соответствующих орбитальному движению звёзд. Это, якобы, и ведёт к искажению графиков лучевых скоростей. Отметим, что и в этом случае не вполне ясно, почему искажения носят описанный характер и вызывают концентрацию расчётных долгот периастров возле избранных значений. Как показали авторы работ [14, 15], эта гипотеза тоже не выдерживает критики, поскольку общие атмосферы свойственны тесным парам звёзд, тогда как эффект Барра обнаружен и у широких пар звёзд, разнесённых на дистанции много больше размеров звёзд, не имеющих общих атмосфер. В таких случаях искажения, вносимые атмосферами, маловероятны. Ряд несоответствий гипотезы Струве наблюдениям перечислен в монографии Бэттена [4]. Наконец, следует отметить, что эффект Барра наблюдается не только в форме искажения кривых лучевых скоростей, но и в искажении видимого движения звёзд и кривой блеска в затменных системах [15]. Всё это приводит к мысли, что искажения, во-первых, реально имеют место, а во-вторых, вызваны каким-то более общим оптическим эффектом (затрагивающим как спектр, так и видимое движение звёзд), природу которого предстоит выяснить.

5°. Пятая гипотеза, предложенная Гутником [11] и развитая Фрейндлихом [12] в 1913 г. (вскоре после открытия эффекта Барра), основана как раз на идее такого оптического эффекта. Согласно их предположению, данный эффект обусловлен тем, что звезда из разных положений на орбите посылает свет к Земле с разной скоростью, вызывая искажение видимого движения звезды и графика лучевых

скоростей. Эта гипотеза не только стала одним из первых объяснений эффекта Барра (будучи выдвинута спустя пять лет после его открытия), но и позволила наиболее просто истолковать все особенности эффекта Барра, противоречащие другим гипотезам. Природа различия скоростей света, испущенного звездой из разных положений на орбите, может быть разной. Например, в момент приближения звезды её спектральные линии смещены в коротковолновую область, и за счёт дисперсии разреженного межзвёздного газа свет соответствующей частоты движется чуть медленней, чем свет, испущенный звездой при удалении, когда её линии смещены в длинноволновую область. Впрочем, при обычной плотности межзвёздного газа дисперсия скоростей обычно слишком мала, чтобы создать заметные искажения. Кроме того, при нормальной дисперсии (отставании синих лучей от красных) эффект имел бы обратный знак, чем эффект Барра. Долготы периастров, как будет показано далее в п. 5, концентрировались бы возле значения $\omega = 270^\circ$, а не $\omega = 90^\circ$. Гутник и Фрейндлих предполагали, что скорости лучей света различаются даже в вакууме, и что причина этого неравенства скоростей состоит во влиянии скорости звезды на скорость испущенного ей света, согласно баллистической теории Ритца [17]. Эта теория была выдвинута в 1908 г. (в один год с открытием эффекта Барра [1]) и предсказала отмеченные искажения до широкой огласки об их обнаружении [18, 19]. Подробный анализ этой гипотезы проведём в п. 2.

2. Интерпретация эффекта Барра в баллистической теории

Согласно баллистической теории Ритца [17], свет испускается относительно источника со стандартной скоростью света c , а в системе, относительно которой источник движется со скоростью V , свет дополнительно приобретает скорость источника (подобно тому, как в баллистике скорость движущегося орудия добавляется к скорости выпущенного им снаряда, отсюда название теории). В итоге скорость света равна векторной сумме $c' = c + V$. Уже в 1908 г. в работе [17] Ритц обратил внимание на некоторые возможные астрономические проявления такой переменной скорости света и на возможные критерии проверки этого эффекта. В 1909–1910 гг. Д.Ф. Комсток [18] впервые проанализировал возможные искажения в движении двойных звёзд, которые возникли бы в случае влияния орбитальной скорости звезды на скорость испущенного ею света. Так, если для удобства рассмотрим звезду-спутник, летящую вокруг главной звезды со скоростью V по круговой орбите (пунктирная линия на рис. 2), лежащей в одной плоскости с лучом зрения (наклонение орбиты $i = 90^\circ$), то в момент приближения звезда посылала бы к Земле свет со скоростью $c + V$, и он достигал бы Земли за меньшее время, чем свет, испущенный со скоростью $c - V$ при удалении звезды. В итоге видимое движение звезды (сплошная линия на рис. 2) в двойной системе исказилось бы так, словно звезда летит быстрее, когда находится дальше от Земли (за картинной плоскостью), и медленнее, когда находится ближе (перед картинной плоскостью) [18], т.е. равномерное движение звезды показалось бы неравномерным, идущим по эллиптической орбите, вытянутой к Земле. Фактически Комсток предсказал на основе баллистической теории эффект Барра, ещё не будучи знаком с работой Барра [1], вышедшей в 1908 г. – всего за год до представления статьи Комстока на съезде Физического Общества в Принстоне, в 1909 г. [18].



Рис. 2. Схема искажения видимого движения звезды по орбите с эксцентриситетом $e = 0$ и наклонением $i = 90^\circ$ (у звезды, летящей по круговой орбите (пунктирная линия), влияние орбитальной скорости V на скорость света c ведёт к перекосу графика лучевых скоростей (сплошная линия), т.е. к появлению мнимого эксцентриситета e' и В-эффекта)

Несмотря на это, в 1913 г. голландский астроном Де Ситтер, тоже не знакомый с работой Барра [1], отметил, что многие звёзды, включая спектрально-двойные, имеют по наблюдениям почти круговые орбиты без отмеченных искажений, что, якобы, противоречило баллистической теории [20]. Если бы баллистическая теория была справедлива, такие искажения вели бы к тому, что видимое движение двойных звёзд заметно бы отклонялось от законов Кеплера. Именно этот аргумент обычно приводят в книгах по СТО и учебниках в качестве главного опровержения баллистической теории [21, 22]. Но в том же 1913 г. астрономы П. Гутник [11] и Э. Фрейндлих [12] отметили спорность данного аргумента. Изучив известную на тот момент статистику двойных звёзд и сославшись на

работу Барра [1], они показали, что у большинства звёзд орбиты всё же вытянуты и в основном как раз в сторону Земли (долготы периастров ω концентрируются возле значения $\omega = 90^\circ$, рис. 1), в согласии с предсказанием баллистической теории [23].

Как показал Гутник [11], если видимое искажение невелико, то движение звезды не будет заметно отклоняться от законов Кеплера. Покажется лишь, что звезда движется не по круговой, а по вытянутой эллиптической орбите, т.е. у неё появится кажущийся избыточный эксцентриситет e' . Кроме того, как отметил Фрейндлих [12], видимые искажения невелики, если на пути света к Земле зависимость его скорости от скорости источника по каким-то причинам ослаблена, и оцениваемая по искажениям скорость света имеет вид

$$c' = c + kV, \quad (1)$$

где коэффициент $k \ll 1$, составляя по оценкам Де Ситтера $k < 0,002$ [20].

Причину снижения влияния скорости источника на скорость света указал в 1965 г. Дж. Фокс [3]. Поскольку тесные двойные системы, как показывает спектральный анализ, окружены атмосферами межзвёздного газа, который в ничтожной концентрации присутствует также на всём пути света к Земле, то по теореме погашения (*экстинкции*) Эвальда–Озеена исходный свет звезды постепенно гасится облаками газа и переизлучается ими уже со скоростью c относительно облаков. Это ведёт к постепенному выравниванию скоростей света, испущенного звездой в разные моменты, и основную часть пути световые лучи движутся с одинаковой скоростью. В таком случае выражение (1) имеет смысл средней скорости света на всём пути r от звезды к Земле, а коэффициент k приобретёт смысл относительной доли $k = l/r$ пути l , на котором свет звезды, ещё не будучи переизлучён, движется со скоростью $c + V$ [24]. На этом эффективном пути l и набирается разность хода лучей, искажающая видимое движение звёзд. Оставшуюся часть пути $(1 - k)r$ переизлучённый свет движется со скоростью c . По известным оценкам концентрации атомов ($N \sim 1 \text{ см}^{-3}$) и показателя преломления n межзвёздного газа в Галактике Фокс оценил эту характерную длину $l = \lambda / [2\pi(n - 1)]$ в один световой год. На такой длине l переизлучение снижает в 2,718 раз амплитуду исходного излучения с длиной волны λ [3]. Поскольку расстояния r до исследуемых двойных звёзд достигают сотен и тысяч световых лет, отношение $k = l/r$ должно составлять как раз порядка сотых или тысячных.

В рентгеновском и гамма-диапазоне длина l и коэффициент k могут быть ещё меньше, поскольку длина волны λ в тысячи раз короче, чем у видимого света, а показатель преломления n не был измерен с достаточной точностью вплоть до недавнего времени [25]. Поэтому n обычно считали точно равным единице, а длину l – бесконечной, поскольку частоты высокоэнергичных квантов лежат вдали от резонансных частот колебаний внешних электронов в атомах, и те, ввиду слабого рассеяния света на них, практически не меняют скорость света [3]. При этом забывали об электронах внутренних оболочек атомов и об атомных ядрах, частоты колебаний которых лежат в рентгеновском и гамма-диапазонах и которые эффективно взаимодействуют с излучением, заметно сокращая l . Так, в рентгеновских спектрах, снятых у рентгеновского барстера ЕХО 0748-676 орбитальным телескопом «Chandra», выявлены рентгеновские линии поглощения железа [26]. А орбитальные гамма-телескопы выявляют линии излучения и поглощения в гамма-диапазоне [27, с. 205, 208]. Как известно, поглощение, даже незначительное, свидетельствует об эффективном взаимодействии излучения с газом, об эффективном томсоновском рассеянии (нарастающим возле линий поглощения), так что $n \neq 1$. Таким образом, в рентгеновском диапазоне показатель преломления межзвёздного газа n , даже будучи близок к единице, может отличаться от неё на величину, достаточную для обеспечения малости $l = \lambda / [2\pi(n - 1)]$ и $k = l/r$, особенно на частотах в районе линий поглощения межзвёздного газа.

Действительно, согласно последним измерениям, коэффициент преломления n оптических сред для рентгеновских и гамма-лучей отличен от единицы. Если обозначить $n = 1 + \delta$, то для рентгеновских лучей $\delta = 10^{-7} - 10^{-5}$. Например, для рентгеновских лучей с энергией 30 кэВ ($\lambda \approx 4 \cdot 10^{-11} \text{ м}$) в воде было измерено значение $\delta = -2,6 \cdot 10^{-7}$ [25], а для гамма-лучей с энергией 1,2 ГэВ ($\lambda \approx 10^{-12} \text{ м}$) в силиконе $\delta = 1,5 \cdot 10^{-9}$ [28]. Соответственно, длина переизлучения $\lambda / [2\pi|\delta|]$ для рентгеновских лучей в твёрдых телах $l \sim 0,05 \text{ мм}$, а для гамма-лучей $l \sim 0,1 \text{ мм}$, что сопоставимо с длиной переизлучения оптических лучей $l \sim 0,001 \text{ мм}$. То же самое справедливо и в отношении межзвёздного газа – длина переизлучения в нём может иметь

примерно один и тот же порядок величины в оптическом, рентгеновском и гамма-диапазоне. Поэтому анализ рентгеновских переменных звёзд и гамма-источников, предпринятый К. Брэчером и показавший, что коэффициент искажений $k = l/r < 10^{-9}$ [29–31], укладывается в рамки баллистической теории. На основе формулы для показателя преломления плазмы Брэчер получил универсальную оценку $l \approx (\lambda a_0 N)^{-1}$,

где классический радиус электрона $a_0 = e^2/(mc)^2 \approx 2,82 \cdot 10^{-15}$ м, и при концентрации межзвёздного газа $N \approx 0,04 \text{ см}^{-3}$, нашёл, что для рентгеновских лучей с энергией 70 кэВ длина $l \sim 20$ кпк ≈ 65000 св. лет.

Однако, кроме переизлучения в межзвёздном газе, происходит, как отмечал Дж. Фокс [3], переизлучение в общей атмосфере тесных двойных звёзд, двойных пульсаров, в которой концентрация атомов газа на порядки выше, на что обращал внимание и К. Брэчер [29]. Действительно, для трёх рассмотренных Брэчером систем Her X-1, Cen X-3, SMC X-1 при орбитальном периоде $P \sim 1$ сут и орбитальной скорости $V \sim 100$ км/с найдём, что радиус орбиты пульсара составляет $R \sim PV \sim 10$ млн км. Это расстояние сравнимо с размером внешней атмосферы, короны звёзд, в которой (например, для Солнца [27, с. 625]) концентрация составляет $N \approx 10^8 \text{ см}^{-3}$, и которая может не принимать участия в орбитальном движении пульсара, подобно тому, как солнечная корона представляет собой потоки плазмы, не участвующие в движении планет. Соответственно, получим $l \approx (\lambda a_0 N)^{-1} \sim 2 \cdot 10^{11}$ м ~ 200 млн км, что сравнимо с R и характерным размером короны. Таким образом, у двойных рентгеновских пульсаров с очень тесными орбитами переизлучение происходит практически сразу, внутри короны главной звезды. Тогда и в рамках баллистической теории при дистанции указанных пульсаров $r \sim 10$ кпк [29] получим $k = l/r < 10^{-9}$, что совпадает с реальной величиной k , рассчитанной Брэчером.

Таким образом, ожидаемые по баллистической теории искажения согласуются с наблюдаемыми, и аргументы В. Де Ситтера [20] и К. Брэчера [29, 31] не имеют доказательной силы, как отмечали, например, Дж. Фокс [32], П. Мун и Д. Спенсер [33]. Фокс подверг сомнению и ряд других экспериментов, в которых предпринимались попытки проверить влияние скорости источника на скорость испущенного им света: например, в известном эксперименте А.М. Бонч-Бруевича [34]. Недостаток подобных наблюдений и экспериментов – в отсутствии прямых измерений скорости источника и неучёте эффекта переизлучения [3]. Однако известен ряд экспериментов и астрономических наблюдений, в которых влияние скорости источника на скорость испущенного им света подтвердилось [24, 35, 36].

Например, при радиолокации Венеры было выявлено систематическое расхождение между положениями Венеры, рассчитанными из законов небесной механики по астрономическим наблюдениям, и радиолокационными данными, достигающее порядка тысячи километров, что намного превышало возможные ошибки методов. Причём это расхождение соответствовало предсказанному баллистической теорией, исчезая при учёте переменности скорости света [35], как показал специалист по космической навигации В.П. Селезнёв [37] – соратник С.П. Королёва и разработчик первых астронавигационных приборов для космических кораблей [38], автор пионерской монографии по космической навигации [39]. К тому же выводу пришёл и американский физик Б. Уоллес при анализе результатов радиолокации Венеры советскими и американскими станциями [40, 41]. Аналогично, систематические расхождения расчётных (на основе небесной механики) и измеренных посредством радиолокации скоростей и дистанций автоматических межпланетных станций «Пионер-11» и «Пионер-12», «Улисс», «Галилео», «Кассини» [35, 42, 43] тоже могут быть результатом неучёта переменности скорости света [45]. Наконец, анализ современных данных по лазерной локации Луны, предпринятый Д. Джекзари – специалистом из NASA по астрометрии в ИК-диапазоне и поиску экзопланет, тоже показал, что постоянство скорости света в космосе противоречит наблюдениям, которые подтверждают баллистическую зависимость скорости света от скорости лазерного источника [44].

Итак, влияние орбитальной скорости звезды на скорость испущенного ей света вполне может быть причиной эффекта Барра. Равномерное движение звёзд по круговой орбите покажется тогда неравномерным, происходящим по вытянутой орбите. Причём искажения, в согласии с наблюдениями, затронут и видимое движение, и кривую лучевых скоростей.

Оценим величину этих искажений и мнимого эксцентриситета. Рассмотрим двойную звезду, расположенную на расстоянии r от Земли. Пусть луч зрения \mathbf{r} лежит в плоскости орбиты двойной звезды (рис. 2). Причём звезда-спутник движется по круговой орбите с орбитальной скоростью V и с орбиталь-

ным периодом P . В таком случае график лучевых скоростей $V_r(t)$ звезды-спутника S_2 имеет форму синусоиды:

$$V_r = -K \sin\left(\frac{2\pi t}{P}\right),$$

где $K = V$ – полуамплитуда лучевой скорости, а за начало отсчёта времени t принят момент, когда звезда проходит дальнюю от Земли точку орбиты l .

Согласно баллистическому принципу, из точки 2 (рис. 2) звезда испускает свет со скоростью $c + K$, а из точки 4 – со скоростью $c - K$, т.е. из положений 2 и соседних с ним свет звезды приходит раньше расчётного (в рамках СТО) времени, а из положений 4 запаздывает, вызывая искажение графика лучевых скоростей. Из промежуточных точек орбиты звезда в направлении Земли испускает свет со скоростью $c - V_r$, где V_r – лучевая скорость звезды (проекция скорости V на луч зрения r). В таком случае свет из этих точек будет приходить позже на время, равное

$$\Delta t = \frac{l}{c - V_r} - \frac{l}{c} \approx \frac{lV_r}{c^2},$$

где l – эффективный путь (порядка длины переизлучения), на котором у световых лучей набирается разность хода.

Таким образом, все точки графика $V_r(t)$ сместятся пропорционально их лучевой скорости, что ведёт к перекосу графика лучевых скоростей. По сути, такое постепенное искажение профиля волны $V_r(t)$ аналогично эволюции волнового цуга, подчиняющегося уравнению простой волны, или других волн в нелинейных средах, где скорость зависит от смещения, от амплитуды [46]. Действительно, с точки зрения баллистической теории световая волна аналогична кинематической волне, например в клистроне, где поток электронов, модулированный по скорости, по мере движения тоже меняет профиль волнового распределения электронов по скоростям [46].

Выведем уравнение графика лучевых скоростей звёзд из условия запаздывания

$$t' = t(V_r) + \Delta t = \frac{P}{2\pi} \left[\arcsin\left(-\frac{V_r}{K}\right) + \frac{2\pi l V_r}{P c^2} \right]. \quad (2)$$

Поскольку из этого уравнения нельзя получить в явном виде зависимость $V_r(t)$, то из условия

$$V_r = -K \sin\left(\frac{2\pi(t - \Delta t)}{P}\right)$$

получим в приближении, в котором параметр $e' = \frac{\pi l K}{P c^2} \ll 1$, зависимость

$$V_r \approx -K \left[\sin\left(\frac{2\pi t}{P}\right) + e' \sin\left(\frac{4\pi t}{P}\right) + \frac{3}{2} e'^2 \sin\left(\frac{6\pi t}{P}\right) \right], \quad (3)$$

где разложение в ряд ограничено членами порядка e'^2 .

В то же время кривая лучевых скоростей звезды, движущейся по эллиптической орбите с долготой периастра ω и эксцентриситетом e , задаётся через цепочку уравнений

$$V_r = K [\cos(\omega + v) + e \cos \omega] + V_0 = V_r' + V_r'',$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{v}{2}\right) = \frac{1}{b} \operatorname{tg}\left(\frac{E}{2}\right), \quad b = \sqrt{\frac{1-e}{1+e}}; \quad t = \frac{P}{2\pi} (E - e \sin E), \quad (4)$$

где v – истинная аномалия звезды (её угловое расстояние $\Pi S_1 S_2$ от периастра, рис. 3); E – эксцентрисическая аномалия; $V_r' = K \cos(\omega + v)$ – зависящая от времени часть лучевой скорости; $V_r'' = K e \cos \omega + V_0$ – постоянная часть лучевой скорости; V_0 – лучевая скорость центра масс двойной системы.

