

---

---

## Douze ans après

### Заметки к русскому изданию

А. Морбиделли, И. И. Шевченко

Прошло двенадцать лет, как в этой книге были сделаны последние штрихи. Очевидно, наука продолжает эволюционировать в быстром темпе, и небесная механика здесь ни в коем случае не исключение. За прошедшие годы было достигнуто немало новых результатов и, если бы книга писалась сегодня, в нее потребовалось бы включить несколько новых тем.

В этих заметках мы даем краткий обзор тем, в которых, по нашему мнению, достижения были наиболее существенными. Не вдаваясь в детали (это потребовало бы существенного увеличения объема книги) и не пытаясь дать исчерпывающий список литературы, мы просто укажем предметы исследований и приведем некоторые ссылки, чтобы заинтересованный читатель имел ориентиры в современной литературе.

Некоторые из недавних результатов представляют собой естественное развитие уже рассмотренных в книге тем. Например, с использованием таких инструментов, как FLI (быстрые индикаторы Ляпунова, раздел 5.4.1) и динамические карты (подобные представленным на рис. 6.9), исследовались тонкая структура фазового пространства гамильтоновых систем и роль паутины Арнольда в обеспечении хаотической диффузии (Фрешле и др., 2006; Лега и др., 2007). Что касается планетной динамики, сеть трехтельных резонансов (см. главу 10) во внешней Солнечной системе была детально исследована Гуццо (2006); в итоге было найдено наконец объяснение, почему согласно некоторым модельным расчетам планеты-гиганты Солнечной системы имеют хаотические орбиты, а согласно другим — регулярные (см. также Хэйес, 2008). Аналогично, Робутель и Габерн (2006) отождествили сеть резонансов и построили карты устойчивых и неустойчивых областей фазового пространства для троянцев Юпитера.

Следует подчеркнуть, однако, что в прошедшем десятилетии эволюция небесной механики стимулировалась главным образом новыми наблюдениями, открывшими новые области для исследований.

Прежде всего, открытие внесолнечных планет: первые экзопланеты были открыты раньше, чем была написана эта книга; однако на момент написания были известны, за немногими исключениями, только однопланетные экзосистемы. К декабрю 2013 года открыто  $\approx 900$  планет (и более чем 3000 кандидатов в планеты по результатам миссии *Kepler*), существенная часть которых входит в более чем 130 мультипланетных систем. (Всего, включая и однопланетные системы, сейчас известно более 700 экзосистем.) Они дают материал для многих интересных динамических задач.

В некоторых мультипланетных системах планеты находятся в резонансах средних движений друг с другом (Ферраз-Мелло и др., 2005; Райт и др., 2011; Фабрицки и др., 2012). Известными системами с планетами в резонансе 2/1 являются Gliese 876 и HD 82943, в резонансе 3/1 — 55 Спс; тогда как Gliese 876 — пример системы, где три планеты вовлечены в резонанс Лапласа 4:2:1 (Марти и др., 2013) подобно трем внутренним галилеевым спутникам Юпитера. (Более того, объявлено об открытии плотноупакованной резонансной мультипланетной системы, KOI-730, с резонансом средних движений 8:6:4:3; Лиссауэр и др., 2011.) Как полагают, планетные резонансы представляют собой естественное следствие примордиальной миграции планет, имеющей место благодаря их гравитационному взаимодействию с протопланетным диском (см., например, Ванг и др., 2012). Факт нахождения многих систем в резонансах средних движений стимулировал исследования этих резонансов в рамках общей (неограниченной) задачи трех тел.

Общая задача представляет собой весьма актуальный современный раздел небесной механики. Фактически в нашей Солнечной системе планеты не вовлечены в резонансы средних движений друг с другом. В резонансах наблюдаются только астероиды, объекты пояса Койпера, кометы, спутники планет, пылевые комплексы. Поэтому резонансы ранее изучались главным образом в рамках ограниченной задачи (см. главы 9 и 11). В общей задаче резонансы изучались в динамике спутников планет Солнечной системы (см., например, Мальхотра, 1990, и ссылки там); однако в спутниковом случае члены, возникающие из-за несферичности планеты, значительно упрощают задачу, поскольку они вызывают быструю прецессию орбит и расщепление резонансного мультишета (см. главу 9)<sup>1</sup>.

Благодаря большему числу степеней свободы динамика резонанса средних движений в общей задаче гораздо сложнее, чем в ограниченной

<sup>1</sup>В рамках общей задачи также изучались резонансы и периодические орбиты в динамике тройных звезд, но главным образом в связи с «хореографиями», представляющими исключительно математический интерес (см. Мартынова и др., 2005, и ссылки там).

задаче, особенно в отсутствие быстрой прецессии орбит. Поэтому исследования проводились либо исключительно численными методами (см., например, Марцари и др., 2006; Ли и др., 2006; Либер и Тсиганис, 2009, 2011), либо с использованием аналитических соображений, позволяющих редуцировать систему к минимально возможному числу степеней свободы, чтобы можно было численно строить сечения фазового пространства (см., например, Божé и др., 2005; Каллегари и др., 2004, 2006; Мищенко и др., 2008а, 2008б). Попытку построить аналитическую глобальную картину резонансной динамики предприняли Батыгин и Морбиделли (2013а), но за счет принесения в жертву количественной точности в пользу качественного анализа. Фактически глобальную картину можно построить только путем отождествления гармонических членов, используя разложения в ряды по степеням эксцентриситетов, но эти разложения в действительности не подходят для случая экзопланет, так как эксцентриситеты последних обычно велики. Присутствие резонансов средних движений и их взаимодействие подразумевают возможность хаоса в динамике экзопланет, как, например, в системе Кеплер-36 (Дек и др., 2012). Хаос может иметь место не только благодаря взаимодействию резонансов средних движений, но также и благодаря взаимодействию субрезонансов (в мультиплете, см. раздел 9.3) с аргументами, содержащими различные комбинации вековых углов планет (Батыгин и Морбиделли, 2013а). К тому же, как обсуждалось в разделе 10.4, хаос могут порождать трехтельные резонансы средних движений, например, в динамике планет-гигантов в Солнечной системе. С увеличением числа открытых экзопланетных систем исследования трехтельных резонансов были распространены на экзосистемы (Квиллен, 2011).

Вековая динамика планетных систем вне резонансов средних движений также исследовалась (см., например, Ли и Пил, 2003; Мищенко и Мальхотра, 2004; Барнес и Гринберг, 2006; Ферраз-Мелло и др., 2005; Барнес, 2008; Барнес и др., 2011; Гринберг и ван Ларховен, 2012). (Фактически эти исследования произросли из анализа вековой динамики тройных звездных систем; см. Маршаль, 1990, и Форд и др., 2000.) Ву и Литвик (2011) указали на возможность векового хаоса; это следует из обобщения динамической картины, представленной в разделе 7.3 для планет земной группы (также см., например, Ласкар, 1990, 1994, и Литвик и Ву, 2011, — об эволюции Меркурия; Шидлиховский, 1990, — об эволюции астероидов), на системы с много бóльшим дефицитом углового момента, подверженные гораздо более сильным неустойчивостям. В рамках общей задачи был также переосмыслен эффект Лидова–Козаи (Либер и Анрар, 2007; Наоз и др.,

2011). Этот эффект может быть широко распространен в планетных системах двойных звезд или в мультипланетных системах, где планеты движутся по орбитам, сильно наклоненным относительно орбиты возмущающего тела. Фактически эффект Лидова–Козаи мог бы объяснить наблюдаемые сильно вытянутые планетные орбиты S-типа в некоторых двойных звездных системах (Иннанен, 1997; Ву и Мюррей, 2003; Такеда и Расио, 2005): при достаточно высоких наклонениях эксцентриситет планеты благодаря этому эффекту может испытывать сильные колебания. В частности, показано, что эффект возможен в системе  $\gamma$  Serphei (Хагигипоур и др., 2010). Кроме того, его привлекли для объяснения происхождения «горячих Юпитеров» (Литвик и Наоз, 2011; Наоз и др., 2011). Наконец, отметим, что подобно астероидам в Солнечной системе экзопланеты могут одновременно находиться в резонансах средних движений и в вековых резонансах; пример такого рода динамики (хотя еще и не подтвержденный) — система HD 12661 (см., например, Гоздиевский, 2003).