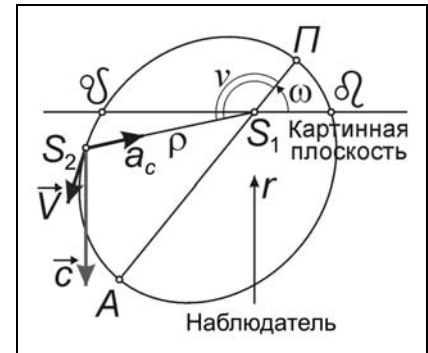


Рис. 3. Орбитальные элементы и схема расположения орбиты двойной звезды по отношению к наблюдателю: S_1 – главная звезда; S_2 – спутник; Π – периастр; A – апоастр; Ω – восходящий узел; v – истинная аномалия; r – луч зрения

Из выражения (4) тоже нельзя получить в явном виде зависимость $V_r(t)$. Поэтому снова ограничимся зависимостью $t(V_r')$:

$$t = \frac{P}{2\pi} \left(2 \operatorname{arctg} \left(\operatorname{btg} \left(\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{V_r'}{K} \right) - \frac{\omega}{2} \right) \right) - e \sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\operatorname{btg} \left(\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{V_r'}{K} \right) - \frac{\omega}{2} \right) \right) \right) \right). \quad (5)$$

Для $\omega = 90^\circ$, после преобразований и разложения в ряд Тейлора при ограничении членами первого порядка малости $e \ll 1$ (когда $b \approx 1 - e$), получим

$$t = \frac{P}{2\pi} \left[\arcsin \left(-b \frac{V_r'}{K} \right) + e b \frac{V_r'}{K} \right] \approx \frac{P}{2\pi} \left[\arcsin \left(-\frac{V_r'}{K} \right) + e \frac{V_r'}{K} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 - V_r'^2 / K^2}} \right) \right]. \quad (6)$$

Сравнивая выражения (2) и (6), можно видеть, что они дают сходные зависимости времени от лучевой скорости при $e = e' = \frac{\pi l K}{P c^2} = \frac{l a_c}{2 c^2}$. Ту же величину кажущегося эксцентриситета получил и К. Брэчер [29], который вслед за Э. Фрейндлихом и предложил в 1977 г. термин «кажущийся эксцентриситет». Отклонения заметны лишь при высоких эксцентриситетах и при лучевой скорости, близкой к экстремальным значениям $V_r' \approx \pm K$. Для такого приближения можно также получить выражение

$$V_r' \approx -K \left[\sin \left(\frac{2\pi t}{P} \right) + e \sin \left(\frac{4\pi t}{P} \right) + 2e^2 \sin \left(\frac{6\pi t}{P} \right) \right]. \quad (7)$$

Отсюда находим, что искажённая кривая лучевых скоростей (3) в первом приближении, действительно (как отмечено Фрейндлихом и Гутником), соответствует кривой лучевых скоростей (7) для вытянутой к Земле эллиптической орбиты с эксцентриситетом $e = e' = \frac{\pi l K}{P c^2} = \frac{l a_c}{2 c^2}$, где a_c – центростремительное ускорение звезды, летящей по круговой орбите.

В общем случае, для орбиты, обладающей истинным эксцентриситетом e и долгой периастра ω , можно получить выражение

$$t = \frac{P}{2\pi} \left(2 \operatorname{arctg} \left(\operatorname{btg} \left(\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{V_r'}{K} \right) - \frac{\omega}{2} \right) \right) - e \sin \left(2 \operatorname{arctg} \left(\operatorname{btg} \left(\frac{1}{2} \arccos \left(\frac{V_r'}{K} \right) - \frac{\omega}{2} \right) \right) \right) + \frac{2\pi l V_r'}{P c^2} \right). \quad (8)$$

Отметим, что и в этом случае при малости искажений кривая лучевых скоростей будет соответствовать в первом приближении кеплеровой орбите, но с изменёнными элементами $e' = e + \Delta e$ и $\omega' = \omega + \Delta \omega$, где Δe – поправка к эксцентриситету, вносимая искажениями (мнимым эксцентриситетом), а $\Delta \omega$ – поправка к долготе периастра.

3. Эффект Ритца – дополнение к эффекту Доплера

Как легко заметить, запаздывание света из одних положений и опережение – из других эквивалентно растяжению или сжатию интервалов видимого движения звезды или интервалов на кривой лучевых скоростей. Именно за счёт этого эффекта равномерное движение звезды по круговой орбите начинает казаться неравномерным (см. рис. 2), словно за картинной плоскостью звезда находится меньше время и движется быстрее, чем перед картинной плоскостью, как впервые отметил Д.Ф. Комсток [18].

Рассмотрим эффект количественно на примере звезды, излучающей световые сигналы через малый интервал времени dt и расположенной от Земли на расстоянии r . Свет, испущенный звездой в момент времени t , достигнет Земли в момент $t' = t + r/c$, где c – скорость света в вакууме. Малое время dt' , протёкшее между приёмом этих двух световых сигналов, найдётся дифференцированием t' по t :

$$dt' = \left(1 + \frac{\partial r}{\partial t} \cdot \frac{1}{c} - \frac{r}{c^2} \cdot \frac{\partial c}{\partial t} \right) dt. \quad (9)$$

При выводе данной формулы рассмотрен общий случай, когда скорость света c играет роль не фундаментальной константы (как постулирует специальная теория относительности), а рассматривается в

качестве переменной c' , как в общей теории относительности (ОТО) [47, 48], и как предполагает баллистическая теория. Переменность скорости света в вакууме была, например, экспериментально выявлена в сеансах космической радиолокации планет: возле Солнца скорость радиосигнала снижалась, и он приходил с дополнительным запаздыванием, как показали измерения И. Шапино [47, 48]. В пользу такой переменности свидетельствует и ряд других данных космической радиолокации [35, 49].

Если первое переменное слагаемое в скобках выражения (9) характеризует просто эффект Доплера $dt' = (1 + V_r/c)dt$, так как $\partial r / \partial t$ – это лучевая скорость V_r источника относительно приёмника, то второе слагаемое характеризует изменение периода сигналов исключительно за счёт изменения скорости света c' . Этот эффект задан выражением

$$dt' = \left(1 - \frac{r}{c^2} \cdot \frac{\partial c}{\partial t}\right) dt, \quad (10)$$

В рамках баллистической теории принцип геометрического сложения скоростей $\mathbf{c}' = \mathbf{c} + \mathbf{V}$ ведёт к изменению скорости света при ускорении источника. Согласно баллистическому принципу, скорость света, идущего от источника к приёмнику (т.е. модуль её проекции на луч зрения \mathbf{r} – радиус-вектор источника), равна $c' = c - V_r$, где V_r – лучевая скорость источника, а номинальная скорость света $c = \text{const}$. При дифференцировании получим $\partial c' / \partial t = -\partial v_r / \partial t = -a_r$. Подставляя $\partial c' / \partial t = -a_r$ в (10), найдём

$$dt' = \left(1 + \frac{ra_r}{c^2}\right) dt. \quad (11)$$

Эту формулу преобразования временных интервалов Ритц вывел в 1908 г. [17]. Физическая природа эффекта прозрачна: если верен баллистический принцип, то при ускоренном движении источник в каждый последующий момент сообщает свету несколько иную скорость, чем в предыдущий. Тогда сигналы (или фронты световых волн), испущенные в разные моменты и приобретшие разные скорости, либо постепенно догоняют друг друга (сокращая длину волны), либо постепенно отстают (наращивая длину волны), т.е. приходят к приёмнику чаще или реже, в зависимости от направления ускорения и знака a_r . Так, если формула (11) выражает преобразование периода dt световых колебаний, то для преобразования длины волны $\lambda = cdt$, частоты света $f = 1/dt$ и видимой светимости W источника можно записать соответственно [24, 36]

$$\lambda' = cdt' = \lambda \left(1 + \frac{ra_r}{c^2}\right), \quad f' = 1/dt' = f \left(1 + \frac{ra_r}{c^2}\right)^{-1}, \quad W' = Wdt/dt' = W \left(1 + \frac{ra_r}{c^2}\right)^{-1}. \quad (12)$$

Этот эффект, впервые предсказанный Ритцем (а для двойных звёзд – Цурхелленом [16]), будем далее называть эффектом Ритца. Он дополняет эффект Доплера. При этом общее преобразование периода и длины волны из формулы (9) выразится как

$$dt' = \left(1 + \frac{V_r}{c} + \frac{ra_r}{c^2}\right) dt, \quad \lambda' = \left(1 + \frac{V_r}{c} + \frac{ra_r}{c^2}\right) \lambda. \quad (13)$$

Эффект изменения видимой длительности приводит к более простому способу вычисления величины мнимого эксцентриситета у звезды, летящей по круговой орбите с центростремительным ускорением a_c (см. рис. 2), чем рассмотренный в п. 2. Действительно, перед картинной плоскостью в ближайшей к нам точке орбиты 3 (где $a_r = a_c$) движение звезды будет казаться замедленным, ввиду растяжения моментов $dt'_3 = (1 + la_c/c^2)dt$ по эффекту Ритца (11) на эффективной длине $r = l$. А за картинной плоскостью в наиболее удалённой точке орбиты 1 (где $a_r = -a_c$) движение звезды будет казаться ускоренным от сжатия видимых интервалов $dt'_1 = (1 - la_c/c^2)dt$. Таким образом, в точках 1 и 3 отношение видимых угловых смещений и соответствующих тангенциальных скоростей движения звезды будет таким:

$$\frac{V'_1}{V'_3} = \frac{dt'_3}{dt'_1} = \frac{1 + la_c/c^2}{1 - la_c/c^2}. \quad (14a)$$

Оно эквивалентно вытекающему из второго закона Кеплера соотношению лучевых скоростей

$$\frac{V_1}{V_3} = \frac{\rho_3}{\rho_1} = \frac{1 + e'}{1 - e'} \quad (14b)$$

у орбиты, вытянутой к Земле (см. рис. 2 и 3), с эксцентриситетом e' и расстояниями ρ_1 и ρ_3 до главной звезды S_1 , соответственно, в периастре 1 и в апоастре 3. Из сравнения выражений (14а) и (14б) мнимый эксцентриситет $e' = \frac{la_c}{c^2} = \frac{2\pi lK}{Pc^2}$. Однако при определении эксцентриситета по радиальным скоростям – по кривой лучевых скоростей, скажем, по тангенсу угла наклона α касательных в точках 1 и 3 (см. рис. 2), скорость в них даёт уже двойной вклад (за счёт разной скорости движения по эллиптической орбите возле этих точек и за счёт разной скорости её изменения). Действительно, тангенс угла наклона касательной $\frac{dV_r}{dt}$ в периастре 1 и апоастре 3 равен ускорению звезды в этих точках $a_1 = \frac{dV_r}{dt} = \frac{GM}{\rho_1^2}$ и $a_3 = \frac{dV_{3r}}{dt} = \frac{GM}{\rho_3^2}$, где G – гравитационная постоянная, M – масса главной звезды S_1 (см. рис. 3). Тогда ус-

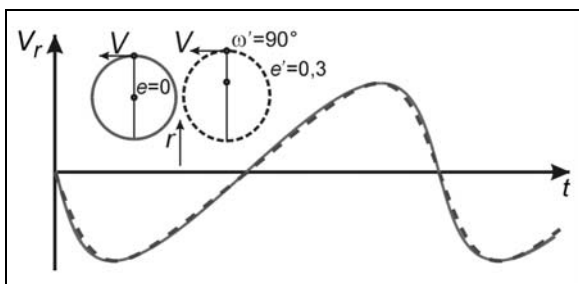


Рис. 4. Результат сравнения искажённой кривой лучевых скоростей $V_r'(t)$ для круговой орбиты с $e' = \pi lK/Pc^2 = 0,3$ (сплошная линия) и кривой лучевых скоростей $V_r(t)$ для орбиты с эксцентриситетом $e' = 0,3$ (пунктирная линия)

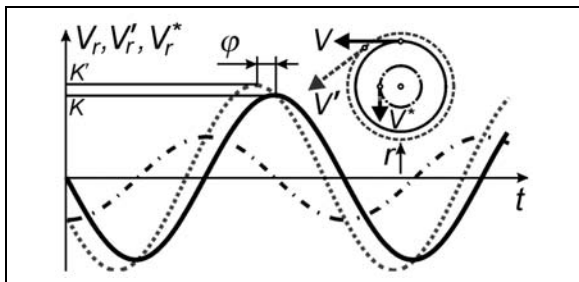


Рис. 5. Схема искажения доплеровской кривой лучевых скоростей $V_r(t)$ (сплошная линия) от дополнительного сдвига частоты по эффекту Ритца в виде кривой мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t) = la_r/c$ (штрихпунктирная линия) и соответствующие орбиты; результирующая кривая спектральных смещений (пунктирная линия) даёт ложную доплеровскую скорость $V_r'(t) = V_r(t) + V_r^*(t)$

Однако, интерпретируя это смещение исключительно как доплеровское, получим мнимое, кажущееся значение скорости

$$V_r' = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = V_r + \frac{ra_r}{c}. \quad (17)$$

Существование такого дополнительного эффекта смещения частоты и длины волны, пропорционального расстоянию r , предвидел ещё А. Белопольский [16], предлагавший его для объяснения красного смещения в спектрах галактик. Причём теоретическая величина постоянной Хаббла, рассчитанная на основе эффекта Ритца (12) и известных центростремительных ускорений в галактиках, оказывается очень близка к измеренной постоянной Хаббла [24, 50]. Таким образом, закон Хаббла, естественно, выводится без дополнительных гипотез о разбегании галактик со скоростью, пропорциональной расстоя-

нию подобия графиков (рис. 4) при $e' \ll 1$ запишется уже как $a_1 \propto \frac{1}{dt'_1}$ и $a_3 \propto \frac{1}{dt'_3}$, что в приближении $e' \ll 1$ даёт

$$\frac{dt'_3}{dt'_1} = \frac{a_1}{a_3} = \left(\frac{\rho_3}{\rho_1} \right)^2 \approx \frac{1+2e'}{1-2e'}. \quad (15)$$

Отсюда

$$e' = \frac{la_c}{2c^2} = \frac{\pi lK}{Pc^2},$$

что совпадает с выражением, полученным ранее чисто аналитически, т.е. в случае искажений эксцентриситеты орбиты двойной звезды, определённые астрометрически и по доплер-эффекту, различались бы в два раза, что можно использовать в качестве критерия для выявления природы искажений и определения истинного движения и эксцентриситета звезды.

Если эффект имеет место, и видимое движение звёзд искажается влиянием скорости звёзд на скорость света, то кроме указанного искажения произойдёт также дополнительное смещение спектральных линий по закону (12). Тогда общее изменение длины волны спектральной линии выражает формула (13), т.е. будет представлено суммой смещений линий по эффекту Доплера и по эффекту Ритца:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{V_r}{c} + \frac{ra_r}{c^2}. \quad (16)$$

нию. К той же точке зрения склонялся и Ф. Цвикки, и сам Э. Хаббл, а также К.Э. Циолковский [51] и С.И. Вавилов [52, 53].

Для кривых лучевых скоростей звёзд, движущихся по круговой орбите, этот эффект приведёт к изменению орбитальной фазы звезды. Так, если истинная лучевая скорость звезды задана выражением $V_r = -K \sin(2\pi t/P)$, то для ускорения $a_r = \frac{dV_r}{dt} = -(2\pi K/P) \cos(2\pi t/P)$, и вносимая им добавочная мнимая (*кажущаяся*) скорость $V_r^* = ra_r/c$ или $V_r^* = la_r/c$ (в случае переизлучения света на длине l). Отсюда получим, что расчётная скорость задана выражением

$$V_r' = V_r + V_r^* = -K \sin\left(\frac{2\pi t}{P}\right) - \frac{2\pi l K}{Pc} \cos\left(\frac{2\pi t}{P}\right) = -K' \sin\left(\frac{2\pi t}{P} + \varphi\right), \quad (18)$$

где сдвиг по фазе $\varphi = \arctg\left(\frac{2\pi l}{Pc}\right)$, а амплитуда лучевой скорости станет равна

$$K' = K \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi l}{Pc}\right)^2} \approx K \left(1 + 2e'^2 \frac{c^2}{K^2}\right), \quad (19)$$

в приближении для мнимого эксцентриситета $e' = \frac{\pi l K}{Pc^2} \ll 1$.

Этот сдвиг кривой лучевых скоростей $V_r'(t)$ (рис. 5) можно будет заметить, например, у спектрально-двойных звёзд, являющихся одновременно затменно-двойными. Теоретически затмение звезды с круговой орбитой должно наблюдаться в момент её наибольшего удаления в фазе кривой лучевых скоростей, равной 0. Если же кривая смещена по эффекту Ритца, то затмение произойдёт с запозданием относительно фазы 0 на разность фаз φ , достигающую величины $\pi/2$ в предельном случае, когда смещение спектра почти целиком обусловлено эффектом Ритца. Подобные несоответствия кривой блеска и лучевой скорости реально открыты, например, у экзопланеты в Андромеды, как будет показано в п. 5.

В случае, когда кривая лучевых скоростей заметно искажается из-за эффекта Ритца, и вызванные им смещения намного превосходят доплеровские ($V_r' \approx V_r^*$), искажения кривой лучевых скоростей от эффекта запаздывания тоже ведут к появлению мнимого эксцентриситета. Однако эквивалентная эллиптическая орбита будет соответствовать уже $\omega = 180^\circ$, т.е. эффект Барра проявился бы и в преобладании орбит с ω возле этого значения. Действительно, для круговой орбиты лучевое ускорение $a_r = -\frac{2\pi K}{P} \cos\left(\frac{2\pi t}{P}\right)$, откуда $t = \frac{P}{2\pi} \arccos\left(-\frac{Pa_r}{2\pi K}\right)$, а в случае дополнительного запаздывания света на $\Delta t = \frac{lV_r}{c^2} = -\frac{lK \sin[(2\pi t)/P]}{c^2}$ при замене $\frac{\pi l K}{Pc^2} = e'$ получим выражение

$$t = t(a_r) + \Delta t = \frac{P}{2\pi} \arccos\left(-\frac{Pa_r}{2\pi K}\right) - \frac{lK}{c^2} \sqrt{1 - \left(\frac{Pa_r}{2\pi K}\right)^2} = \frac{P}{2\pi} \left(\arccos\left(-\frac{PcV_r^*}{2\pi Kl}\right) - 2e' \sqrt{1 - \left(\frac{PcV_r^*}{2\pi Kl}\right)^2} \right). \quad (20)$$

Отсюда тоже нельзя получить в явном виде зависимость ускорения a_r и мнимой скорости V_r^* от времени t . Однако приближённый анализ, подобный проведённому для выражения (3), показывает, что при ограничении членами первого порядка e' искажённая кривая смещений частоты соответствует эллиптической орбите с $\omega' = 180^\circ$, эксцентриситетом $e = e' = \pi l K / (Pc)^2$ и полуамплитудой лучевой скорости $K' = 2\pi l K / (Pc)$ (рис. 6), которая следует из выражения (5), после разложения в ряд Тейлора:

$$t = \frac{P}{2\pi} \left(\arccos\left(-\frac{V_r/(K'+e)}{V_r e/(K'+1)}\right) - e \sqrt{1 - \left(\frac{V_r/(K'+e)}{V_r e/(K'+1)}\right)^2} \right) \approx \frac{P}{2\pi} \left(\arccos\left(-\frac{V_r}{K'}\right) - 2e \sqrt{1 - \left(\frac{V_r}{K'}\right)^2} \left(\frac{1 + V_r/(2K')}{1 + V_r/K'}\right) \right). \quad (21)$$

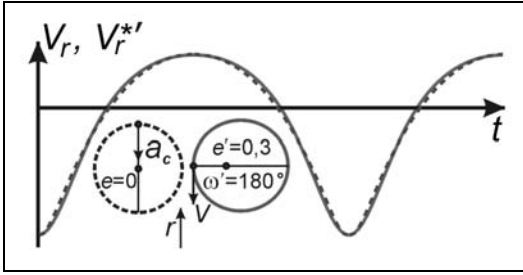


Рис. 6. Сравнение кривой мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$ (пунктирная линия) от частотного сдвига по эффекту Ритца, искажённой от эффекта запаздывания (при $\pi K/(Pc^2) = 0,3$), и кривой лучевых скоростей $V_r(t)$ от сдвига частоты по эффекту Доплера (сплошная линия) для орбиты с $e' = 0,3$ и $\omega' = 180^\circ$

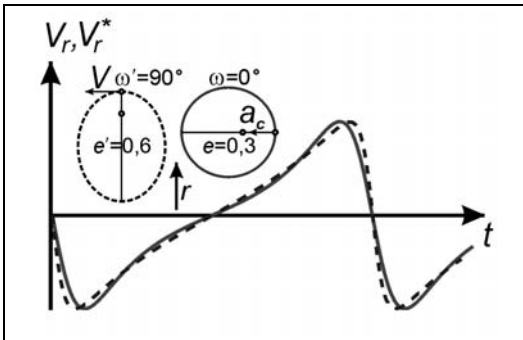


Рис. 7. Сравнение кривой мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$ от сдвига частоты по эффекту Ритца (сплошная линия) для орбиты с $e = 0,3$ и $\omega = 0^\circ$ и кривой лучевых скоростей $V_r(t)$ от сдвига частоты по эффекту Доплера (пунктирная линия) для орбиты с $e' = 0,6$ и $\omega' = 90^\circ$

Это позволяет объяснить асимметрию распределения периастров справа и слева от линии визирования, а также позволяет понять, почему в некоторых случаях периастры сосредоточены возле значения $\omega = 180^\circ$ (см. п. 5). Однако в случае большой величины расчётного эксцентриситета $e \sim 0,5$ и выше такое искажение недостаточно для объяснения наблюдаемой кривой лучевых скоростей (рис. 6). Так, при центростремительном ускорении $a = c^2/r$ и максимальной степени сжатия $dt'/dt = 0$ в точке орбиты 1 (см.