Другим «неограниченным» следствием экзопланетного бума стал растущий интерес к различного рода критериям устойчивости тройных гравитационных систем (таких как две планеты на орбитах вокруг звезды или же планета в двойной звездной системе). Зачастую ошибки определения орбитальных параметров непосредственно из наблюдений бывают много больше, чем диапазон значений параметров, обеспечивающий долгосрочную устойчивость системы. Поэтому анализ долгосрочной устойчивости системы может накладывать более жесткие ограничения на возможные орбиты. Получили развитие как аналитические, так и численно-экспериментальные критерии устойчивости. В первом случае использовались подходы, основывающиеся на классическом критерии Хилла (Глэдман, 1993; Брассер, 2002; Верас и Армитидж, 2004; Доннисон, 2006) и критерии перекрытия резонансов Чирикова (Дункан и др., 1989; Мадрик и Ву, 2006). Во втором случае — вычисления FLI (быстрый индикатор Ляпунова, см. раздел 5.4.1; Пилат-Лохингер и Дворак, 2002), MEGNO (Mean Exponential Growth Factor of Nearby Orbits — средний фактор экспоненциальной расходимости близких орбит, см. раздел 5.4.3; Чинкотта и др., 2003; Гоздиевский, 2003; Гоздиевский и др., 2013), расчеты подлинных показателей Ляпунова (см. раздел 5.2.1; Попова и Шевченко, 2013), анализ фундаментальных частот движения (частотный анализ, см. раздел 5.3.1; Коррейя и др., 2009; Ласкар и Коррейя, 2009), а также простые условия ухода/столкновений (Хольман и Вигерт; 1999; Пилат-Лохингер и др., 2003; Холшевников и Кузнецов, 2011).

Обнаружение планет, обращающихся на орбитах, очень близких к родительским звездам, дало старт исследованиям взаимосвязей динамики и приливной диссипации в мультипланетных системах. Анализ вековой эволюции читатель может найти, например, в статьях Мардлинг (2007), Батыгина и др. (2009), Ловиса и др. (2011), ван Ларховен и Гринберга (2012), Коррейя и др. (2013). Что касается резонансов средних движений, расхождение резонансных орбит исследовали Папалойцу и Теркем (2010), Литвик и Ву (2012) и Батыгин и Морбиделли (2013б); феномен расхождения резонансных орбит ведет к резонансным системам с отношениями периодов большими, чем номинальные рациональные числа. Эффект обусловлен свойством резонансов средних движений первого порядка, обсуждавшимся в главе 9, а именно искривлением семейства устойчивых равновесий в координатах «большая полуось — эксцентриситет» (см. рис. 9.11а). Тенденция к несколько большему, чем резонансные, значениям отношений периодов явно проявляется в системах, открытых в обзоре с КА Кеплер. В этой связи особого упоминания заслуживает работа Делиля и др. (2012), в которой продемонстрирована эквивалентность вековых и резонансных нормальных форм для таких «квазирезонансных» планетных систем.

Более половины наблюдаемых звезд главной последовательности входят в кратные (главным образом двойные) звездные системы (Дюкеннуа и Мейор, 1991; Матье и др., 2000). Особый вызов теоретикам — динамика и формирование циркумбинарных планет, поскольку условия устойчивости выполняются у наблюдаемых систем лишь на пределе. Недавно открытая циркумбинарная планета Кеплер-16b обращается вокруг двух звезд главной последовательности (Дойл и др., 2011). Хотя она и находится в опасной близости к хаотической области вокруг двойной, Кеплер-16b выживает, будучи в безопасности в области, ограниченной неустойчивыми резонансами 5/1 и 6/1 с двойной (Попова и Шевченко, 2013). Вероятно, планета Кеплер-16b (так же как и другие недавно открытые циркумбинарные планеты) испытала миграцию извне, так как формирование *in situ* проблематично из-за условий, враждебных для аккреции планетезималей, в частности из-за высоких столкновительных скоростей и низкой концентрации планетезималей (Мескиари, 2012; Пардекопер и др., 2012).