рис. 2), пока на кривой лучевых скоростей ещё нет самопересечений, в точке орбиты 3 максимальная степень растяжения составит всего $dt'/dt = 2$. Однако действительная степень замедления движения в апоастре (по отношению к средней угловой скорости движения по орбите) может быть намного выше. Например, при эксцентриситете $e = 0,7$ график лучевых скоростей соответствует растяжению в $dt'/dt \sim 2,5$ раза.

В случае эллиптической орбиты, даже в отсутствие заметных искажений от эффекта запаздывания света, эффект Ритца может привести к изменению симметричной формы кривой лучевых скоростей. Так, если смещения по эффекту Ритца намного превосходят доплеровские, для звезды с $\omega = 0^\circ$, которой соответствует чётная функция $V_r(t)$, регистрируемая кривая «мнимых лучевых скоростей» в виде нечётной функции $V_r^*(t)$ будет соответствовать орбите с $\omega' = 90^\circ$

(рис. 7). Действительно, в этом случае $V_r^* = \frac{la_r}{c}$, где $a_r = \frac{GM}{\rho^2} \sin(\omega + \nu)$ – лучевое ускорение спутника S_2 , вызываемое

главной звездой S_1 массы M (см. рис. 3), расстояние до

которой от спутника меняется по закону $\rho = p/(1 + e \cos \nu)$, где p – фокальный параметр эллипса орбиты.

Отсюда измеренная по смещению линий мнимая скорость будет задана выражением

$$V_r^*(\nu) = \frac{lGM}{p^2 c} (1 + e \cos \nu)^2 \sin(\omega + \nu). \quad (22)$$

В частности, для $\omega = 0^\circ$ после разложения в ряд можно получить

$$V_r^*(t) \approx K \left[\sin\left(\frac{2\pi t}{P}\right) + 2e \sin\left(\frac{4\pi t}{P}\right) + 3e^2 \sin\left(\frac{6\pi t}{P}\right) \right], \quad (23)$$

Точное выражение графика «мнимых лучевых скоростей» с учётом (4) имеет вид

$$V_r^*(t) = \frac{lGM}{p^2 c} \left(1 + e \frac{1 - \operatorname{tg}^2(E/2)/b^2}{1 + \operatorname{tg}^2(E/2)/b^2} \right)^2 \left(\frac{\sin \omega (1 + 2c \operatorname{tg} \omega \operatorname{tg}(E/2)/b - \operatorname{tg}^2(E/2)/b^2)}{1 + \operatorname{tg}^2(E/2)/b^2} \right),$$

где эксцентрисическая аномалия E выражается через t из условия (4).

Из уравнения (22) получим функцию, описывающую кривую лучевых скоростей:

$$V_r^* = \frac{lGM}{p^2 c} \left[\sin(\omega + \nu) + 2e \sin(\omega + \nu) \cos \nu + e^2 \cos^2 \nu \sin(\omega + \nu) \right], \quad (24)$$

которая в первом приближении, с учётом зависимости $\nu(t)$, близка к доплеровской кривой лучевых скоростей $V_r(t)$ для орбиты с полуамплитудой $K' = lGM/(p^2 c)$, с долготой периастра $\omega' = \omega + 90^\circ$ и эксцентриситетом e' в два раза большим, чем e :

$$V_r = K' [\cos(\omega + \nu) + e' \cos \omega] = K' [\sin(\omega' + \nu) + e' \sin \omega'] \quad (25)$$

Вывод о том, что график мнимой кривой лучевых скоростей соответствует графику истинных лучевых скоростей для орбиты удвоенного эксцентриситета, следует уже из дифференцирования выражения $V_r(t)$ (7), которое как раз даёт график лучевых ускорений $a_r(t)$ и соответствующий график мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t) = \frac{la_r}{c}$. При этом слагаемое, содержащее в качестве коэффициента эксцентриситет e (вторая гармоника $2e \sin\left(\frac{4\pi t}{P}\right)$), после дифференцирования приобретёт удвоенный коэффициент $4e$, соответствуя графику $V_r(t)$ для орбиты удвоенного эксцентриситета $e' = 2e$. Также удвоение мнимого эксцентриситета следует из сравнения выражений (14б) и (15), показывающих отношение значений в минимуме и максимуме соответственно для лучевой скорости V_r и мнимой лучевой скорости $V_r^*(t) = \frac{la_r}{c}$. Как видно из рис. 8, эти отношения совпадут при условии, что для графика $V_r(t)$ эксцентриситет $e' = 2e$, т.е. в два раза выше истинного эксцентриситета e , соответствующего графику $V_r^*(t)$.

Отличия графиков $V_r^*(t)$ и $V_r(t)$ становятся заметны лишь при высоких значениях истинного эксцентриситета $e > 0,3$. Особенно ярко это проявляется в форме образования на графике $V_r^*(t)$ вторичных максимумов и минимумов, отсутствующих на кривой лучевых скоростей $V_r(t)$ и $V_r(\nu)$, как легко убедиться путём исследования выражения (25) на экстремумы, число которых на одном периоде P всегда равно двум. Однако аналогичный анализ выражения мнимых лучевых

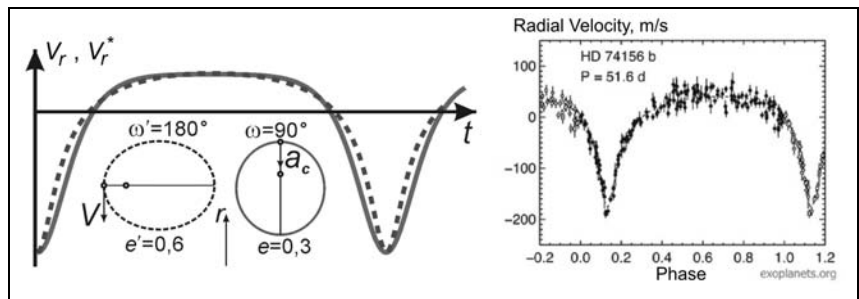


Рис. 8. Сравнение графиков мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$ от сдвига частоты по эффекту Ритца (сплошная линия, для орбиты с $e = 0,3$ и $\omega = 90^\circ$) и лучевых скоростей $V_r(t)$ от сдвига частоты по эффекту Доплера (пунктирная линия, для орбиты с $e' = 0,6$ и $\omega' = 180^\circ$): справа – пример графика $V_r(t)$ у экзопланеты HD 74156 b с аномально высоким $e' = 0,63$ и $\omega' = 174^\circ$, действительная орбита которой может иметь умеренный эксцентриситет $e = 0,32$ и $\omega \sim 90^\circ$

скоростей $V_r^*(\nu)$ (22) показывает, что число решений-экстремумов уравнения $dV_r^*/d\nu = 0$ может быть и выше двух. Так, для $\omega = 90^\circ$ найдём, кроме главных экстремумов (при $\nu_1 = 0$ и $\nu_2 = \pi$), ещё и вторичные – при $\nu_3 = \arccos\left(-\frac{1}{3e}\right)$ и $\nu_4 = 2\pi - \arccos\left(-\frac{1}{3e}\right)$. Поскольку зависимость $\nu(t)$ – монотонно нарастающая, соответствующие дополнительные экстремумы образуются и на кривой лучевых скоростей $V_r^*(t)$. Легко видеть, что эти вторичные максимумы и минимумы в виде небольших горбов и ямок возникают на графике лучевых скоростей лишь при значении эксцентриситета $e > 1/3 \approx 0,33$. Как показывает компьютерное моделирование или исследование выражения (22) на экстремумы, при отдалении долготы периастро от значения $\omega = 90^\circ$ (точнее от $\sin \omega = \pm 1$) вторичные максимумы начинают формироваться при ещё больших значениях e . А в предельном случае, при $\omega = 0^\circ$ или $\omega = 180^\circ$ вторичные максимумы и минимумы отсутствуют, даже при $e \approx 1$. При этом кривая лучевых скоростей приобретает характерную ступенчатую форму.

Отметим, что наибольших искажений по эффекту Ритца можно ожидать в системах двойных пульсаров, где орбитальные периоды P коротки, а скорости K и центростремительные ускорения a_c велики. Соответственно, эффект Ритца для таких систем должен быть велик, и может возникать высокий мнимый эксцентриситет $e' = \frac{la_c}{2c^2} = \frac{\pi l K}{P c^2}$. Действительно, в таких системах наблюдаются высокие эксцентриситеты

ситеты $e \sim 0,5-0,8$ при очень коротких орбитальных периодах $P \sim 10$ сут [54], при которых трение в атмосфере звёзд и приливное трение должно скруглять орбиты до почти нулевого эксцентриситета $e = 0$. Таким образом, действительные орбиты пульсаров могут быть круговыми, а наблюдаемые высокие эксцентриситеты могут быть мнимыми, вызванными эффектом Ритца, или же действительные эксцентриситеты в два раза меньше расчётных, если наблюдается мнимая кривая лучевых скоростей (см. рис. 7 и 8). В пользу искажений графиков лучевых скоростей по эффекту Ритца и вклада мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$ могут свидетельствовать аномалии в движении пульсаров, их графиков лучевых скоростей и рассчитанных по ним орбит, отличных от кеплеровских. Действительно, у ряда двойных пульсаров наблюдаются систематические остаточные отклонения наблюдаемых графиков лучевых скоростей от теоретических [55, 56]. Причём эти остаточные отклонения соответствуют теоретической форме графиков мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$ [55].

Отметим, что смещения спектральных линий поглощения и излучения по эффекту Ритца (12) получаются существенно меньше тех, которые можно ожидать на основании масштабов искажения времени на кривой лучевых скоростей, где происходят растяжения-сжатия интервалов dt в разы. Если бы и частота при этом менялась в разы, то мнимые скорости V^* (17) были бы сопоставимы со скоростью света. Однако фактически эффект переизлучения на порядки снижает смещение по эффекту Ритца (делая его сопоставимым с доплеровским) для частот возле линий поглощения атомов, по которым и определяют спектральное смещение. Поскольку возле каждой резонансной частоты f_0 показатель преломления n [21] стремительно нарастает по закону

$$n = \sqrt{1 + \frac{q}{(f_0^2 - f^2)}} \quad (26)$$

(где q – коэффициент, характеризующий концентрацию атомов, массу и силу осциллятора), то для них длины переизлучения $l = \frac{\lambda}{2\pi(n-1)}$ и пропорциональные им смещения по эффекту Ритца $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{la_r}{c^2}$ существенно снижены, так что они становятся меньше смещений по эффекту Доплера или сопоставимы с ними. В то же время непрерывный тепловой спектр излучения, в котором частоты далеки от резонансных, может смещаться по эффекту Ритца намного сильнее, ведя к кажущемуся изменению цветовой температуры звезды. Спектр поглощения может сильно смещаться лишь в том случае, когда свет идёт в пространстве, практически свободном от межзвёздного газа. Подобные условия реализуются лишь в межгалактическом пространстве или в окнах, коридорах прозрачности – участках Галактики, практически свободных от межзвёздного газа.

В случае значительного эксцентриситета, сопоставимости доплеровских и ритцевых смещений, а также при учёте эффекта запаздывания, искажения приобретут ещё более сложный характер. Результирующую кривую расчётных лучевых скоростей $V_r'(t')$ в таком общем случае можно построить для каждого значения t через параметрическое задание скорости и моментов наблюдения t' , выраженных из условий (4), (11), (18) и (22) через истинную аномалию v , согласно уравнениям

$$V_r'(v) = V_r + V_r^* = K[\cos(\omega + v) + e \cos \omega] + V_0 + \frac{lGM}{p^2 c} (1 + e \cos v)^2 \sin(\omega + v),$$

$$\operatorname{tg}\left(\frac{v}{2}\right) = \frac{1}{b} \operatorname{tg}\left(\frac{E}{2}\right), \quad (27)$$

$$t = \frac{P}{2\pi} (E - e \sin E), \quad t' = t + \frac{lGM}{p^2 c^2} \int_0^t (1 + e \cos v)^2 \sin(\omega + v) dt.$$

На результирующих графиках лучевых скоростей $V_r'(t')$ могут, как отмечалось выше, появиться вторичные максимумы и минимумы, ступени и другие аномалии. Подобные искажения реально наблюдаются у некоторых звёзд (например, у звезды RZ Щита), рассмотренных в монографии Бэттена [4]. Подобные вторичные минимумы можно наблюдать и в системах экзопланет. Например, у планеты

HD 74156 b на кривой лучевых скоростей в районе максимума лучевой скорости, где на кривой $V_r^*(t)$ должен быть неглубокий минимум, действительно, обнаруживается тенденция к спаду лучевой скорости на вершине (см. рис. 8). Это может означать, что орбита планеты HD 74156 b всё же эллиптическая, хотя и обладает в два раза меньшим эксцентриситетом $e \sim 0,3$, так что регистрируется не действительная кривая лучевых скоростей $V_r(t)$, а мнимая $V_r^*(t)$, содержащая вторичные минимумы (рис. 8). Также можно объяснить аномальные формы графиков лучевых скоростей (с вторичными максимумами) у ряда переменных звёзд, в том числе у цефеид и звёзд типа RR Лиры, которые могут менять яркость не только за счёт пульсаций, но и за счёт орбитального вращения (эффект затмений, эффект эллипсоидальности и др.). При этом их видимая яркость W' может меняться как раз по эффекту Ритца (12), который, сдвигая частоту спектрального максимума, меняет также цвет звёзд [45, 50]. Такое постепенное преобразование, по мере движения света, постоянного излучения звезды яркости W в периодически меняющееся излучение интенсивности W' аналогично клистронному эффекту – растущим вдоль пути колебаниям плотности потока электронов, модулированного по скоростям [46]. Гипотезу двойственности цефеид, как возможной причины колебаний их яркости и цвета, выдвигал уже их первооткрыватель – Дж. Гудрайк. Подробно эту гипотезу рассмотрел и обосновал А.А. Белопольский, открывший колебания смещений спектральных линий цефеид, аналогичные наблюдаемым в двойных звёздах [16].

Отметим, что сходство графиков лучевых скоростей цефеид и двойных звёзд и привело Белопольского к мысли, что цефеиды – это двойные, а не пульсирующие звёзды. По той же причине Барр случайно включил в свою статистику четыре цефеиды, что, впрочем, существенно не изменило картины эффекта Барра [1, 2, 4]. Первое объяснение колебаний блеска цефеид на основе эффекта Ритца (12) принадлежит Ла Розе [57, 58]. К тому же объяснению обратился В.И. Секерин [59], а также В.М. Лютый – известный специалист по переменным двойным звёздам [60]. В.М. Лютый исследовал двойные рентгеновские звёзды, у которых наблюдаются такие же плавные колебания блеска и цветовой температуры, как у цефеид, происходящие с орбитальным периодом P . Эффект Ритца позволяет также объяснить эффект Блакко у звёзд типа RR Лиры и короткопериодических цефеид. Если предположить, что этот тип переменных звёзд представляет собой тесные двойные системы (что подтвердилось для некоторых цефеид и звёзд типа RR Лиры [61]), то при быстром повороте их линий апсид, циклично меняющем ω , будет циклично меняться кривая лучевых ускорений $a_r(t)$ и мнимых скоростей, описываемых формулой (24). Соответственно меняется обусловленная эффектом Ритца (12) кривая блеска $W'(t)$, а также степень её асимметрии [45]. Именно такие вариации кривых блеска и наблюдаются в форме эффекта Блакко.

Для двойных звёзд преобразование частоты света эффектом Ритца (12) может быть и столь значительным, что при $a_r \approx -\frac{c^2}{r}$ длина волны сократится на порядки, почти до нуля: оптическое излучение звезды преобразуется в рентгеновское или гамма-излучение. В таком случае двойная звезда будет восприниматься как рентгеновский пульсар или гамма-барстер [45]. Это ставит под сомнение рассмотренный в п. 2 аргумент Брэчера против баллистической теории [29, 31], поскольку даже при отсутствии переизлучения рентгеновских и гамма-лучей межзвёздным газом следует учесть, что изначально эти излучения представляли собой обычный свет, который эффективно переизлучался на дистанции l порядка светового года, недостаточной для создания заметных искажений. Однако на этой дистанции свет успевал преобразоваться в рентгеновское излучение или гамма-излучение, если одна из компонент двойной звезды тоже была двойной и за счёт более высокого ускорения a_r изменяла частоту излучения заметно сильнее [45]. Кроме того, поскольку Брэчер полагал, что механизм генерации гамма-излучения – синхротронный, он принял, что скорость источника этого излучения $V > 0,1c$, на основе чего получил по измеренной длительности dt гамма-всплесков, что в выражении (1) $k = \frac{c^2}{2V} \frac{dt}{r} < 10^{-20}$ [31]. Однако действительный механизм генерации рентгеновских и гамма-вспышек у барстеров (GRB), как отмечал сам Брэчер в 2000 г. [31], до сих пор не установлен однозначно. Поэтому, если гамма-излучение представляет собой оптическое излучение звёзд, повысившее частоту по эффекту Ритца (12), то истинные скорости

V – на порядки ниже, а k – на порядки выше и достигают величины, согласующейся с наблюдаемой в анализе Брэчера.

Таким образом, учёт эффекта Ритца в космосе снимает все возражения против баллистической теории и позволяет объяснить ряд аномалий, непонятных в рамках существующих представлений о строении и эволюции звёздных систем на основе гипотезы о постоянстве скорости света.

4. Критерии соответствия эффекта Барра – баллистической теории

Рассмотрим основные критерии, позволяющие установить, действительно ли эффект Барра обусловлен влиянием орбитальной скорости звезды на скорость испущенного ей света. Можно выдвинуть восемь основных критериев:

1) вызванное влиянием скорости источника на скорость света искажение графиков лучевых скоростей приведёт к кажущемуся преобладанию орбит с $0^\circ \leq \omega < 180^\circ$ над орбитами с $180^\circ \leq \omega < 360^\circ$;

2) аномально высокие мнимые эксцентриситеты будут преобладать у звёзд с наиболее высоким отношением K/P – именно для них асимметрия в распределении по долготам периастров и эффект Барра проявятся наиболее отчётливо;

3) эффект Барра должен отсутствовать у близких звёзд ($r \sim 10$ св. лет) и быть хорошо заметен для далёких звёзд высоких дистанций ($r \sim 100\text{--}1000$ св. лет) и отрицательной лучевой скоростью центра масс $V_0 < 0$;

4) лучевые скорости компонентов, при несовпадении их амплитуд, колебались бы не в противофазе: им отвечали бы разные эксцентриситеты и разные скорости центра масс системы;

5) долготы периастров компонентов двойных звёзд, в которых наблюдается эффект Барра, должны отличаться менее чем на 180° ;

6) эксцентриситет орбиты, определённый астрометрическим или фотометрическим методами (по колебаниям яркости при затмениях), должен отличаться от эксцентриситета орбиты, определённого спектроскопически по кривой лучевых скоростей;

7) для высоких мнимых эксцентриситетов должны наблюдаться заметные отклонения от теоретической кривой лучевых скоростей, имеющие вид гармоник орбитального периода;

8) эксцентриситет и полуамплитуда колебаний лучевой скорости, определённые по разным группам линий, могут различаться для одной и той же орбиты; также могут различаться эксцентриситеты, измеренные по линиям разных компонентов.

Рассмотрим, откуда следуют эти критерии, и соответствует ли эффект Барра и наблюдаемые аномалии орбит звёзд этим критериям.

1°. Первый критерий следует из того, что искажения, обусловленные влиянием скорости источника на скорость света, приводят к одному и тому же типу асимметрии, вызывая мнимое вытягивание расчётных орбит в сторону Земли. Как отмечалось в начале работы и в п. 1, этот критерий, действительно, выполняется, как показал анализ, проведённый самим Барром и другими астрономами (см. рис. 1).

Был рассмотрен простейший случай круговой орбиты двойных звёзд. Действительные орбиты обладают, как правило, ненулевыми истинными эксцентриситетами e , к которым добавляются кажущиеся эксцентриситеты Δe , обусловленные искажением кривой лучевых скоростей, так что измеренный мнимый эксцентриситет $e' = e + \Delta e$. Это ведёт к искажению действительного эксцентриситета орбиты и долготы её периастра, на что обратил внимание ещё в 1913 г. Кортевег [20] – автор уравнения Кортевега-ДеВриза, описывающего нелинейные искажения волн при распространении [46]. В итоге, у орбит с $0^\circ \leq \omega < 180^\circ$ расчётный эксцентриситет e' нарастает по сравнению с реальным e , а расчётная долгота периастра ω' приближается к 90° . Напротив, у звёзд с $180^\circ \leq \omega < 360^\circ$ расчётный эксцентриситет e' снижается, и ω' может попасть в интервал $0^\circ \leq \omega < 180^\circ$. Именно из-за наличия истинных эксцентриситетов e при исходно однородном распределении $N(\omega)$ в расчётном распределении долгот периастров $N'(\omega)$ обычно нет резкого максимума при $\omega = 90^\circ$, а наблюдается просто преобладание орбит с ω возле данного значения и вообще в диапазоне $0^\circ \leq \omega < 180^\circ$. Степень этой асимметрии в распределении $N(\omega)$ будем в дальнейшем характеризовать предложенным Дж. Фоксом [3] параметром асимметрии

$$R = \frac{N(0^\circ \leq \omega < 180^\circ)}{N(180^\circ \leq \omega < 360^\circ)},$$

т.е. отношением числа звёздных орбит с периастром в I и II квадрантах к числу звёздных орбит с периастром в III и IV квадрантах (см. рис. 1).

При равномерном случайном распределении $R \approx 1$. Первый критерий удовлетворяется в случае, если R превышает единицу на величину, заметно большую среднестатистических отклонений. Учитывая, что для случайного равновероятного распределения $N(\omega)$ среднеквадратичное отклонение $\sigma = \frac{N^{1/2}}{2}$, то статистически ожидаемое $N(0^\circ \leq \omega < 180^\circ)$ не должно быть много больше, чем $\frac{N}{2} + \sigma = \frac{N}{2} + \frac{N^{1/2}}{2}$.

Критерий можно считать статистически подтверждённым в случае, если измеренные отклонения превышают 3σ , т.е. при условии

$$R > \frac{0,5N + 1,5\sqrt{N}}{0,5N} = 1 + \frac{3}{\sqrt{N}}.$$

Для всех рассмотренных случаев и выборок этот критерий удовлетворяет наблюдениям. Например, для относительно недавних данных, приводимых Бэттенем, $R = 1,75$ (см. рис. 1). В то время как для числа исследованных систем $N = 110$, при учёте возможных флуктуаций величина R практически не может быть выше значения $1 + 3N^{-1/2} \approx 1,29$. Результаты сравнения аналогичных величин для распределений, построенных Фоксом и Бражниковой, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коэффициенты асимметрии распределений $N(\omega)$, построенных разными авторами

Автор	Измеренная асимметрия R	Общее число систем N	Допустимая асимметрия $1 + 3N^{-1/2}$
Барр [1]	6,5	30	1,55
Бэттен [4]	1,75	110	1,29
Фокс [3]	1,68	228	1,20
Бражникова [6]	1,55	245	1,19

2°. Второй критерий вытекает из того, что мнимый эксцентриситет $e' = \frac{\pi l K}{P c^2}$ растёт при увеличении

полуамплитуды лучевой скорости K и уменьшении орбитального периода P звезды, тогда как эффективная длина l порядка светового года должна слабо различаться для систем, расположенных на разных расстояниях r . Поэтому следует ожидать, что эффект Барра сильнее всего проявится для двойных звёзд с наивысшим отношением K/P . Этот критерий был впервые предложен Дж. Фоксом [3], который произвёл статистический анализ элементов двойных звёзд, приведённых в звёздных каталогах. Анализ показал, что у звёзд с отношением $K/P \geq 3$ (км/с)/сут наблюдается заметная асимметрия в распределении долгот периастров ω , т.е. эффект Барра ярко выражен, тогда как для $K/P < 3$ (км/с)/сут распределение по ω практически однородное. Похожий статистический анализ произвели отечественные астрономы [5, 14], которые показали, что эффект Барра заметно проявляется только у звёзд с орбитальными периодами $P \leq 30$ сут и практически отсутствует у звёзд с $P > 30$ сут. Такой же эффект обнаруживает современный анализ статистики двойных звёзд, например, по каталогу Sb9, где у звёзд с $P \leq 30$ сут тоже обнаруживается заметная асимметрия в распределении периастров с заметным преобладанием систем, для которых $0^\circ \leq \omega < 180^\circ$ [62]. Причём степень асимметрии R растёт при сокращении P , в полном согласии со вторым критерием. Таким образом, статистический анализ не только подтвердил реальность эффекта Барра, но и предоставил ряд свидетельств того, что эффект связан именно с искажением кривой лучевых скоростей за счёт баллистического принципа, поскольку подтвердился основной критерий, вытекающий из этого принципа.

В связи с наличием истинных эксцентриситетов интересно рассмотреть возражение Де Ситтера против трактовки эффекта Барра по баллистической теории. Де Ситтер отметил [20], что если бы у двойных звёзд возникал дополнительный эксцентриситет величины $e' = \frac{\pi l K}{P c^2}$, то в среднем наблюдаемый эксцентриситет был бы выше в системах с коротким периодом P . А в действительности наблюдается обратная зависимость, выявленная ещё Людендорфом и показывающая, что эксцентриситет растёт при увеличении периода P . Согласно Де Ситтеру, это свидетельствует против теории Ритца. Однако в действительности наблюдаемая корреляция между e и P отражает изменение истинного эксцентриситета e при увеличении периода P . Хорошо известно, что для тел с большими орбитальными периодами эксцентриситет в среднем должен быть выше, чем для тел с малыми орбитальными периодами, что связано с приливным трением, которое постепенно «скругляет» орбиты планет и звёзд. Причём приливной эффект, снижающий эксцентриситет, быстро растёт (пропорционально ρ^{-5}) при сокращении орбитального радиуса ρ и периода P . Поэтому для долгопериодических орбит мнимые эксцентриситеты e' полностью теряются на фоне истинных e . По той же причине у долгопериодических орбит ($P > 30$ сут) эффект Барра практически не обнаруживается [5, 14]. А для короткопериодических орбит ($P \leq 30$ сут) эффект Барра становится хорошо заметен, за счёт малости истинных эксцентриситетов e , на фоне которых мнимые эксцентриситеты $e' = \frac{\pi l K}{P c^2}$ (к тому же выросшие) становятся хорошо заметны и приводят к сильной асимметрии в распределении $N'(\omega)$.

Таким образом, эффект Барра удовлетворяет критерию зависимости мнимого эксцентриситета, выведенному из теории Ритца. Можно рассмотреть и ряд других критериев, многие из которых были предложены уже Д. Комстоком [63] для выявления аномалий формы звёздных орбит. Почти все они при современном анализе свидетельствуют в пользу баллистической природы искажений кривой лучевых скоростей. Сверх того, рассмотрим ещё несколько новых критериев.

3°. Третий критерий следует из того, что мнимый эксцентриситет $e' = \frac{\pi r K}{P c^2}$ пропорционален рас-

стоянию r до звезды. Поэтому для сравнительно близких звёзд с малым r ($< 10\text{--}20$ пк) мнимый эксцентриситет мал и асимметрия в распределении по долготам периастров должна отсутствовать. В то же время для далёких звёзд с большим r мнимый эксцентриситет и эффект Барра должны быть хорошо заметны. Впрочем, строгой пропорциональности эксцентриситета расстоянию не должно возникать, поскольку за счёт переизлучения на больших дистанциях $r \geq l$ эксцентриситет $e' = \frac{\pi l K}{P c^2}$ пропорционален

уже эффективному пути l и при $r \geq l$ перестаёт расти с увеличением расстояния r . Эффект Барра удовлетворяет и этому критерию, судя по выявленному для эффекта Барра широтному эффекту. Для звёзд, расположенных в высоких галактических широтах $|b| > 45^\circ$, эффект Барра практически отсутствует, тогда как для звёзд, расположенных недалеко от галактического экватора, с широтами $|b| \leq 45^\circ$, эффект Барра хорошо заметен [8]. Очевидно, это связано с тем, что звёзды, лежащие в высоких галактических широтах, расположены сравнительно близко к Земле: их расстояния r не превышают половины толщины галактического диска $h \sim 20$ пк (рис. 9), соответственно и эффект Барра для них малозаметен. А звёзды, распо-

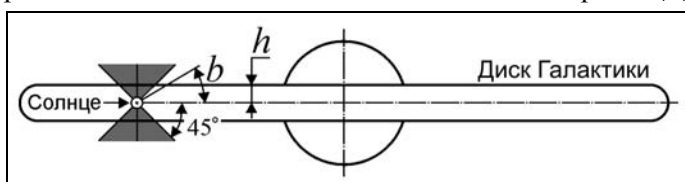


Рис. 9. Проявление в разной степени эффекта Барра в зависимости от галактической широты b двойных звёзд (область, где эффект Барра малозаметен, закрашена серым)

ложенные возле галактического экватора $|b| \approx 0^\circ$, находятся на расстояниях в сотни раз больших, а потому мнимые эксцентриситеты для них велики и эффект Барра существенен, в согласии с наблюдениями.

Поскольку искажения, вызывающие эффект Барра и мнимый эксцентриситет $e' = \frac{\pi l K}{P c^2}$, обычно пропорциональны не дистанции r , а эффективному пути l , в пределах которого свет ещё не успел полно-

стью переизлучиться, то эффект Барра должен быть наиболее заметен для звёзд, которые приближаются к Земле. Действительно, снижение эффективного пути вызвано интерференцией исходного излучения звезды со светом, рассеянным облаками газа, ведущей к погашению исходного излучения [3]. Такая интерференция возможна, когда рассеянное излучение движется со скоростью большей или практически равной скорости исходного. А свет от звезды, приближающейся с большой скоростью, имея скорость $(c - V_0)$, при лучевой скорости $V_0 < 0$ уже не сможет интерферировать с рассеянным светом, обгоняя его. Поэтому его скорость не будет снижаться (пока он не пересечёт облака газа, у которых лучевая скорость близка к V_0). При таком условии переизлучение практически отсутствует: $l \approx r$, а $k = l/r \approx 1$ в (1). А для $V_0 > 0$ переизлучение происходит на длине $l \sim 1$ св. года и $k = l/r \ll 1$, что делает эффект Барра не существенным. Действительно, статистический анализ, произведённый Бражниковой и другими, показал, что эффект Барра отчётливо наблюдается лишь у звёзд с $V_0 < 0$, а для звёзд с $V_0 > 0$ искажения оказываются существенно ниже, и эффект Барра отсутствует [8, 14]. Этим можно объяснить асимметрию кривой блеска у цефеид. Искажения графика лучевых ускорений $a_r(t)$ и мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$ отчётливо проявляются лишь на участке, где $V_r < 0$, что создаёт крутой участок спада $a_r(t)$ и $V_r^*(t)$, а также резкий рост яркости $W'(t)$ по эффекту Ритца (12) с более продолжительным её спадом, т.е. в нелинейном искажении графика $V_r^*(t)$ проявляются нелинейности высших порядков. Именно такой характер вариаций $V_r^*(t)$ и $W'(t)$ наблюдается у цефеид.

4°. Четвёртый критерий вытекает из пропорциональности мнимого эксцентриситета $e' = \pi l K / P c^2$ амплитуде лучевой скорости K . Соответственно, если компоненты двойной звезды движутся вокруг центра масс по круговым орбитам с разными орбитальными скоростями, то мнимый эксцентриситет будет выше у компонента с большей скоростью (и меньшей массой), на что обратил внимание П.С. Чикин [64] и С.А. Семиков [65]. Первому критерию, действительно, удовлетворяет ряд спектрально-двойных звёзд. Например, у звезды RX Кассиопеи кривые лучевых скоростей компонентов соответствуют разным эксцентриситетам, а лучевые скорости меняются не синхронно [4, 66]. Если у компонента спектрального класса G кривая лучевых скоростей соответствует почти круговой орбите с $e_1 \approx 0$ (пунктирная линия на рис. 10), то у компонента класса A кривая соответствует орбите с $e_2 \approx 0,18$, вытянутой к Земле (штрихпунктирная линия). Это противоречит небесной механике, согласно которой у компонентов двойной системы эксцентриситеты орбит должны совпадать, а кривые лучевых скоростей должны иметь зеркальный ход, так что V_{r1} и V_{r2} менялись бы в противофазе. Таким образом, в видимом движении звёзд наблюдается отклонение от законов Кеплера – иллюзорный эффект, предсказанный теорией Ритца [45]. Поскольку сомнительно, чтобы законы Кеплера нарушались, Бэттен [4] пришёл к выводу, что кривая лучевых скоростей второго компонента искажена по эффекту Барра. Причём у компонента A, с искажённым графиком скоростей, периастр в соответствии с эффектом Ритца оказывается расположен за картинной плоскостью ($\omega = 37^\circ$ [66]), удовлетво-

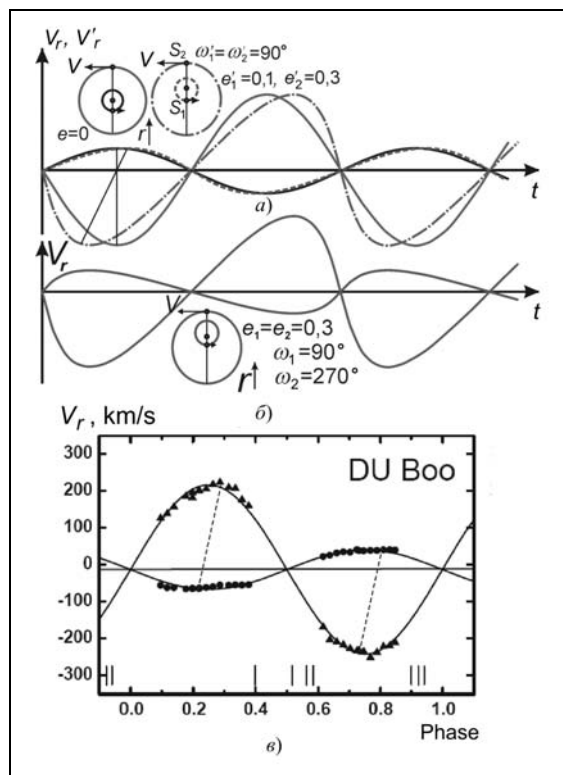


Рис. 10. Графики лучевых скоростей: *a* – схема искажений графиков $V_r(t)$ для круговых орбит (пунктирные и штрихпунктирные линии), отвечающих невозможному случаю, когда у орбит компонентов разные эксцентриситеты и равные долготы периастров; *b* – реальные графики лучевых скоростей $V_r(t)$ компонентов соответствуют орбитам равных эксцентриситетов $e_1 = e_2$ и противоположных долгот $\omega_1 = 180^\circ + \omega_2$ (сплошные линии); *в* – возможный пример подобного искажения, наблюдаемого у тесной двойной звезды DU Волопаса [67]

ряя первому критерию. Отметим, что у RX Кассиопеи обнаружены также колебания блеска, происходящие с орбитальным периодом P , что с позиций баллистической теории естественно объясняется эффектом Ритца (12), который меняет видимую яркость W' и должен быть замечен, судя по наличию искажений графика $V_r(t)$.

Подобный перекосяк графиков лучевых скоростей наблюдается и у переменной звезды DU Волопаса [67] (рис. 10), переменность блеска W' которой тоже может быть связана с эффектом Ритца (12), вызвавшим этот перекосяк. Подобный же перекосяк графиков лучевых скоростей компонентов в одну и ту же сторону наблюдается также у переменной звезды V701 Скорпиона, что однако связывают с приливным эффектом и неоднородным распределением яркости по поверхности звёзд. Аналогичный эффект несоответствия кривых лучевых скоростей компонентов открыт у переменной звезды BW Лисички, двойственность которой, согласно П.С. Чикину [64], как раз и объясняет по эффекту Ритца её переменность.

Он же показал, что перекосяк графиков лучевых скоростей при $e' = \frac{\pi l K}{P c^2} > 1$ приведёт к появлению разрывов на графиках $V_r'(t)$, появлению неоднозначности и перехлёсту ветвей графика $V_r'(t)$, типичному для ударных волн в нелинейных средах [46]. Как отмечалась, эта аномалия несоответствия графиков лучевых скоростей в корне противоречит другим объяснениям эффекта Барра – эффекту селекции, гипотезе Струве, галактической ориентации орбит и т.д.

Несоответствие может быть вызвано и тем, что смещения спектральных линий вызывает в основном эффект Ритца. В этом случае искажения также приводят к разной величине эксцентриситетов e' у компонентов ввиду различия длин переизлучения l . Кроме того, поскольку искажённая кривая лучевых ускорений (и мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$, см. рис. 6) соответствует кривой лучевых скоростей с постоянной добавкой лучевой скорости (24), эти добавки оказываются разными для компонентов, т.е. лучевая скорость центра масс V_0 системы, найденная по разным компонентам, получится разной. И такая аномалия реально наблюдается в виде эффекта Струве–Сахаде [4, 73], скажем, у звезды HD 190967 и АО Кассиопеи. Отчасти подобные аномалии можно объяснить и тем, что разные ускорения свободного падения a_r на поверхности и в атмосферах двух звёзд приводят к разным дополнительным красным смещениям у них, откуда и получают несопадающие оценки величины V_0 . Так, если скорость V_0 , найденная по кривой лучевых скоростей яркого компонента HD 190967, приблизительно нулевая, то у второго компонента $V_0 \sim 50$ км/с, т.е. спектр второго компонента как раз испытывает добавочное красное смещение.

5°. Пятый критерий следует из того, что мнимый эксцентриситет $e' = \frac{\pi l K}{P c^2}$ ведёт к дополнительному «вытягиванию» орбит обоих компонентов S_1 и S_2 в сторону Земли, т.е. в случае круговой орбиты долготы периастров, определённые из анализа искажённых кривых лучевых скоростей, будут совпадать: $\omega_1 = \omega_2 = 90^\circ$ (рис. 10). Тогда как в действительности у компонентов S_1 и S_2 с эллиптическими орбитами соответствующие значения ω_1 и ω_2 должны различаться на 180° , и для $\omega_2 = 90^\circ$ получим $\omega_1 = 180^\circ + \omega_2 = 270^\circ$. При наличии у орбит истинного эксцентриситета дополнительное вытягивание орбит в одну сторону приведёт к тому, что разность долгот периастров окажется меньше 180° , т.е. $0 \leq |\omega_1 - \omega_2| < 180^\circ$. Действительно, подобный эффект иногда наблюдается, например, в упомянутых системах DU Волопаса [67], V701 Скорпиона, BW Лисички [64]: у обоих компонентов перекосяк идёт в одну и ту же сторону, словно у обоих компонентов $0^\circ \leq \omega < 180^\circ$, т.е. $0^\circ \leq |\omega_1 - \omega_2| < 180^\circ$.

6°. Шестой критерий тоже следует из того, что переменность скорости света вызывает лишь видимое увеличение эксцентриситета, определённого из кривой лучевых скоростей. Поэтому, применяя другие методы, можно выявить это несоответствие. Так, у затменной звезды U Цефея по наблюдениям затмений и фотометрической кривой блеска расчётная величина $e \cos \omega$ близка к нулю, тогда как кривая лучевых скоростей показывает высокое значение $e \cos \omega$, достигающее 0,2–0,4 и, соответственно, высокий эксцентриситет e [4].

Причина этого может состоять в том, что орбита обладает истинным эксцентриситетом e , однако добавление скорости звезды к скорости света иногда приводит к компенсации асимметрии кривой затмений и нейтрализации эксцентриситета (по механизму, предложенному Кортвегом [20]), так что $e' = e + \Delta e = 0$. Однако на всём протяжении нейтрализовать асимметрию кривой лучевых скоростей (где больше точек) эффект Барра не может. Поэтому сохраняется остаточный эксцентриситет, который и выявляют по кривой лучевых скоростей. Либо орбита обладает истинным эксцентриситетом, но вытянута вдоль луча зрения \mathbf{r} ($\omega = 270^\circ$ или $\omega = 90^\circ$), отчего кривая блеска представляет собой чётную функцию. Однако эффект Ритца искажает кривую лучевых скоростей $V_r'(t)$ или создаёт мнимую кривую лучевых скоростей $V_r^*(t)$, которой соответствует $\omega' = 0^\circ$ или $\omega' = 180^\circ$ (см. рис. 8). Ряд звёзд с таким взаимным несоответствием кривых блеска и кривых лучевых скоростей упомянут в монографии Бэттена [4] и подробно исследован Саведовым [69]. К той же категории можно отнести и цефеиды, у которых, как давно открыто, кривые лучевых скоростей смещены на четверть периода по отношению к кривым блеска.