Особого упоминания заслуживает разработка метода TTV (Transit Timing Variations) и исследования, проводимые с его помощью. Транзитная планета, испытывающая возмущения от другой планеты, проходит по диску родительской звезды нерегулярно во времени. Колебания ее орбитальных элементов вызывают изменения времени прохождения относительно

строгопериодического сигнала. Путем моделирования TTV можно получить важную информацию о массах и орбитальных свойствах транзитных и возмущающих планет. Исторически вначале была разработана теория TTV (см., например, Агол и др., 2005; Хольман и Мюррей, 2005; Несворный, 2009; Несворный и Божé, 2010), а впоследствии, с ростом числа открытий внесолнечных планет в транзитных обзорах (обзоре с КА Кеплер в первую очередь), метод TTV стал реальностью. Первые TTV были обнаружены в мультипланетных системах (Лиссауэр и др., 2011), и они позволили Лиссауэру и др. (1) подтвердить, что планетные «кандидаты» являются реальными планетами, и (2) определить их массы. Недавно из анализа TTV-сигнала транзитного компаньона этим методом впервые была открыта и охарактеризована нетранзитная планета (Несворный и др., 2012). TTV-анализ возрождает славные времена небесной механики, когда Леверрье предсказал существование и положение Нептуна из анализа аномалий движения Урана. «Чудо» Леверрье стало в наше время обыденным явлением.

Вернемся теперь к нашей старой доброй Солнечной системе. За время, прошедшее с 2001 года, новые открытия глубоко преобразили наши знания о ней и породили новые динамические исследования. Резко возросло число известных астероидов. В 2000 году было известно приблизительно 100000 астероидов, теперь же — более чем полмиллиона. Это накопление наблюдательных данных позволило астрономам отождествить много семейств астероидов (групп астероидов, порожденных ударной дезинтеграцией родительского тела) и охарактеризовать их орбитальную структуру. Теперь семейства проявляют себя в пространстве собственных элементов не как размытые «облака», а как четкие и интригующие особенности. Спектральные обзоры (например, SDSS и WISE) позволили выяснить связи физических свойств со свойствами орбит, и это оказалось полезным для обоснования, что некоторые аномальные орбитальные структуры действительно относятся к семействам, а не вызваны «чужаками». Анализ этих структур позволил продемонстрировать, что давно уже предсказанный «эффект Ярковского» (он упомянут в разделе 11.3.1) реален и играет существенную роль. Данный эффект состоит в дрейфе вращающегося тела по большой полуоси его орбиты, вызываемом анизотропным тепловым переизлучением поглощаемых телом фотонов. Первоначально он был предсказан в 19-ом столетии Иваном Ярковским, а впоследствии возродился в работах Дэвида Рубинкама и Паоло Фаринеллы (Рубинкам, 1995; Фаринелла и др., 1998). Однако то, что эффект Ярковского определяет распределение астероидов, было показано только в 2001 году в работе Боттке и др., которые проана-

лизировали и воспроизвели орбитальную структуру семейства Корониды. С тех пор эффект Ярковского изучается на основе данных о семействах. Показано, что взаимодействие дрейфа по большой полуоси, вызываемого эффектом Ярковского, и вековых резонансов может приводить как к прохождению резонансов (см., например, Боттке и др., 2001), так и к захвату в них (см., например, Вокроулицкий и др., 2006а). В обоих случаях влияние на итоговые орбиты оказывается явным и индивидуальным. Кроме того, с течением времени определяемая эффектом Ярковского эволюция накладывает характерный отпечаток на распределение астероидов семейства по большой полуоси, зависящий от их физических размеров; этот эффект, должным образом изученный, стал стандартным инструментом оценивания возрастов семейств с хорошей точностью (см., например, Вокроулицкий и др., 2006б; Боттке и др., 2007). Определить возраст более точно можно только для очень молодых семейств, что достигается путем фиксирования момента апсидального и узлового выравнивания орбит в ходе интегрирования назад по времени (см. Несворный и др., 2002).