7°. Седьмой критерий был предложен Фрейндлихом [12], который показал, что искажённая кривая лучевых скоростей $V_r'(t)$ не вполне соответствует графику $V_r(t)$ для эллиптической орбиты, причём отклонения имеют вид гармоник с частотами, кратными основной частоте орбитального обращения. Этот критерий следует из того, что разница между приближёнными выражениями (3) и (7) для этих функций имеет вид гармоник основной частоты. Фактически этот критерий следует из разложения пилообразной кривой (3) в ряд Фурье. Видно, что по мере увеличения дистанции l и параметра $e' = \frac{\pi l K}{P c^2}$ нарастают

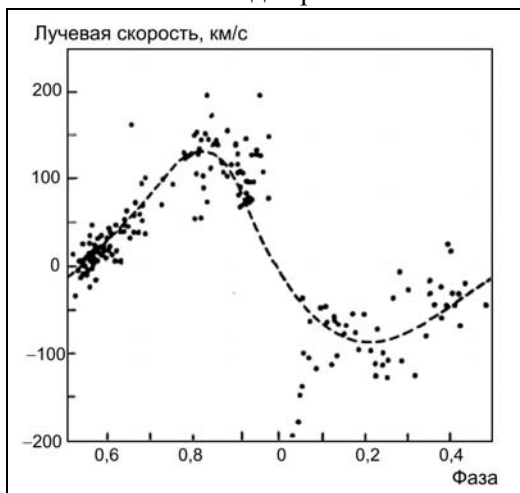


Рис. 11. Графическое представление кривой лучевых скоростей U Цефея [4] не соответствующей её кривой блеска, что говорит о нулевом значении $e \cos \omega$

отклонения от гармонического закона. Это во многом напоминает появление всё более высоких гармоник нарастающей амплитуды в клистроне, где тоже исходно однородное распределение электронов, по мере их движения, становится всё более неоднородным и асимметричным за счёт периодической модуляции скорости электронов [46]. Уже Фрейндлих отмечал, что подобные отклонения реально наблюдаются на графиках лучевых скоростей двойных звёзд [12], т.е. и этот критерий удовлетворяется. Так же и наблюдаемая кривая мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$, обусловленная эффектом Ритца (см. рис. 7 и 8), при больших эксцентриситетах e должна немного отличаться от классической $V_r(t)$. Как видно из сравнения выражений (7) и (23), отличие можно устранить путём внесения дополнительных гармоник – добавлением гипотетических планет соответствующих масс и кратных периодов.

8°. Восьмой критерий вытекает из того, что в зависимости от длины волны спектральной линии и от состава переизлучающих облаков газа меняется длина переизлучения – эффективная длина $l = \frac{\lambda}{2\pi(n-1)}$, на которой у лучей света набирается разность хода, а значит, растут искажения кривой лучевых скоростей, величины мнимых эксцентриситетов e' и амплитуд мнимых лучевых скоростей K' (19). Причём эффект переизлучения, как отмечалось, должен сильнее всего сказываться для частот f_{0i} абсорбционных и эмиссионных i -х линий элементов (26), по которым и определяют спектральное смещение. Поскольку возле этих резонансных частот f_{0i} показатель преломления n [21] стремительно нарастает по закону

$$n = \sqrt{1 + \sum_i \frac{N_i s_i}{f_{0i}^2 - f^2}}, \quad (28)$$

то для них длины переизлучения $l_i = \frac{\lambda_i}{2\pi(n-1)}$ и пропорциональные им искажения сильно снижены.

Причём все они снижены в разной степени, поскольку в межзвёздном газе различаются концентрации N_i атомов разных элементов, а также коэффициенты s_i , характеризующие заряды, массы и силы соответствующих осцилляторов. В итоге, искажения графиков лучевых скоростей, измеренных по разным линиям на частотах f_{0i} разных элементов, могут существенно различаться. Различия касаются не только расчётных величин эксцентриситета $e' = \frac{\pi l_i K}{P c^2}$ и долгот периастров ω' , но и полуамплитуды K' лучевой скорости, в случае если спектральные смещения отчасти обусловлены эффектом Ритца (11), (12), т.е. зависят от расстояния l_i , пройденного светом до момента переизлучения, а не только от кинематических характеристик звезды.

Этот критерий тоже подтверждается наблюдениями для ряда звёзд, как следует из монографии Бэттена [4]. Впервые на различие элементов орбит спектрально-двойных звёзд, измеренных в разных частотных диапазонах, обратил внимание А.А. Белопольский на примере звезды β Возничего [16]. Кроме того, на различие графиков лучевых скоростей, построенных по линиям разных элементов, ещё в 1949–1950 гг. обратили внимание Струве [70] и Мак-Намара [71]. Например, расчётные элементы орбит двойной звезды U Стрелы различались для кривых, построенных по линиям водорода и по линиям металлов. Аналогично, для АО Кассиопеи, по наблюдениям Абхинара [72], кривые лучевых скоростей, построенные по линиям водорода и гелия, различались и соответствовали разным амплитудам лучевых скоростей K . Искажение графиков лучевых скоростей для АО Кассиопеи подтверждается и тем, что для этой системы постоянные составляющие лучевой скорости V_0 компонентов не совпадают [4, 73]. Наконец, у рассмотренной системы RX Кассиопеи различие эксцентриситетов, рассчитанных по кривым лучевых скоростей разных компонентов, может быть обусловлено тем, что для линий одного компонента (класса G) переизлучение межзвёздным газом происходит намного раньше, отчего искажения и мнимый эксцентриситет оказываются намного меньше, чем у главного компонента (класса A). А вековые изменения состава и концентрации межзвёздного газа вдоль линии визирования RX Кассиопеи (например, за счёт движения межзвёздных облаков газа и вариаций степени их ионизации) могут объяснить, почему различаются элементы системы (K_1 , K_2 и e), определённые в разные эпохи, например, О. Струве [66] в 1944 г. и спустя 30 лет [74].

Таким образом, все рассмотренные критерии при сопоставлении с наблюдательными данными подтвердили, что эффект Барра обусловлен влиянием орбитальной скорости звёзд на скорость испущенного ими света, т.е. эффект Барра можно рассматривать как косвенное подтверждение баллистической теории и эффекта Ритца, тем более что ряд критериев и предсказаний теории Ритца был разработан задолго до их фактического подтверждения в космосе.

5. Эффект Барра и эффект Ритца как объяснение аномалий экзопланет

Для современной астрономии эффект Барра представляется особенно актуальным, поскольку позволяет объяснить ряд аномалий экзопланет, которые не удалось объяснить в рамках современной астрофизики и космогонии планетных систем. В частности, у большинства экзопланет открыты аномально высокие орбитальные эксцентриситеты, достигающие значений $e = 0,3–0,97$. Такие эксцентриситеты, во-первых, не типичны для планет Солнечной системы (где максимальным эксцентриситетом $e = 0,25$ обладает Плутон, из-за этого и его малой массы исключённый даже из числа планет), во-вторых, противоречат современным космогоническим теориям формирования планет из газопылевого протопланетного облака (гипотеза Шмидта). Кроме того, высокие эксцентриситеты нередко наблюдаются у короткопериодических экзопланет, очень близких к родительской звезде, т.е. в той области, где приливные эффекты, «скругляющие» орбиты, практически исключают существование планет с высокими орбитальными эксцентриситетами. Поэтому, если учесть, что элементы орбит планет определяют не напрямую, а по кривым лучевых скоростей звёзд, движущихся вокруг центра масс под влиянием тяготения планет, то есте-

ственно предположить, что наблюдаемые высокие эксцентриситеты тоже являются мнимыми, а не истинными, ввиду искажения графиков лучевых скоростей эффектом Барра, как в случае двойных звёзд.

В частности, для планет WASP-18b и WASP-33b, имеющих крайне малые орбитальные периоды $P \sim 1$ сут и расположенных столь близко к родительским звёздам, что даже незначительные эксцентриситеты для них исключены, предполагают, что кривые лучевых скоростей этих систем, соответствующие эксцентриситетам 0,01 и 0,174, действительно искажены, например приливыми эффектами [75]. По сути, для объяснения аномалии астрономы вновь обратились к первой гипотезе Барра. Не останавливаясь повторно на её недочётах, отметим, что подобные искажения сразу предсказываются баллистической теорией, поскольку полуамплитуда лучевой скорости в этих системах $K \sim 1$ км/с, а расстояния $r \sim 300$ св. лет, поэтому мнимые эксцентриситеты могут составлять заметную величину $\frac{\pi r K}{P c^2} \sim 1$. Таким

образом, даже если происходит снижение эффективного расстояния l в десятки раз по сравнению с r ($k = \frac{l}{r} \sim 0,01-0,1$), можно ожидать появления мнимого эксцентриситета $e' = \frac{\pi l K}{P c^2} = \frac{\pi k r K}{P c^2} \sim 0,01-0,1$, кото-

рый как раз и наблюдается. Причём графикам лучевых скоростей WASP-18b и WASP-33b соответствует как раз долгота периастра $\omega \approx 90^\circ$, в согласии с первым критерием баллистической теории, тогда как приливное искажение создавало бы более сложную картину с другим ω . Ещё заметней должно быть искажение для недавно открытой транзитной экзопланеты KOI-889 b, расположенной на расстоянии $r \sim 3000$ св. лет, обладающей орбитальным периодом $P \sim 9$ сут и полуамплитудой лучевой скорости $K \sim 1,3$ км/с [76], откуда $e' = \frac{\pi r K}{P c^2} \sim 15$, т.е. даже при снижении эффективного расстояния l в тридцать раз

по сравнению с r ($l \sim 100$ св. лет и $k = \frac{l}{r} \sim 0,03$), мнимый эксцентриситет вполне может составить наблюдаемую величину $e' = 0,57$, которая кажется аномально высокой для планеты со столь малым периодом и радиусом орбиты. Поэтому в данном случае, скорее всего, тоже наблюдается искажённая эффектом Барра кривая лучевых скоростей, о чём свидетельствует измеренная по графику $V'_r(t)$ долгота периастра $\omega \approx 63^\circ$, приближающаяся к теоретическому значению $\omega \sim 90^\circ$.

Действительно, если высокие эксцентриситеты экзопланет мнимые, а не истинные, тогда, подобно случаю двойных звёзд и согласно первому критерию, должно наблюдаться неоднородное распределение их расчётных орбит по долготам периастра $N(\omega)$, с заметным преобладанием орбит в диапазоне $0^\circ \leq \omega < 180^\circ$ и особенно возле значения $\omega = 90^\circ$. Это легко проверить, используя современные базы данных экзопланетных параметров. Так, база данных [77] содержит характеристики более 700 экзопланет с измеренными орбитальными элементами и с удобным интерфейсом для построения таблиц, графиков и диаграмм.

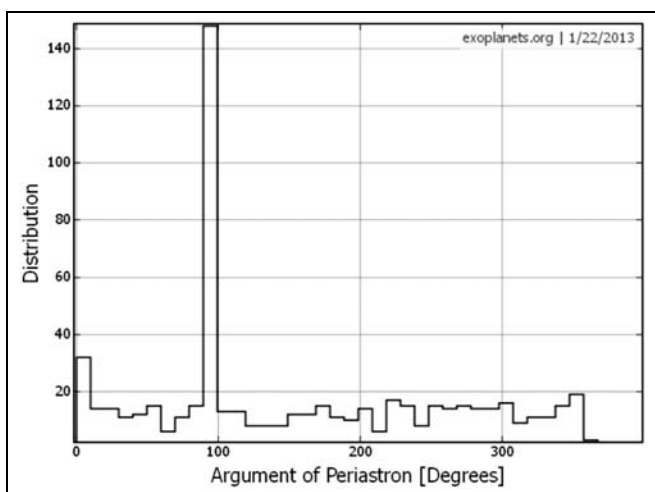


Рис. 12. График распределения экзопланет по долготам периастра ω

Гистограмма $N(\omega)$, построенная на её основе, действительно, содержит ярко выраженный максимум при значении $\omega = 90^\circ$ (рис. 12), что соответствует предсказанию баллистической теории и 1-му критерию эффекта Барра. Однако эти данные содержат высокий процент экзопланет, выявленных методом транзитов, для которых измеренная величина $\cos \omega = 0$ не обязательно свидетельствует о том, что $\omega = 90^\circ$, но может также быть следствием малости эксцентриситета $e \ll 1$.

Поэтому более надёжной представляется проверка по второму критерию, который в случае $e' = \frac{\pi r K}{P c^2}$ выявляет неоднородность в распределении $N(\omega)$ лишь при значении K/P выше критического, т.е. у планет с самыми короткими периодами P и высокими орбитальными скоростями K , обла-

дающих к тому же самыми низкими истинными эксцентриситетами e . Кроме того, для статистического анализа следует отобрать лишь планеты, выявляемые методом лучевых скоростей и обладающие ненулевым эксцентриситетом $e > 0,01$ (для уверенного определения долготы периастра ω). Подобный статистический анализ, проводимый в разных диапазонах параметра K/P , действительно, выявляет характерную критическую величину $K/P \sim 3$ (м/с)/сут, выше и ниже которой распределения $N(\omega)$ существенно различаются (рис. 13).

Если для $K/P < 3$ (м/с)/сут распределение $N(\omega)$ – статистически однородное (в пределах трёх стандартных ошибок 3σ), то для $K/P \geq 3$ (м/с)/сут распределение $N(\omega)$ становится резко неоднородным, с заметным преобладанием орбит с $0^\circ \leq \omega < 180^\circ$ ($R > 1$). Также видно, что периастры начинают концентрироваться возле значения $\omega = 180^\circ$, что может быть следствием искажения кривой мнимых лучевых скоростей по эффекту Ритца (см. рис. 6). Однако, как отмечено в п. 3, максимальная величина мнимых эксцентриситетов для $\omega = 180^\circ$ ограничена при этом величиной $e' \sim 0,5$. Поэтому более высокие эксцентриситеты в области $\omega \sim 180^\circ$ следует объяснить тем, что даже в отсутствие искажений наблюдается мнимая кривая лучевых скоростей и действительные эксцентриситеты в два раза меньше расчётных (см. рис. 8).

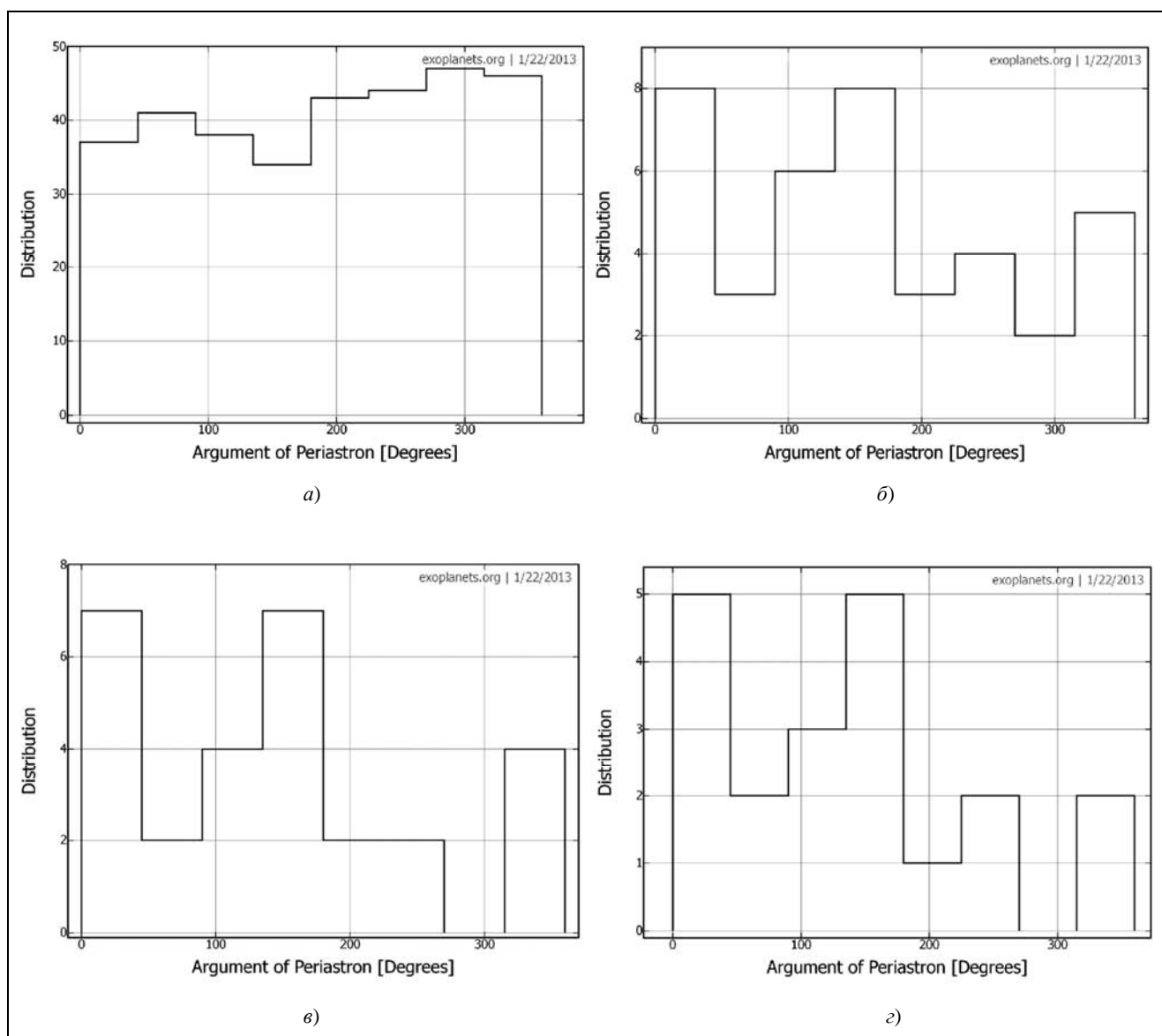


Рис. 13. Диаграммы $N(\omega)$ экзопланет для разных диапазонов K/P : $a - K/P < 3$ (м/с)/сут, $N = 330$, $1 + 3N^{-1/2} = 1,17$, $R = 0,83$; $b - K/P \geq 3$ (м/с)/сут, $N = 39$, $1 + 3N^{-1/2} = 1,48$, $R = 1,78$; $v - K/P \geq 5$ (м/с)/сут, $N = 28$, $1 + 3N^{-1/2} = 1,57$, $R = 2,5$; $z - K/P \geq 12$ (м/с)/сут, $N = 20$, $1 + 3N^{-1/2} = 1,67$, $R = 3,0$

Суммарное искажение графика лучевых скоростей и мнимых лучевых скоростей (27) создаёт иллюзию того, что у орбиты долгота периастра лежит в диапазоне $90^\circ \leq \omega < 180^\circ$. Яркий пример подобного искажения показывает планета HD 17156 b [78], у которой долгота периастра $\omega = 122^\circ$, а эксцентриситет $e = 0,68$ вряд ли может быть действительным, учитывая близость планеты к звезде и её короткий орбитальный период $P = 21,2$ сут. Таким образом, наблюдаемая кривая лучевых скоростей представляет собой промежуточный вариант – сумму кривых $V_r'(t)$ и $V_r^*(t)$, изображённых на рис. 4 и 6, искажённых по эффекту Ритца (27). Если учесть, что родительская звезда находится на расстоянии $r = 240$ св. лет = $2,3 \cdot 10^{18}$ м и амплитуда её лучевой скорости составляет $K = 280$ м/с, то мнимый эксцентриситет составит величину $e' = \frac{\pi r K}{P c^2} \sim 0,01$ или выше, если действительное расстояние r больше указанного.

Степень асимметрии R стремительно нарастает по мере роста K/P , так что число орбит, «вытянутых» в сторону Земли, в три и более раз превосходит число орбит, вытянутых в обратную сторону ($R > 3$). Такое отношение R намного превышает возможные статистические ошибки и вероятные флуктуации и не может отражать реального распределения орбит планет по направлениям. Таким образом, аномалии орбит экзопланет удовлетворяют 2°-му критерию. Это доказывает, что наблюдаются искажённые кривые лучевых скоростей, а истинные орбитальные эксцентриситеты заметно ниже расчётных, по крайней мере, для короткопериодических планет. С одной стороны, это объясняет аномалии орбит экзопланет, а с другой – подтверждает эффект Барра у экзопланет и его интерпретацию в рамках баллистической теории.

Отметим, что критический параметр $K/P = 3$ (м/с)/сут для экзопланет в тысячу раз ниже, чем аналогичный параметр $K/P = 3$ (км/с)/сут для звёзд. Истинный эксцентриситет, как отмечено, растёт при увеличении периода P и у звёзд, и у экзопланет. Поэтому причина, видимо, в том, что при том же периоде и радиусе орбиты амплитуда лучевой скорости K звезды получается заметно ниже в случае экзопланет, чем в случае двойных звёзд. Действительно, массы экзопланет в тысячи раз ниже массы звёзд. Соответственно, их возмущающее воздействие слабее. Поэтому при одном и том же параметре K/P и одинаковом мнимом эксцентриситете e' у экзопланет период P и истинный эксцентриситет e будут заметно меньше, чем у звёзд. Это и позволяет мнимому эксцентриситету проявиться на фоне истинного эксцентриситета при тысячекратно меньших значениях K/P у экзопланет, чем у двойных звёзд.