Параллельно с тем, как изучался эффект Ярковского, была установлена важная роль YORP-эффекта. Этот эффект, названный по инициалам первооткрывателей (Yarkovsky–O’Keefe–Radzievskii–Paddack), заложивших основы для его понимания, влияет на вращательную динамику несферических тел, изменяя скорость и наклон оси вращения. В этой книге вращательная динамика была затронута лишь вкратце (см. раздел 7.4), главным образом в отношении эволюции осей вращения планет земной группы. Вращательная динамика астероидов, испытывающих YORP-эффект, оказалась очень богатой. Вокроулицкий и др. (2003) нашли, что астероиды могут быть захвачены в вековой спин-орбитальный резонанс (резонанс между частотой прецессии оси вращения и узловой частотой орбиты) и эволюционировать ко второму состоянию Кассини (Коломбо, 1966). Этим объясняется наблюдательный факт (Сливан, 2002), что многие астероиды семейства Корониды имеют сходные направления осей вращения. Интересно, что подобный же резонанс (между частотой прецессии оси вращения Сатурна и частотой узловой прецессии Нептуна), по-видимому, ответственен за наклон оси Сатурна (Гамильтон и Уард, 2004; Уард и Гамильтон, 2004; Буэ и др., 2009). Конечно, в последнем случае действует не YORP-эффект, а, скорее всего, медленное изменение узловой частоты Нептуна из-за миграции планеты (см. ниже) или потери массы поясом Койпера.

Благодаря этим исследованиям возродилась теория адиабатического захвата в резонанс и прохождения резонанса. Данная теория не нова (см., на-

пример, Нейштадт, 1975), и о ней в книге не говорилось (кроме как вкратце в разделе 9.4 о модулированном маятнике), — и только потому, что полный обзор приложений адиабатических инвариантов в небесной механике уже был опубликован ранее (Анрар, 1993). Однако до 2000 года исследования адиабатического захвата в резонанс касались главным образом спин-орбитальных резонансов и резонансов средних движений. Только когда появились указанные выше задачи, предметом изучения в небесной механике стало и адиабатическое взаимодействие с вековыми резонансами.

Другая тема, которая почти не рассматривалась в книге, и тоже не новая, — движение комет и, в более широком контексте, возмущенное сильно-эксцентрическое движение. В реальных системах такое движение, как правило, хаотично, даже когда отсутствуют близкие столкновения с возмущающими телами; фундаментальной причиной для кометного хаоса является аккумуляция резонансов  $n:1$  между орбитальными частотами «планеты» (внутреннего возмущающего тела) и «кометы» (пробной частицы) вблизи параболической траектории, которая играет роль сепаратрисы, разделяющей ограниченные (эллиптические) и неограниченные (гиперболические) движения. Впервые это показали Петроски (1986) и Чириков и Вечеславов (1986); для описания хаотического движения комет на возмущенных почти параболических орбитах они вывели специальное двумерное сохраняющее площадь отображение. Главная цель состояла в том, чтобы качественно охарактеризовать движение кометы Галлея в ожидании ее очередного возвращения в 1987 году. Аналогично тому как вращение Гипериона стало первым наблюдаемым примером хаотического *вращательного* движения в Солнечной системе, движение кометы Галлея послужило первым наблюдаемым примером хаотического *орбитального* движения, как следовало из анализа исторических хроник ее явлений, выполненного Чириковым и Вечеславовым (1986, 1989). Выведенное отображение было впоследствии названо кеплеровым, поскольку его вторая строка выражает третий закон Кеплера. Основное модельное предположение состояло в том, что главный возмущающий эффект планеты сконцентрирован при нахождении кометы вблизи перигелия ее орбиты. Использование современных версий кеплерова отображения позволяет охарактеризовать эффекты хаотической диффузии в динамике комет и метеорных потоков (Емельяненко, 1992; Лиу и Сан, 1994; Емельяненко и Бейли, 1998; Малышкин и Тремейн, 1999; Жоу и Сан, 2001; Жоу и др., 2000, 2002).

Кеплерово отображение принадлежит к классу обобщенных сепаратрисных отображений (Шевченко, 2010). Классические сепаратрисные



отображения (Чириков, 1979) — эффективный инструмент для анализа движения в хаотических слоях, образуемых расщепленными сепаратрисами нелинейных резонансов (Пифтанкин и Трещев, 2007), и их теория может использоваться для оценивания ляпуновских и диффузионных времен в хаотических слоях (Шевченко, 2011) в тех случаях, когда стандартное отображение, описывающее бесконечный мультиплет равноотстоящих друг от друга резонансов одинаковой ширины, как модель неприменимо. (Оценки на основе теории стандартного отображения описаны в разделе 12.3 этой книги.)

Еще одна классическая тема, не нашедшая отражения в книге, — орбитальная и вращательная динамика спутников планет, демонстрирующая разнообразие интересных типов динамического поведения, включая исторически первый случай предсказанного и непосредственно наблюдавшегося хаотического движения, а именно хаотического вращения Гипериона — 7-го спутника Сатурна (Уиздом и др., 1984; Харбисон и др., 2011). Гиперион остается единственным примером наблюдаемого хаотического вращения в Солнечной системе; второй предполагаемый пример (Нереида) не был подтвержден (Доброволскис, 1995; Хессельброк и др., 2013; Тераи и Ито, 2013). Путем массового анализа устойчивости возможных вращательных состояний спутников планет (определяемой положением на плоскости «инерционный параметр — эксцентриситет орбиты») Мельников и Шевченко (2010) показали, что, хотя подавляющая часть спутников с известными вращательными состояниями находится в синхронном спин-орбитальном резонансе, более чем 60% всех спутников с неизвестными состояниями находятся в иной (быстрой или, что менее вероятно, хаотической) моде вращения.

Что касается резонансной орбитальной динамики планетных спутников, многие из них образуют резонансные или околорезонансные орбитальные конфигурации. В спутниковой системе Юпитера галилеевы спутники Ио и Европа, как и Европа и Ганимед, находятся в резонансе средних движений  $2/1$ ; таким образом, система этих трех спутников вовлечена в трехтельный резонанс  $4:2:1$  (резонанс Лапласа). В системе Сатурна Мимас и Тетфия, как и Энцелад и Диона, находятся в резонансе средних движений  $2/1$ , Диона и Рея близки к резонансу  $5/3$ , Титан и Гиперион находятся в резонансе  $4/3$ . В системе Урана все резонансы приблизительные: Миранда и Умбриэль близки к резонансу  $3/1$ , Ариэль и Умбриэль —  $5/3$ , Умбриэль и Титания —  $2/1$ , Титания и Оберон —  $3/2$ . Захваты спутниковых систем в орбитальные резонансы представляют собой естественные стадии приливной

эволюции этих небесномеханических систем. Особенно интересно, что движение системы «Прометей–Пандора» (16-ого и 17-ого спутников Сатурна — спутников-пастухов кольца F) является хаотическим, что следует как из наблюдений, так и из теории. Ляпуновское время этой системы, находящейся в резонансе средних движений 121/118, было оценено как численно-экспериментально, так и аналитически; оказалось, что оно составляет всего лишь  $\approx 3$  года (Голдрайх и Раппапорт, 2003; Шевченко, 2008). Отметим, что в отличие от других примеров наблюдаемого хаоса в Солнечной системе здесь наличие хаоса было выявлено сперва из наблюдений и лишь затем объяснено теоретически. Общие обзоры динамики планетных спутников даны Пилом (1976, 1986, 1999); теоретическое введение и интересные факты можно дополнительно найти в статье Мальхотры (1998).