Если построить распределения $N(\omega)$ для разных параметров rK/P , т.е. учесть ещё и расстояния звёзд с экзопланетами, то асимметрия и эффект Барра усилятся, т.е. подтверждается третий критерий, говорящий о зависимости эффекта Барра от расстояния, хотя эта зависимость менее явная ввиду эффекта переизлучения, из-за которого по мере роста r эффективная дистанция нарастает всё медленней, достигая величины l . Критерий, при котором должен проявиться мнимый эксцентриситет, должен иметь вид

$$e' = \frac{\pi r K}{P c^2} \sim 0,1 - 1. \quad (29)$$

Для экзопланет, у которых условие $\frac{\pi r K}{P c^2} \sim 1$ выполняется, можно предполагать, что избыточный эксцентриситет – мнимый и вызван искажением графиков лучевых скоростей.

Кроме того, 3°-й критерий удовлетворяется, поскольку такие мнимые и избыточные эксцентриситеты, так же как эффект Барра, наблюдаются в основном для экзопланет в звёздных системах с лучевой скоростью родительской звезды $V_0 < 0$, поскольку для них переизлучение в основном отсутствует ($k \approx 1$). Так, в рассмотренных выше случаях аномально высоких эксцентриситетов у WASP-33b скорость центра масс $V_0 = -6$ км/с, у KOI-889 b – $V_0 = -60$ км/с [76], тогда как у систем с положительной лучевой скоростью $V_0 \geq 0$ эффект Барра и избыточные эксцентриситеты малы, либо отсутствуют ввиду быстрого переизлучения света в межзвёздном газе. Например, у WASP-18b при $V_0 = 3$ км/с переизлучение должно быть эффективным ($k \ll 1$), отчего мал избыточный эксцентриситет $e = 0,01$, что при мнимом эксцентриситете $e' = 1$ говорит о величине $k = l/r = 0,01$. При дистанции звезды $r = 326$ св. лет это соответствует длине переизлучения $l = 4$ св. года, что хорошо соотносится с оценкой Фокса [3]. Аналогично, у планеты KOI-200 b скорость центра масс $V_0 = 19$ км/с [76], т.е. переизлучение велико и наблюдаемый эксцентри-

ситет $e = 0,29$, видимо, истинный, тем более что он близок к эксцентриситету Меркурия $e = 0,2$ как ближайшей к Солнцу планеты.

Также открыты аномальные экзопланеты, удовлетворяющие 6° -му критерию. Так, у экзопланеты Ипсилон Андромеды b с орбитальным периодом $P = 4,6$ суток, на основании орбитальных элементов, измеренных спектральным методом, полагали, что синусоидальные колебания блеска экзопланеты, вызванные изменением её фазы и размера видимой освещённой части в ходе орбитального движения, дадут максимум блеска в фазе 0, когда лучевая скорость звезды равна нулю. Реально же фотометрические измерения телескопа «Спитцер» показали, что максимум блеска фиксируют на четверть периода раньше, при минимуме лучевой скорости звезды [79]. Это означает, что колебания блеска обусловлены не изменением фазы и освещённой части планеты у Андромеды b, а колебаниями видимой яркости W' у самой звезды у Андромеды по эффекту Ритца (12) под влиянием ускорения a_r , сообщаемого планетой звезде [80]. Также и сдвиг линий у Андромеды вызван в основном эффектом Ритца, а не Доплера, и наблюдается кривая мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$.

Именно при таком условии спектроскопическая кривая $V_r^*(t)$ будет сдвинута по фазе относительно теоретической $V_r(t)$ на значение $\varphi = \arctg\left(\frac{2\pi l}{Pc}\right) = \frac{\pi}{2}$. Поскольку измеренные спектральные смещения звезды соответствуют колебаниям a_r и $V_r^* = \frac{la_r}{c}$, а не реальной её скорости V_r , то истинная орбитальная скорость V может быть заметно ниже (см. рис. 5). В итоге, много меньше может быть и масса планеты, вызывающая возмущения, колебания звезды возле центра масс. Таким образом, многие аномальные экзопланеты могут оказаться не газовыми гигантами, а планетами типа Меркурия или даже астероидами. А астероиды, например в Солнечной системе, в отличие от планет, часто обладают очень тесными и сильно эксцентричными орбитами с периодом в несколько суток (для таких малых планет эффект приливного скругления орбит отсутствует, так как из-за малой массы они практически не вызывают приливов в атмосфере родительской звезды). Поскольку в данном случае эффект Ритца велик, то и колебания яркости W' , вообще говоря, могут быть вызваны не изменением фазы планеты, а вариациями яркости по эффекту Ритца (12) [9, 24, 50, 80].

Ряд статистических доказательств того, что у «горячих юпитеров» спектральные смещения вызваны в основном не эффектом Доплера, а эффектом Ритца, существенно преобразующим расчётные элементы орбит, привёл сотрудник ГАИШ проф. МГУ Б.Р. Мушаилов и В.С. Теплицкая [81, 82]. Например, раз амплитуда колебаний спектральных линий и расчётной скорости $V_r^* = ra_r/c$ пропорциональна расстоянию r , то обнаружение планет методом лучевых скоростей упрощается при увеличении их дистанции r , что подтверждает статистика открытых экзопланет [82]. Б.Р. Мушаилов и В.С. Теплицкая предложили проверить это, сопоставляя параметры и элементы орбит экзопланет, определённые разными методами. В частности, если у планет, открытых транзитным методом, известна кривая лучевых скоростей, тогда в случае её искажения наблюдаемые моменты, фазы транзита не должны совпадать с ожидаемыми на основе графика лучевых скоростей, что действительно наблюдается у ряда экзопланет. Например, у вышеупомянутой планеты KOI-889 b, у которой с большой вероятностью наблюдается искажение кривой лучевых скоростей по эффекту Барра, транзит ($\varphi = 0$) должен наблюдаться, согласно расчётам, при почти нулевой скорости V_r звезды. Реально же на графике лучевых скоростей фаза $\varphi = 0$ соответствует довольно высокой переменной составляющей скорости $V_r \sim 100$ м/с [76]. Примером экзопланеты, у которой спектральные смещения вызваны в основном эффектом Ритца, может служить HD 74156 b, обладающая периодом $P = 51$ сут и аномально высоким эксцентриситетом $e = 0,63$ (см. рис. 8). Вероятнее всего, наблюдается кривая мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$, о чём свидетельствует не только высокий расчётный эксцентриситет, но и едва заметные вторичные минимумы на кривой $V_r^*(t)$. Тогда действительная орбита имеет в два раза меньший эксцентриситет $e \approx 0,3$, близкий к эксцентриситету Меркурия, радиус орбиты и период P которого того же порядка.

Кроме того, аномалии орбит экзопланет удовлетворяют 7^о-му критерию. Во многих случаях наблюдаемая кривая лучевых скоростей плохо соответствует теоретическим графикам лучевых скоростей расчётной орбиты большого эксцентриситета [83]. Причём отклонения от теоретической кривой как раз имеют вид гармоник орбитального периода, согласно предсказаниям Фрейндлиха [12]. В связи с этим ряд кривых лучевых скоростей предлагают интерпретировать как вызванные не одной планетой, а двумя, имеющими кратные орбитальные периоды и находящимися в орбитальном резонансе 1:2 [83, 84]. Фактически такое искусственное введение всё новых экзопланет представляет собой результат разложения кривой лучевых скоростей в ряд Фурье, т.е. представление периодической функции $V_r(t)$ в виде суммы гармоник основной частоты.

Именно так выявляют новые планеты в звёздных системах, производя фурье-преобразование кривой лучевых скоростей, или отклонений от теоретической кривой лучевых скоростей $V_r(t)$. На полученной периодограмме – диаграмме спектральной плотности мощности отклонений – пики при определённых периодах (или частотах) считают соответствующими реальным планетам с этими орбитальными периодами (или частотами). Однако таким искусственным способом можно описать кривую лучевых скоростей произвольной формы, посредством введения достаточного числа гармоник. По сути, это – современное развитие подхода Птолемея, верно описавшего движения планет по небосводу на основе ошибочной геоцентрической модели, взяв достаточно много гармоник, круговых движений (небесных сфер с кратными периодами). Так, в случае планеты Gliese 876 кривую лучевых скоростей описали как результат воздействия трех планет, находящихся в орбитальном резонансе с отношением периодов 1:2:4. Если для спутников планет столь точный резонанс вполне вероятен ввиду близости спутников друг к другу и к планете (в таком же резонансе 1:2:4 находятся три галилеевых спутника Юпитера – Ио, Европа, Ганимед), то для планет он наблюдался бы крайне редко. Однако, согласно анализу [84], в орбитальном резонансе 1:2 оказывается около половины исследованных планет, вопреки всем вероятностным прогнозам и моделям формирования планетных систем. В то же время интерпретация графиков лучевых скоростей по эффекту Барра и эффекту Ритца позволяет в большинстве случаев объяснить все аномалии кривых лучевых скоростей посредством одной, наиболее массивной планеты, движущейся по круговой орбите [9, 45]. Причём, как легко видеть из выражения (3), искажённая кривая лучевых скоростей, действительно, ближе к сумме двух синусоид с отношением периодов 1:2, чем кривая лучевых скоростей $V_r(t)$ эллиптической орбиты (7), для которой отклонение от суммы двух синусоид, возникающее во втором порядке малости e^2 , имеет более высокую величину.

Ещё одна аномалия экзопланет – открытие массивных планет-гигантов, расположенных очень близко к родительской звезде и обладающих аномально высокими эксцентриситетами $e > 0,1$, практически невозможными для наблюдаемых коротких периодов, соответствующих радиусам орбит в сотые доли $a.e$. Таким расстояниям соответствуют очень высокие температуры на поверхности планеты, что вело бы к быстрому испарению планет, представляющих собой, по-видимому, газовые гиганты (из-за этого такие планеты и получили название «горячие юпитеры»). Столь же сомнительно существование близких к родительской звезде массивных планет, тоже открытых при измерении лучевых скоростей (методом тайминга) в системах сравнительно молодых пульсаров, считающихся остатками взрывов сверхновых, которые неизбежно уничтожили бы близлежащие планеты, а новые планеты не успели бы сформироваться. Если же регистрируют кривую мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$, то, вполне возможно, что наблюдаемая амплитуда лучевых скоростей K' (19) сильно завышена по сравнению с истинной K , если сдвиг спектральных линий обусловлен в основном эффектом Ритца, а не Доплера [9]. Это привело бы к завышению масс планет на порядки, поскольку лучевая скорость звезды пропорциональна возмущающему воздействию, силе тяготения планеты, т.е. её массе. Таким образом, реальные массы планет могут быть намного ниже и приближаться к массе астероидов и комет, которые при своей невысокой массе почти не создают приливных горбов в атмосфере звезды и не испытывают приливного скругления орбит [80]. Такие малые планеты, подобно кометам и астероидам, подходящим близко к Солнцу, вполне могут обладать высокими эксцентриситетами.

Также не исключено, что истинные орбитальные периоды P экзопланет в некоторых случаях заметно длиннее наблюдаемых. Например, при движении планетной системы с критическим лучевым ускоре-

нием $a_r \approx -\frac{c^2}{r}$ (которое для космических дистанций r даёт умеренную величину, типичную для звёзд),

эффект Ритца (11) способен привести к сжатию видимого периода движения планет $P' = P \left(1 + \frac{ra_r}{c^2} \right)$ до

почти нулевого. Сходный эффект сжатия видимых периодов обращения наблюдается у спутников Юпитера, периоды которых, как открыл ещё Рёмер, за счёт эффекта Доплера бывают на минуты короче истинных, ввиду относительного движения Юпитера и Земли. Эффект Ритца (11) способен сокращать видимые периоды обращения планет намного сильнее. Этим можно объяснить открытие большого числа планет с нетипичными орбитальными периодами порядка суток и короче, и радиусами орбит порядка сотой доли *a.e.*, тогда как истинные периоды обращения и большие полуоси орбит планет в системах звёзд и пульсаров могут быть намного длиннее [80].

В запредельном случае, когда $a_r < -c^2/r$ и $P' < 0$, покажется, что видимый порядок событий стал обратным, и видимое движение звёзд и планет покажется происходящим в обратном направлении – эффект, предсказанный по баллистической теории Д.Ф. Комстоком ещё в 1910 г. [18]. Это позволяет объяснить открытые в последние годы экзопланеты с обратным орбитальным вращением, например WASP-33b и HAT-P-7b, противоречащие теориям формирования планетных систем [9, 45]. Обратное, ретроградное вращение тоже выявляют путём анализа графиков лучевых скоростей – по аномальному эффекту Росситера–МакЛафлина. Действительное движение таких экзопланет вполне может быть прямым, но будет представляться обратным за счёт эффекта Ритца, меняющего видимый порядок событий при $a_r < -c^2/r$ и $P' < 0$, поэтому в выражении (11) $dt' < 0$ [9].

Изменение периодов экзопланет по эффекту Ритца приводит также к неверным оценкам масс и размеров экзопланет. Действительно, изменение видимых периодов и длительности транзитов экзопланет (времени прохождения планеты по диску звезды) приведёт к тому, что при известной массе и радиусе звезды оценки радиуса R планеты покажут завышенную или заниженную величину. Подобный эффект аномальных значений радиусов экзопланет, противоречащих теориям формирования планетных систем и физически допустимым характеристикам, реально обнаружен [85, 86]. Также изменение орбитального периода P' и спектральные смещения по эффекту Ритца приведут к ошибочному измерению массы m экзопланет. По отдельности и в совокупности эти ошибки приводят к неверному измерению плотности экзопланет $d = \frac{3m}{4\pi R^3}$. Действительно, открыты экзопланеты с аномально высокой плотностью

(выше, чем у золота: например, $d \approx 25$ г/см³ у COROT-3b) и аномально низкой плотностью (ниже, чем у пенопласта: например, $d \approx 0,1$ г/см³ у WASP-17b), объяснить природу которых пока не удаётся. С точки зрения баллистической теории эти плотности иллюзорны, и истинные плотности отличаются от измеренных на порядок [9, 80], поэтому плотность всех экзопланет сопоставима с плотностью Земли и других планет Солнечной системы.

У планет с $K/P \geq 3$ (м/с)/сут эксцентриситеты в основном мнимые, т.е. сильно завышены по сравнению с реальными. Напротив, для планет с $K/P < 3$ (м/с)/сут, для которых эффект Барра выражен слабо, расчётные эксцентриситеты должны быть близки к истинным. Они у планет с длительными периодами P , действительно, могут достигать высоких значений, как показывает пример Плутона. В таких случаях отсутствие связи измеренного эксцентриситета с искажением графика лучевых скоростей от запаздывания света подтверждается тем, что для экзопланет из этого ряда распределение $N(\omega)$ – сравнительно однородное, и для многих из них $180^\circ \leq \omega < 360^\circ$. Однако в этом случае тоже возможно искажение кривых лучевых скоростей, но иными механизмами. Так, если сдвиг частоты вызван в основном эффектом Ритца, а не эффектом Доплера, т.е. снятый график спектральных смещений отражает колебания лучевого ускорения, а не лучевой скорости, то это приведёт к завышению расчётного эксцентриситета в два раза (см. рис. 7 и 8). Таким образом, у экзопланет с большими периодами обращения P истинные эксцентриситеты могут быть в два раза ниже, что лучше согласуется с теориями формирования планетных систем и с эксцентриситетами планет Солнечной системы.

Кроме того, если у планет с круговой орбитой спектральные смещения обусловлены в основном эффектом Ритца, то искажение кривой спектральных смещений может приводить к концентрации пе-

риастров не только возле $\omega = 180^\circ$ (см. рис. 6), но и возле значения $\omega = 0^\circ$, когда эффект Ритца сжимает период до значения $P' < 0$, и видимый порядок событий становится обратным. Тогда запаздывание света из положения 1 и опережение из положения 3 (рис. 14) приводит к обратному искажению графика $V_r^*(t)$, которому соответствует $\omega = 0^\circ$, что реально наблюдается у ряда звёзд и планет (см. рис. 1 и 13).

Также мнимый эксцентриситет может быть вызван приливными искажениями или даже преимущественной ориентацией орбит планет, приводящей к концентрации периастров возле значений $\omega = 270^\circ$. Этим можно объяснить, почему для отдельных выборок звёзд эффект Барра имеет обратный знак, то есть периастры в таких выборках чаще располагаются перед картинной плоскостью, а не позади неё [8]. Подобное группирование долгот периастров возле значения $\omega = 270^\circ$ возможно также в случае обычного искажения кривых лучевых скоростей, приводящего к группированию долгот периастров возле значения $\omega = 90^\circ$ (см. рис. 2). Однако, если за счёт общего движения звёздной системы с ускорением $a_r < -c^2/r$ происходит обращение видимого порядка событий (что, как отмечено, может объяснить сверхкороткие периоды экзопланет и их «ретроградное» движение), то в этом случае кривая лучевых скоростей получает обратное искажение, соответствующее $\omega = 270^\circ$ (рис. 15). Подобные графики лучевых скоростей реально наблюдаются у экзопланет, открытых транзитным методом, например у WASP-8b, WASP-117b, Kepler 78b, у которых при их коротких периодах аномально высокий $e \approx 0,3$, а долготы периастра близки к значению $\omega = 270^\circ$ [87–89]. Причём у WASP-8b движение по орбите как раз обратное [87], что может свидетельствовать об изменении нормального порядка событий. Отметим, что для этих планет выполняется критерий (29), т.е. характеристики экзопланет допускают, что наблюдаемый эксцентриситет – мнимый.

Также для планет с большими периодами искажения могут быть вызваны космической дисперсией света, впервые основательно изученной А.А. Белопольским и его учеником Г.А. Тиховым [16, 90–92]. Этот эффект, открытый ещё в 1908 г. у затменных звёзд в виде запаздывания затмений в коротковолновой части спектра, был назван эффектом Тихова–Нордмана – по имени русского астронома Г.А. Тихова и французского астронома Ш. Нордмана, независимо открывших эффект. Хотя в 1917 г. Х. Шепли привёл ряд теоретических возражений против возможности космической дисперсии, более поздние наблюдения подтвердили существование эффекта Тихова–Нордмана, причём во всех диапазонах электромагнитных волн [93, 94].

Разреженный межзвёздный газ обладает показателем преломления, предельно близким к единице. Но на больших дистанциях он способен вызвать заметное запаздывание высокочастотного излучения по отношению к низкочастотному (именно на этом явлении основана методика определения расстояний до пульсаров – по сравнению времени запаздывания импульсов пульсара в разных диапазонах [27]). В итоге, когда звезда удаляется, и её спектральные линии смещены в длинноволновую область, они будут наблюдаться чуть раньше, а когда звезда приближается, и её линии смещены в коротковолновую область, они будут наблюдаться чуть позже. Это тоже приведёт к ис-

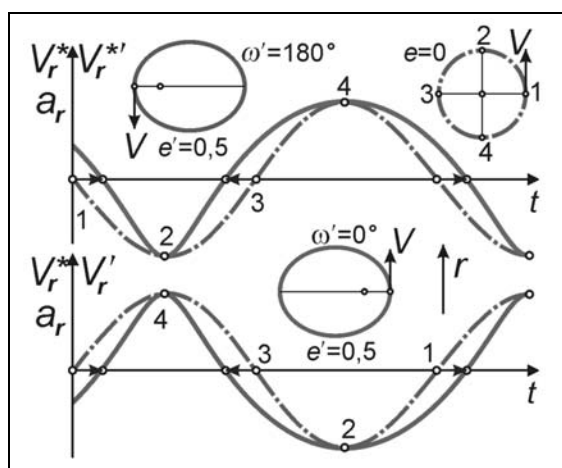


Рис. 14. Графики лучевых ускорений и мнимых лучевых скоростей $V_r^*(t)$ для круговой орбиты (штрихпунктирная линия) и искажённый по эффекту Ритца график лучевых скоростей $V_r^*(t)$ с соответствующей орбитой (сплошная линия) для прямого порядка событий (вверху) и для обращённого по эффекту Ритца (внизу)

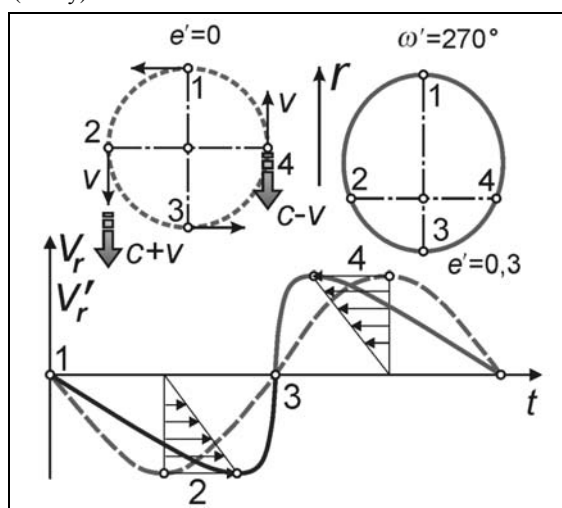


Рис. 15. Искажение графика лучевых скоростей $V_r'(t)$ при учёте дисперсии межзвёздного газа и рассчитанной по нему орбиты (сплошная линия) по сравнению с действительным графиком лучевых скоростей $V_r(t)$ (пунктирная линия)

кажению кривой лучевых скоростей, но обратному тому, которое наблюдалось в эффекте Барра. Наблюдаемые искажённые кривые лучевых скоростей (рис. 15) будут соответствовать орбитам, вытянутым в сторону от Земли ($\omega = 270^\circ$).

Кроме того, баллистическая теория допускает существование дисперсии света даже в космическом пространстве, свободном от межзвёздного газа, т.е. в вакууме [94, 95]. В этом случае знак дисперсии будет обратным. Соответственно, искажения будут носить обратный характер, т.е. приводить к концентрации периастров возле значений $\omega = 90^\circ$, как в случае обычного эффекта Ритца (см. рис. 2).

Рассмотренное выше позволяет объяснить аномально высокие эксцентриситеты орбит экзопланет во всём диапазоне значений $0^\circ \leq \omega < 360^\circ$. В этом случае искажения тоже будут пропорциональны K/P . Кроме того, они будут пропорциональны расстоянию r до звезды, поскольку из-за дисперсии разница скоростей сохраняется на всём пути света от звезды к Земле. Эта зависимость, действительно, подтверждается. Отметим, что существование дисперсии света в космическом пространстве, свободном от межзвёздного газа, в вакууме тоже связывают с передачей собственной орбитальной скорости излучающих атомов или электронов – свету [45, 94, 95]. И ряд свидетельств подтверждает этот эффект во всём диапазоне электромагнитных волн [93].

Таким образом, ряд аномалий экзопланет получает простое качественное и количественное объяснение на базе эффекта Барра и баллистической теории. А интерпретация некоторых параметров и аномалий экзопланет, как реально имеющих место, противоречит не только теориям формирования планетных систем и законам небесной механики, но и принципу Коперника, отрицающему исключительные характеристики Солнечной системы, включая преимущественную ориентацию орбит в её направлении. Обнаружение такой исключительности Земли и Солнечной системы приводит зачастую к рецидиву идей геоцентризма [96], чуждых современной астрономии и астрофизике [2].

- Поскольку распространение света звёзд происходит в космическом вакууме, астрономы, как правило, пренебрегают возможностью искажения световых сигналов, идущих от звёзд. С одной стороны, это намного облегчает анализ таких сигналов, по сравнению, например, с анализом радиосигналов и лазерных импульсов, распространяющихся в земной атмосфере и других средах, которые за счёт нелинейности, дисперсии и поглощения нередко меняют временную структуру и спектр сигнала до неузнаваемости. С другой стороны, неучёт таких искажений в астрономических наблюдениях может приводить к ряду наблюдаемых аномалий, не поддающихся объяснению в рамках принятых теорий. Проведённый выше анализ показал, что ряд особенностей эффекта Барра у двойных звёзд и экзопланет, не может быть интерпретирован в рамках гипотезы о галактической ориентации орбит или эффекта селекции. Имеет место искажение графиков лучевых скоростей, причём это искажение в большинстве случаев не может быть связано ни с приливными эффектами, ни с возможным присутствием газовых потоков вокруг звёзд. Единственная гипотеза, которая объясняет все особенности эффекта Барра, и критерии которой удовлетворяют наблюдениям, состоит в предположении об изменении скорости света от звёзд под влиянием их орбитальной скорости, сообщаемой свету.

Как было показано, все возможные причины искажений кривой лучевых скоростей, эффекта Барра и мнимого нарастания эксцентриситета орбит связаны с непостоянством, неравенством скоростей света, испущенного звездой в разные моменты времени или на разных длинах волн. Приведём итоговый перечень этих основных причин:

- 1) искажение графика лучевых скоростей от сообщения свету орбитальной скорости;
- 2) дополнительные смещения спектров от эффекта Ритца;
- 3) космическая дисперсия скорости света.

Обработка наблюдательных данных с учётом критериев таких искажений, при сопоставлении данных разных методов наблюдений, позволит выделять мнимую часть эксцентриситета и рассчитывать истинное движение и орбитальные элементы звёзд и экзопланет для получения адекватной картины явлений, построения теории их движения, космогонии и эволюции на основе более строгих и достоверных данных. Таким образом, дальнейшее изучение и проверка эффекта Барра и эффекта Ритца у звёзд и экзопланет позволит не только выяснить истинные характеристики звёздных систем, но и точно установить законы движения света в космическом пространстве, важные для

других областей астрофизики и для всех видов астрономических наблюдений. Кроме того, эффект Барра и эффект Ритца позволяют объяснить ряд аномалий в наблюдениях звёзд и экзопланет, особенно из числа открытых в последние годы.

Автор выражает признательность за обсуждение, советы и критические замечания профессорам ННГУ М.И. Бакунову и Н.С. Степанову, а также сотруднику ГАИШ М.А. Абубекерову.

Работа выполнена в рамках программы развития «ННГУ – НИУ». Результаты работы были доложены 7 августа 2014 г. на 36-х Научно-футурологических чтениях памяти А.С. Попова, посвящённых дню ВМФ России.

Литература:

1. *Barr J.M.* The orbits and «velocity curves» of spectroscopic binaries // *J. Roy. Astron. Soc. of Canada.* 1908. V. 2. P. 70–75.
2. *Batten A.H.* The Barr Effect // *J. Roy. Astron. Soc. of Canada.* 1983. V. 77. № 2. P. 95–97.
3. *Fox J.G.* Evidence Against Emission Theories // *Am. J. Phys.* 1965. V. 33. P. 1–17.
4. *Бэттен А.* Двойные и кратные звёзды. М.: Мир. 1976. 323 с.
5. *Бражникова Э.Ф., Бабинчук С.В.* Об особенностях расположения периастров орбит спектрально-двойных звёзд // *Астрономический журнал.* 1965. V. 42. С. 678–679.
6. *Бражникова Э.Ф.* Загадка спектрально-двойных звёзд // *Земля и Вселенная.* 1968. №5. С. 27–29.
7. *Бражникова Э.Ф.* О селекции при открытии спектрально-двойных звёзд и интерпретации В-эффекта // *Астрономический журнал.* 1970. Т. 47. вып. 1. С. 149–161.
8. *Бражникова Э.Ф., Дагаев М.М., Радзиевский В.В.* О галактической ориентации орбит // *Астрономический журнал.* 1975. Т. 52. вып. 3. С. 546–552.
9. *Семиков С.А.* Экзопланетная экзотика: иллюзии и реальность // *Техника-молодёжи.* 2013. № 1. С. 24–26.
10. *Struve O., Huang S.-S.* Close Binary Stars. Occas. Notes // *R. Astr. Soc.* 1957. V. 3(19). P. 161–188.
11. *Guthnik P.* Astronomische Kriterien für die Unabhängigkeit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes von der Bewegung der Lichtquelle // *Astr. Nachr.* 1913. V. 195. S. 265–270.
12. *Freundlich E.* Zur Frage der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit // *Phys. Z.* 1913. V. 14. S. 835–838.
13. *Loeb A., Gaudi B.S.* Periodic Flux Variability of Stars due to the Reflex Doppler Effect Induced by Planetary Companions // *Astroph. J. Letters.* 2003. V. 588. L117–L120.
14. *Баканов В.А.* Расширенный каталог орбит визуально-двойных звёзд с известными элементами и эффект Барра у этих систем // *Учёные записки ГПИ. Сер. Физические науки.* 1972. Вып. 124. С. 50–63.
15. *Толстых В.И.* Эффект Барра и антиапексиальный эффект у затменно-двойных звёзд // *Учёные записки ГПИ. Сер. Физические науки.* 1972. Вып. 124. С. 70–73.
16. *Белопольский А.А.* *Астрономические труды.* М.: Гостехиздат. 1954. 320 с.
17. *Ritz W.* Recherches critiques sur l'Electrodynamique Generale // *Ann. Chim. Phys.* 1908. V. 13. P. 145–275. URL: <http://ritz-btr.narod.ru/contents.html> (дата обращения 04.03.2013).
18. *Comstock D.F.* A Neglected Type of Relativity // *Phys. Rev.* 1910. V. 30. P. 267.
19. *Zurhellen W.* Zur Frage der Astronomischen Kriterien für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit // *Astr. Nachr.* 1914. V. 198. P. 1–10.
20. *De Sitter W.* Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit // *Phys. Z.* 1913. Bd. 14. S. 429, 1267.
21. *Сивухин Д.В.* *Оптика.* М.: Наука. 1980. 752 с.
22. *Франкфурт У.И., Френк А.М.* *Оптика движущихся тел.* М.: Наука. 1972. 212 с.
23. *Роузвер Н.Т.* Перигелий Меркурия от Леверье до Эйнштейна. М.: Мир. 1985. С. 161.
24. *Семиков С.А.* Об экспериментальной проверке баллистической теории света // *Вестник ННГУ.* 2013. № 4(1). С. 56–63.
25. *Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C.* X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E = 50\text{--}30000$ eV, $Z = 1\text{--}92$ // *Atomic Data and Nuclear Data Tables.* July 1993. V. 54. № 2. P. 181–342.
26. *Cottam J., Paerels F., Mendez M.* Gravitationally redshifted absorption lines in the X-ray burst spectra of a neutron star // *Nature.* 2002. V. 420. P. 51–54.
27. *Физика космоса.* М.: Советская энциклопедия, 1986. 783 с.
28. *Habs D., Gunther M.M., Jentschel M., Urban W.D.* The Refractive Index of Silicon at γ -Ray Energies. URL: <http://arxiv.org/pdf/1111.3608v2> (дата обращения 29.03.2014).
29. *Brecher K.* Is the Speed of Light Independent of the Velocity of the Source? // *Phys. Rev. Lett.* 1977. V. 39. P. 1051–1054.
30. *Саункевич И.С.* Экспериментальные корни специальной теории относительности. М.: УРСС, 2003. 176 с.
31. *Brecher K.* Precision Test of Special Relativity Using Gamma Ray Bursts // *Bulletin of Physics News.* 2000. № 484. May 11.
32. *Fox J.G.* Constancy of the velocity of light // *JOSA.* 1967. V. 57. P. 967–968.
33. *Moon P., Spencer D.* Binary Stars and the Velocity of Light // *JOSA.* 1953. V. 43. № 8. P. 635–641.
34. *Бонч-Бруевич А.М., Молчанов В.А.* Новый оптический релятивистский опыт // *Оптика и спектроскоп.* 1956. Т. 1(2). С. 113–124.
35. *Семиков С.А.* О возможных источниках вычислительных ошибок космической навигации, GPS и ГЛОНАСС, лазерной локации и радиолокации // *Труды 1-й российско-белорусской науч.-технич. конф. «Элементарная база отечественной радиоэлектроники», посвящённой 110-летию со дня рождения О.В. Лосева / Под ред. А.Э. Рассадина.* Н. Новгород.: Нижегородская радиолокационная лаборатория. 2013. В 2-х томах. Т. 1. С. 236–240.
36. *Семиков С.А.* Об эффекте трансформации длины волны, длительности и мощности лазерных импульсов при рассеянии на

- ускоренно летящих частицах // Вестник ННГУ. 2014. № 1(2). С. 180–185.
37. Дёмин В.Н., Селезнёв В.П. Мироздание постигая... М.: Молодая Гвардия. 1989. 267 с.
 38. Селезнёва Н.В. Покорение космического пространства: эпопеи советского изобретателя. М.: Либроком. 2013. 360 с.
 39. Селезнёв В.П. Навигационные устройства. М.: Оборонгиз. 1961. 615 с.
 40. Wallace B.G. Radar Testing of the Relative Velocity of Light in Space // Spectroscopy Lett. 1969. V. 2(12). P. 361–367.
 41. Wallace B.G. Radar Evidence that the Velocity of Light in Space is Not c // Spectroscopy Lett. 1971. V. 4. P. 79–84.
 42. Андерсон Дж., Ланг Ф., Лау Э., Ньюто М., Туришев С. Странное ускорение «Пионеров» // Земля и Вселенная. 2002. № 5. С. 78–81.
 43. Anderson J.D., Laing P.A., Lau E.L., et al. Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 2858–2861.
 44. Gezari D.Y. Lunar Laser Ranging Test of the Invariance of c . URL: <http://arxiv.org/abs/0912.3934> (дата обращения 04.03.2013).
 45. Семиков С.А. Баллистическая теория Ритца и картина мироздания. Н. Новгород: Стимул-СТ. 2010. 612 с.
 46. Рабинович М.И., Трубецков Д.И. Введение в теорию колебаний и волн. М.: Наука. 1984. 432 с.
 47. Брагинский В.Б., Полнарёв А.Г. Удивительная гравитация. М.: Наука. 1985. 160 с.
 48. Шапиро И. Радиолокационные наблюдения планет // УФН. 1969. Т. 99. С. 319–336.
 49. Семиков С.А. Вариации скорости света как возможный источник ошибок космической навигации, радиолокации и лазерной локации // Журнал радиоэлектроники. 2013. №12. С. 1–32. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/17/text.html> (дата обращения 29.06.2014).
 50. Семиков С.А. Космос русского Аристарха // История науки и техники. 2007. №1. С. 60–64.
 51. Циолковский К.Э. Очерки о Вселенной. Калуга: Золотая аллея. 2001. 384 с.
 52. Вавилов С.И. Собрание сочинений. Т. 2. М.: АН СССР, 1952. С. 131.
 53. Семиков С.А. Эффект трансформации частоты света при ускорении источника и критерии его экспериментальной проверки // Нелинейный мир. 2014. №6. С. 3–15.
 54. Murad P.A. Replicating Pulsar Behaviour to Create a Future Space Propulsor // International Journal of Astronomy. 2012. № 1(5). P. 81–86.
 55. Gong Bi-Ping, Yan Z.Q. Evidence of Residual Doppler Shift on Three Pulsars, PSR B1259-63, 4U1627-67 and PSR J2051-0827. URL: <http://arxiv.org/pdf/1401.6530v1> (дата обращения 20.08.2014).
 56. Ragos O., Haranas I., Gkigkitzis I. Effects in the Anomalous Period of Celestial Bodies due to a Logarithmic Correction to the Newtonian Gravitational Potential // Astrophysics and Space Science. V. 345. Is. 1. P. 67–72.
 57. La Rosa M. Addiert sich die Geschwindigkeit des Lichtes zu derjenigen der Lichtquelle? Dafür sprechende Beweise aus den Phänomenen der «veränderlichen Sterne» // Phys. Z. 1924. V. 21. P. 333–347.
 58. La Rosa M. Neur Beitrag zur ballistischen Theorie der «veränderlichen Sterne» // Astr. Nachr. 1929. V. 234. P. 235–243.
 59. Секерин В.И. Теория относительности – мистификация века. Новосибирск. 1991. 56 с.
 60. Колесников А.И., Лютый В.М., Талызин И.В. Наблюдательные факты и их интерпретация в астрофизике // Вестник ТвГУ. Сер. Физика. 2005. Вып. 2. № 9(15). С. 124–131.
 61. Pietrzyński G., Thompson I.B., Gieren, W., et al. RR-Lyrae-type pulsations from a 0.26-solar-mass star in a binary system // Nature. 2012. V. 484. P. 75–77.
 62. URL: <http://www.astronomy.ru/forum/index.php/topic,91249.0.html> (дата обращения 14.07.2014).
 63. Comstock D.F. A Simple Criterion for the Detection of Anomalies in the Orbits of Spectroscopic Binaries // Astroph. Journal. 1910. V. 31. P. 364.
 64. Чикин П.С. Проблема статистики звёзд и скорость света // Актуальные проблемы современной науки. 2005. № 2. С. 88–101.
 65. Семиков С.А. Ключ к загадкам космоса // Инженер. 2006. № 3. С. 8–11.
 66. Struve O. The Spectrum of RX Cassiopeiae // Astrophys. J. 1944. V. 99. P. 295–312.
 67. Pribulla T., Rucinski S.M., Lu W., et al. Radial Velocity Studies of Close Binary Stars. XI // Astron. Journal. 2006. V. 132. № 2. P. 769–780.
 68. Александров Е.Б. Об одном астрофизическом доказательстве второго постулата специальной теории относительности // Астрон. журнал. 1965. Т. 42. Вып. 3. С. 676–678.
 69. Savedoff M.P. On $(e \cos \omega)$ for Eclipsing Binaries // Astron. J. 1951. V. 56. P. 1–9.
 70. Struve O. Spectroscopic Binaries // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1949. V. 109. P. 487–506.
 71. McNamara D.H. The Eclipsing Binary U Sagittae // Astrophys. J. 1951. V. 114. P. 513–521.
 72. Abhyankar K.D. A Study of Some Early Type Close Binary Stars // Astrophys. J. Suppl., Ser. 4. 1959. P. 157–198.
 73. Linder N., Rauw G., Sana H., et al. The Struve-Sahade Effect in the Optical Spectra of O-Type Binaries. I. Main-Sequence Systems // Astronomy & Astrophysics. 2007. V. 474. P. 193–204.
 74. Алдусева В.Я. Спектроскопические исследования RX Cas // Астрономический журнал. 1987. Т. 64. С. 591–600.
 75. Arras P., Burkart J., Quataert E., Weinberg N. The Radial Velocity Signature of Tides Raised in Stars Hosting Exoplanets // MNRAS. 2012. V. 422. P. 1761–1766.
 76. Hebrard G., Almenara J.-M., Santerne A., et al. KOI-200b and KOI-889b: Two Transiting Exoplanets Detected and Characterized with Kepler, SOPHIE and HARPS-N // Astronomy & Astrophysics. 2013. № 554. A114. April 23. С. 1–10. URL: <http://exoplanets.org> (дата обращения 04.03.2013).
 77. Barbieri M., Alonso R., Desidera S., et al. Characterization of the HD 17156 Planetary System // Astronomy & Astrophysics. 2009. V. 503. P. 601–612.
 78. Kürster M. Hot Jupiters and Hot Spots: The Short- and Long-Term Chromospheric Activity on Stars with Giant Planets // Astroph. Journal. 2005. V. 622(2). P. 1075–1090.
 80. Семиков С.А. Через поля к экзопланетам // Техника-молодёжи. 2014. № 6. С. 28–31.

81. Мушаилов Б.П., Теплицкая В.С. О надёжности определения орбитальных параметров экзопланет доплеровским методом // Космические исследования. 2012. Т. 50. № 6. С. 452–461.
82. Мушаилов Б.П., Теплицкая В.С. Спектрометрический метод обнаружения экзопланет как ещё один тест для проверки инвариантности скорости света // Вестник МГУ. Сер. 3. 2011. № 6. С. 98–103.
83. Grossman L. Exoplanet Pairs May Be Masquerading as Singles // New Scientist. 7 July 2009. URL: <http://www.newscientist.com/article/dn17425-exoplanet-pairs-may-be-masquerading-as-singles.html> (дата обращения 04.03.2013).
84. Rodigas T.J., Hinz P.M. Which Radial Velocity Exoplanets Have Undetected Outer Companions? // Astroph. Journal. 2009. V. 702. P. 716–723.
85. Chan T., Ingemeyr M., Winn J.N., et al. The Transit Light-Curve Project. XIV. Confirmation of Anomalous Radii for the Exoplanets Trés-4b, Hat-P-3b, and Wasp-12b // Astron. Journal. 2011. V. 141. №6. 179. URL: http://iopscience.iop.org/1538-3881/141/6/179/pdf/1538-3881_141_6_179.pdf (дата обращения 20.07.2014).
86. Laughlin G., Crismani M., Adams F.C. On the Anomalous Radii of the Transiting Extrasolar Planets // Astroph. J. Letters. 2011. V. 729. №1. L7. URL: http://iopscience.iop.org/2041-8205/729/1/L7/pdf/2041-8205_729_1_L7.pdf (дата обращения 20.07.2014).
87. Queloz D., Anderson D., Cameron A.C., et al. WASP-8b, a Retrograde Transiting Planet in a Multiple System // Astronomy & Astrophysics. 2010. April 12. P. 1–4.
88. Lendl M., Triaud A.H.M.J., Anderson D.R., et al. WASP-117b: a 10-Day-Period Saturn in an Eccentric and Misaligned Orbit. URL: <http://arxiv.org/pdf/1406.6942v1> (дата обращения 29.06.2014).
89. Howard A.W., Sanchis-Ojeda R., Marcy G.W., et al. A Rocky Composition for an Earth-Sized Exoplanet // Nature. 2013. 503(7476). P. 381–384.
90. Тихов Г.А. Дисперсия в космическом пространстве // ЖРФХО. 1909. Вып. 5. С. 176.
91. Тихов Г.А. Шестьдесят лет у телескопа. М.: Детская литература. 1959. С. 57.
92. Тихов Г.А. Основные труды. Т. 1. Алма-Ата: Изд-во АН Казахской ССР. 1954. 336 с.
93. Бунин В.А. Затменные двойные звёзды и вопрос о дисперсии скорости света в вакууме // Астрономический журнал. 1962. Т. 29. Вып. 4. С. 768–769.
94. Масликов С.П. Новый вариант «баллистической теории» Вальтера Ритца // Физическая мысль России. 1998. № 1. С. 48–57.
95. Семиков С.А. Сто лет СТО. Есть ли альтернатива? // Инженер. 2005. № 11. С. 21–24.
96. Лайсл Дж. Экзопланеты: неожиданные открытия // Разумный замысел. Июль 2011. № 4–6 (21). С. 3.

Поступила 9.09.2014 г.

The nature of the Barr effect and anomalous eccentricities of exoplanets

© Authors, 2016
© Radiotekhnika, 2016

S.A. Semikov – Master of Physics, Assistant, Engineer, Department of General Physics, Nizhny Novgorod State University named after N.I. Lobachevsky
E-mail: sergey-semikov@yandex.ru; semisea@mail

An anomaly of periastron longitude distribution of spectroscopic binary stars discovered more than a century ago has been studied according to which stars with the orbits extended in the direction of the Earth prevail, that is stars with periastron longitudes ω in the range $0^\circ \leq \omega < 180^\circ$ where concentration of periastrons is especially large with $\omega = 90^\circ$. This anomaly named after its discoverer the Barr effect (or B-effect) still does not have an unambiguous explanation. Hypotheses of Barr himself as well as Struve, Brazhnikova and others suggesting explanations of the Barr effect have been studied and their contradiction to observations has been shown. It has been demonstrated that among all the suggested hypotheses only Guthnik and Freundlich hypothesis based on ballistic theory explains all the peculiarities of the Barr effect. This hypothesis suggests that dependence of light velocity on the velocity of the emitting star results in distortion of visible stellar motions and of radial velocity curves. Distorted radial velocity curves comply with the orbits elongated in the direction of the Earth. Not only does Guthnik and Freundlich hypothesis qualitatively and quantitatively explain all the peculiarities of the Barr effect, but it also complies with all the criteria for ascertainment of the nature of the effect suggested in this paper.

Apart from that, an additional effect (Ritz effect) predicted by ballistic theory has been studied which results in frequency shift and brightness variations and which differs from Doppler effect. It has been shown that the shifts of spectrum lines caused by Ritz effect will be interpreted as Doppler shifts which results in construction of false radial velocity curves. Ritz effect allows to explain a number of anomalies of «radial velocity curves» and «light curves» of binary stars.

Moreover, ballistic theory and Ritz effect following from it allows to explain a number of anomalies observed in exoplanet systems, including the Barr effect discovered for them, anomalously high eccentricities, retrograde motion of exoplanets, anomalously high and anomalously low orbital radiuses, a large number of planets in orbital resonance, anomalies of mass, density, etc. Thus, ballistic theory allows to easily and precisely explain the Barr effect and a number of other anomalies, statistical distributions and regularities, which have been discovered in recent years but have not been explained yet. A possible role of cosmic light dispersion in distortion of radial velocity curves has been studied which is essential for explanation of some additional anomalies of statistical distributions of exoplanets on periastron longitudes.

Criteria suggested in this paper allow to verify if the abovementioned anomalies of exoplanets and binary stars are caused by the variability of light velocity and the effects of ballistic theory and to determine the proper characteristics of exoplanets and binary stars.

References

1. Barr J.M. The orbits and «velocity curves» of spectroscopic binaries // J. Roy. Astron. Soc. of Canada. 1908. V. 2. P. 70–75.
2. Batten A.H. The Barr Effect // J. Roy. Astron. Soc. of Canada. 1983. V. 77. № 2. P. 95–97.
3. Fox J.G. Evidence Against Emission Theories // Am. J. Phys. 1965. V. 33. P. 1–17.
4. Bjetten A. Dvojnye i kratnye vzjozdy. M.: Mir. 1976. 323 s.
5. Brazhnikova Je.F., Babinchuk S.V. Ob osobennosti raspolozhenija periastron orbit spektral'no-dvojnyh vzjozd // Astronomicheskij zhurnal. 1965. V. 42. S. 678–679.
6. Brazhnikova Je.F. Zagadka spektral'no-dvojnyh vzjozd // Zemlja i Vselennaja. 1968. №5. S. 27–29.
7. Brazhnikova Je.F. O selekcii pri otkrytii spektral'no-dvojnyh vzjozd i interpretacii B-jeffekta // Astronomicheskij zhurnal. 1970. T. 47. Vyp. 1. S. 149–161.
8. Brazhnikova Je.F., Dagaev M.M., Radzievskij V.V. O galakticheskoy orientacii orbit // Astronomicheskij zhurnal. 1975. T. 52. Vyp. 3. S. 546–552.
9. Semikov S.A. Jekzoplanetnaja jekzotika: illjuzii i real'nost' // Tehnika-molodjozhi. 2013. № 1. S. 24–26.
10. Struve O., Huang S.-S. Close Binary Stars. Occas. Notes // R. Astr. Soc. 1957. V. 3(19). P. 161–188.
11. Guthnik P. Astronomische Kriterien für die Unabhängigkeit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit des Lichtes von der Bewegung der Lichtquelle // Astr. Nachr. 1913. V. 195. S. 265–270.
12. Freundlich E. Zur Frage der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit // Phys. Z. 1913. V. 14. S. 835–838.
13. Loeb A., Gaudi B.S. Periodic Flux Variability of Stars due to the Reflex Doppler Effect Induced by Planetary Companions // Astroph. J. Letters. 2003. V. 588. L117–L120.
14. Bakanov V.A. Rasshirennyj katalog orbit vizual'no-dvojnyh vzjozd s izvestnymi jelementami i jeffekt Barra u jetih sistem // Uchjonye zapiski GPI. Ser. Fizicheskie nauki. 1972. Vyp. 124. S. 50–63.
15. Tolstyh V.I. Jeffekt Barra i antiapexial'nyj jeffekt u zatmenno-dvojnyh vzjozd // Uchjonye zapiski GPI. Ser. Fizicheskie nauki. 1972. Vyp. 124. S. 70–73.
16. Belopol'skij A.A. Astronomicheskije trudy. M.: Gostehizdat. 1954. 320 s.
17. Ritz W. Recherches critiques sur l'Electrodynamique Generale // Ann. Chim. Phys. 1908. V. 13. P. 145–275. URL: <http://ritzbtr.narod.ru/contents.html> (дата обращения 04.03.2013).
18. Comstock D.F. A Neglected Type of Relativity // Phys. Rev. 1910. V. 30. P. 267.
19. Zurhellen W. Zur Frage der Astronomischen Kriterien für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit // Astr. Nachr. 1914. V. 198. P. 1–10.
20. De Sitter W. Ein astronomischer Beweis für die Konstanz der Lichtgeschwindigkeit // Phys. Z. 1913. Bd. 14. S. 429, 1267.
21. Sivuhin D.V. Optika. M.: Nauka. 1980. 752 s.
22. Frankfurt U.I., Frenk A.M. Optika dvizhushhihsja tel. M.: Nauka. 1972. 212 s.
23. Rouzver N.T. Perigelij Merkurija ot Lever'e do Jejnshtejna. M.: Mir. 1985. S. 161.
24. Semikov S.A. Ob jeksperimental'noj proverke ballisticheskoy teorii sveta // Vestnik NNGU. 2013. № 4(1). S. 56–63.
25. Henke B.L., Gullikson E.M., Davis J.C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at $E = 50\text{--}30000$ eV, $Z = 1\text{--}92$ // Atomic Data and Nuclear Data Tables. July 1993. V. 54. № 2. P. 181–342.
26. Cottam J., Paerels F., Mendez M. Gravitationally redshifted absorption lines in the X-ray burst spectra of a neutron star // Nature. 2002. V. 420. P. 51–54.
27. Fizika kosmosa. M.: Sovetskaja jenciklopedija. 1986. 783 s.
28. Habs D., Gunther M.M., Jentschel M., Urban W.D. The Refractive Index of Silicon at γ -Ray Energies. URL: <http://arxiv.org/pdf/1111.3608v2> (дата обращения 29.03.2014).
29. Brecher K. Is the Speed of Light Independent of the Velocity of the Source? // Phys. Rev. Lett. 1977. V. 39. P. 1051–1054.
30. Sacunkevich I.S. Jeksperimental'nye korni special'noj teorii otosritel'nosti. M.: URSS. 2003. 176 s.
31. Brecher K. Precision Test of Special Relativity Using Gamma Ray Bursts // Bulletin of Physics News. 2000. № 484. May 11.
32. Fox J.G. Constancy of the velocity of light // JOSA. 1967. V. 57. P. 967–968.
33. Moon P., Spencer D. Binary Stars and the Velocity of Light // JOSA. 1953. V. 43. № 8. P. 635–641.
34. Bonch-Bruevich A.M., Molchanov V.A. Novyj opticheskij reljativistskij opyt // Optika i spektrosk. 1956. T. 1(2). S. 113–124.
35. Semikov S.A. O vozmozhnyh istochnikah vychislitel'nyh oshibok kosmicheskoy navigacii, GPS i GLONASS, lazernoj lokacii i radiolokacii // Trudy 1-j rossijsko-belorusskoj nauch.-tehnich. konf. «Jelementnaja baza otechestvennoj radioelektroniki», posvjashhjonnoj 110-letiju so dnja rozhdenija O.V. Loseva / Pod red. A.Je. Rassadina. N. Novgorod.: Nizhegorodskaja radiolaboratorija. 2013. V 2-h t. T. 1. S. 236–240.
36. Semikov S.A. Ob jeffekte transformacii dliny volny, dlitel'nosti i moshhnosti lazernyh impul'sov pri rassejanii na uskorenno letjashhij chasticah // Vestnik NNGU. 2014. № 1(2). S. 180–185.
37. Djomin V.N., Seleznjov V.P. Mirozdanie postigaja... M.: Molodaja Gvardija. 1989. 267 s.
38. Seleznjova N.V. Pokorenie kosmicheskogo prostranstva: jepopei sovetskogo izobretatelja. M.: Librokom. 2013. 360 s.
39. Seleznjov V.P. Navigacionnye ustrojstva. M.: Oborongiz. 1961. 615 s.
40. Wallace B.G. Radar Testing of the Relative Velocity of Light in Space // Spectroscopy Lett. 1969. V. 2(12). P. 361–367.
41. Wallace B.G. Radar Evidence that the Velocity of Light in Space is Not c // Spectroscopy Lett. 1971. V. 4. P. 79–84.
42. Anderson Dzh., Laing F., Lau Je., N'eto M., Turishev S. Strannoe uskorenie «Pionerov» // Zemlja i Vselennaja. 2002. № 5. S. 78–81.
43. Anderson J.D., Laing P.A., Lau E.L., et al. Indication, from Pioneer 10/11, Galileo, and Ulysses Data, of an Apparent Anomalous, Weak, Long-Range Acceleration // Phys. Rev. Lett. 1998. V. 81. P. 2858–2861.
44. Gezari D.Y. Lunar Laser Ranging Test of the Invariance of c . URL: <http://arxiv.org/abs/0912.3934> (дата обращения 04.03.2013).
45. Semikov S.A. Ballisticheskaja teorija Ritca i kartina mirozdanija. N. Novgorod: Stimul-ST. 2010. 612 s.
46. Rabinovich M.I., Trubeckov D.I. Vvedenie v teoriju kolebanij i voln. M.: Nauka. 1984. 432 s.
47. Braginskij V.B., Polnarjov A.G. Udivitel'naja gravitacija. M.: Nauka. 1985. 160 s.
48. Shapiro I. Radiolokacionnye nabljudenija planet // UFN. 1969. T. 99. S. 319–336.
49. Semikov S.A. Variacii skorosti sveta kak vozmozhnyj istochnik oshibok kosmicheskoy navigacii, radiolokacii i lazernoj lokacii // Zhurnal radioelektroniki. 2013. №12. S. 1–32. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/dec13/17/text.html> (дата obrashhenija 29.06.2014).
50. Semikov S.A. Kosmos russkogo Aristarha // Istorija nauki i tehniki. 2007. №1. S. 60–64.
51. Ciolkovskij K.Je. Ocherki o Vselennoj. Kaluga: Zolotaja alleja. 2001. 384 s.
52. Vavilov S.I. Sobranie sochinenij, T. 2. M.: AN SSSR, 1952. S. 131.

53. Semikov S.A. Jefeekt transformacii chastoty sveta pri uskorenii istochnika i kriterii ego jeksperimental'noj proverki // Nelinejnij mir. 2014. №6. S. 3–15.
54. Murad P.A. Replicating Pulsar Behaviour to Create a Future Space Propulsor // International Journal of Astronomy. 2012. № 1(5). P. 81–86.
55. Gong Bi-Ping, Yan Z.Q. Evidence of Residual Doppler Shift on Three Pulsars, PSR B1259-63, 4U1627-67 and PSR J2051-0827. URL: <http://arxiv.org/pdf/1401.6530v1> (дата обращения 20.08.2014).
56. Ragos O., Haranas I., Gkigkitzis I. Effects in the Anomalistic Period of Celestial Bodies due to a Logarithmic Correction to the Newtonian Gravitational Potential // Astrophysics and Space Science. V. 345. Is. 1. P. 67–72.
57. La Rosa M. Addiert sich die Geschwindigkeit des Lichtes zu derjenigen der Lichtquelle? Dafür sprechende Beweise aus den Phänomenen der «veränderlichen Sterne» // Phys. Z. 1924. V. 21. P. 333–347.
58. La Rosa M. Neur Beitrag zur ballistischen Theorie der «veränderlichen Sterne» // Astr. Nachr. 1929. V. 234. P. 235–243.
59. Sekerin V.I. Teorija odnositel'nosti – mistifikacija veka. Novosibirsk. 1991. 56 s.
60. Kolesnikov A.I., Ljutyj V.M., Talyzin I.V. Nabljudatel'nye fakty i ih interpretacija v astrofizike // Vestnik TvGU, serija «Fizika». 2005. Vyp. 2. № 9(15). S. 124–131.
61. Pietrzynski G., Thompson I.B., Gieren, W., et al. RR-Lyrae-type pulsations from a 0.26-solar-mass star in a binary system // Nature. 2012. V. 484. P. 75–77.
62. URL: <http://www.astronomy.ru/forum/index.php/topic,91249.0.html> (дата обращения 14.07.2014).
63. Comstock D.F. A Simple Criterion for the Detection of Anomalies in the Orbits of Spectroscopic Binaries // Astroph. Journal. 1910. V. 31. P. 364.
64. Chikin P.S. Problema statistiki zvjzod i skorost' sveta // Aktual'nye problemy sovremennoj nauki. 2005. № 2. S. 88–101.
65. Semikov S.A. Ključ k zagadkam kosmosa // Inzhener. 2006. №3. S. 8–11.
66. Struve O. The Spectrum of RX Cassiopeiae // Astrophys. J. 1944. V. 99. P. 295–312.
67. Pribulla T., Rucinski S.M., Lu W., et al. Radial Velocity Studies of Close Binary Stars. XI // Astron. Journal. 2006. V. 132. Is. 2. P. 769–780.
68. Aleksandrov E.B. Ob odnom astrofizicheskom dokazatel'stve vtorogo postulata special'noj teorii odnositel'nosti // Astron. zhurnal. 1965. T. 42. Vyp. 3. S. 676–678.
69. Savedoff M.P. On (e cos ω) for Eclipsing Binaries // Astron. J. 1951. V. 56. P. 1–9.
70. Struve O. Spectroscopic Binaries // Mon. Not. Roy. Astron. Soc. 1949. V. 109. P. 487–506.
71. McNamara D.H. The Eclipsing Binary U Sagittae // Astrophys. J. 1951. V. 114. P. 513–521.
72. Abhyankar K.D. A Study of Some Early Type Close Binary Stars // Astrophys. J. Suppl., Ser. 4. 1959. P. 157–198.
73. Linder N., Rauw G., Sana H., et al. The Struve-Sahade Effect in the Optical Spectra of O-Type Binaries. I. Main-Sequence Systems // Astronomy & Astrophysics. 2007. V. 474. P. 193–204.
74. Alduseva V.Ja. Spektroskopicheskie issledovanija RX Cas // Astron. zhurnal. 1987. T. 64. S. 591–600.
75. Arras P., Burkart J., Quataert E., Weinberg N. The Radial Velocity Signature of Tides Raised in Stars Hosting Exoplanets // MNRAS. 2012. V. 422. P. 1761–1766.
76. Hebrard G., Almenara J.-M., Santerne A., et al. KOI-200b and KOI-889b: Two Transiting Exoplanets Detected and Characterized with Kepler, SOPHIE and HARPS-N // Astronomy & Astrophysics. 2013. № 554. A114. April 23. C. 1–10.
77. URL: <http://exoplanets.org> (дата обращения 04.03.2013).
78. Barbieri M., Alonso R., Desidera S., et al. Characterization of the HD 17156 Planetary System // Astronomy & Astrophysics. 2009. V. 503. P. 601–612.
79. Kürster M. Hot Jupiters and Hot Spots: The Short- and Long-Term Chromospheric Activity on Stars with Giant Planets // Astroph. Journal. 2005. V. 622(2). P. 1075–1090.
80. Semikov S.A. Cherez polja k jekzoplanetam // Tehnika-molodjozhi. 2014. № 6. S. 28–31.
81. Mushailov B.R., Teplickaja V.S. O nadjozhnosti opredelenija orbital'nyh parametrov jekzoplanet doplerovskim metodom // Kosmicheskie issledovanija. 2012. T. 50. №6. S. 452–461.
82. Mushailov B.R., Teplickaja V.S. Spektrometricheskij metod obnaruzhenija jekzoplanet kak eshhjo odin test dlja proverki invariantnosti skorosti sveta // Vestnik MGU. Ser. 3. 2011. № 6. S. 98–103.
83. Grossman L. Exoplanet Pairs May Be Masquerading as Singles // New Scientist. 7 July 2009. URL: <http://www.newscientist.com/article/dn17425-exoplanet-pairs-may-be-masquerading-as-singles.html> (дата обращения 04.03.2013).
84. Rodigas T.J., Hinz P.M. Which Radial Velocity Exoplanets Have Undetected Outer Companions? // Astroph. Journal. 2009. V. 702. P. 716–723.
85. Chan T., Ingemyr M., Winn J.N., et al. The Transit Light-Curve Project. XIV. Confirmation of Anomalous Radii for the Exoplanets TrES-4b, Hat-P-3b, and Wasp-12b // Astron. Journal. 2011. V. 141. №6. 179. URL: http://iopscience.iop.org/1538-3881/141/6/179/pdf/1538-3881_141_6_179.pdf (дата обращения 20.07.2014).
86. Laughlin G., Crismani M., Adams F.C. On the Anomalous Radii of the Transiting Extrasolar Planets // Astroph. J. Letters. 2011. V. 729. №1. L7. URL: http://iopscience.iop.org/2041-8205/729/1/L7/pdf/2041-8205_729_1_L7.pdf (дата обращения 20.07.2014).
87. Queloz D., Anderson D., Cameron A.C., et al. WASP-8b, a Retrograde Transiting Planet in a Multiple System // Astronomy & Astrophysics. 2010. April 12. P. 1–4.
88. Lendl M., Triaud A.H.M.J., Anderson D.R., et al. WASP-117b: a 10-Day-Period Saturn in an Eccentric and Misaligned Orbit. URL: <http://arxiv.org/pdf/1406.6942v1>.
89. Howard A.W., Sanchis-Ojeda R., Marcy G.W., et al. A Rocky Composition for an Earth-Sized Exoplanet // Nature. 2013. 503(7476). P. 381–384.
90. Tihov G.A. Dispersija v kosmicheskom prostranstve // ZhRFHO. 1909. Vyp. 5. S. 176.
91. Tihov G.A. Shest'desjat let u teleskopa. M.: Detskaja literatura. 1959. S. 57.
92. Tihov G.A. Osnovnye trudy. T. 1. Alma-Ata: Izd-vo AN Kazahskoj SSR. 1954. 336 s.
93. Bunin V.A. Zاتمennye dvojnje zvjzody i vopros o dispersii skorosti sveta v vakuume // Astronomicheskij zhurnal. 1962. T. 29. Vyp. 4. S. 768–769.
94. Maslikov S.P. Novyj variant «ballisticheskij teorii» Val'tera Ritca // Fizicheskaja mysl' Rossii. 1998. № 1. S. 48–57.
95. Semikov S.A. Sto let STO. Est' li al'ternativa? // Inzhener. 2005. № 11. S. 21–24.
96. Lajsl Dzh. Jekzoplanety: neozhidannye otkrytija // Razumnyj zamysel. Ijul' 2011. № 4–6 (21). S. 3.