Согласно главе 12, двухтельные и трехтельные резонансы средних движений определяют динамическую структуру пояса астероидов; более того, динамическое взаимодействие астероидных семейств с трехтельными резонансами и двухтельными резонансами высоких порядков является важным фактором в транспортировке астероидов. Примером служат диффузионные процессы в семействе (490) Веритас, протекающие благодаря резонансу (5, -2, -2) (Качучо и др., 2010). Недавно Смирнов и Шевченко (2013) выполнили массовое отождествление астероидов главного пояса в двухтельных и трехтельных резонансах с планетами: для астероидов из базы AstDyS<sup>2</sup> (примерно четверть миллиона объектов) были проведены расчеты траекторий и поведения резонансных аргументов во времени; как оказалось, астероиды в чистых трехтельных резонансах до 6-ого порядка включительно составляют приблизительно 1 % от всех объектов в хорошем согласии с более ранней оценкой Несворного и Морбиделли (1998), сделанной на основе выборки из нескольких сотен астероидов. Современный атлас двухтельных резонансов средних движений в поясе астероидов составлен Галлардо (2006).

Современные наблюдательные открытия не просто завершили картину пояса астероидов: они буквально революционизировали наши познания о Солнечной системе в целом благодаря открытию новых популяций (троянецов Нептуна, нерегулярных спутников планет-гигантов) и описанию пояса Койпера. Когда эта книга вышла из печати, было известно менее трехсот объектов пояса Койпера, причем лишь у менее ста из них орбиты были определены относительно точно (см. рис. 4). На сегодня известно уже  $\approx 1000$  транснептуновых объектов с хорошо определенными орбитами. В итоге компоненты и характеристики пояса Койпера предьявлены нам во

<sup>2</sup>Сайт AstDyS: <http://hamilton.dm.unipi.it/cgi-bin/astdys/>

всем их разнообразии: сосуществование нескольких населений (холодное, горячее, резонансное, рассеянное, удаленное; объяснение терминологии см. в статье Глэдмана и др., 2008), его внешняя граница (зависящая от рассматриваемого населения), дефицит массы, корреляции между физическими и орбитальными свойствами (см. обзор в статье Морбиделли и Брауна, 2004). Исправление наблюдаемой статистики за эффекты селекции показало, что резонанс  $5/2$  с Нептуном населен даже больше, чем резонанс  $3/2$  (Глэдман и др., 2012).

Наблюдательный бум в исследованиях пояса Койпера имел еще одно радикальное следствие: число планет Солнечной системы формально уменьшилось до восьми, когда в 2006 году решением 26-й Генеральной Ассамблеи МАС в Праге Плутон был отнесен к новому классу небесных тел — классу карликовых планет (к которому были отнесены также крупные астероиды типа Цереры). Главной причиной для такого решения стало открытие крупных тел в поясе Койпера, в частности объекта более крупного, чем Плутон, а именно Эриды (Eris), диаметр которой больше диаметра Плутона на  $\approx 10\%$ .

Интересно, что поток новой информации о поясе Койпера не породил многих новых динамических исследований в сравнении с уже обсуждавшимися в этой книге. Причина состоит в том, что динамика пояса Койпера относительно проста. Но зато эта новая информация дала старт численным экспериментам по массовому моделированию формирования и ранней эволюции Солнечной системы — с целью выяснения, какие процессы, уже не работающие сейчас, придали поясу ту сложную структуру, которой он в итоге обладает.

До 2001 года попытки моделирования примордиального формирования пояса Койпера основывались на простой концепции радиальной миграции Нептуна, вызываемой его взаимодействием с примордиальным планетезимальным диском (Фернандес и Ип, 1984; Мальхотра, 1993, 1995). В прошедшем десятилетии был развит намного более сложный сценарий. Стало ясно, что для объяснения всех особенностей пояса Койпера и Солнечной системы в целом необходимо учитывать глобальную динамическую неустойчивость системы планет-гигантов, описываемую, например, в так называемой «Nice-модели» (Тсиганис и др., 2005; Гомес и др., 2005; Морбиделли и др., 2007; Левисон и др., 2011). Концепция неустойчивости планет-гигантов также проявила себя как наилучшее объяснение для больших эксцентриситетов орбит внесолнечных планет-гигантов (см., например, Джурич и Тремейн, 2008; Чаттерджи и др., 2008). Это дает единое представ-

ление об эволюции нашей Солнечной системы и эволюции внесолнечных систем (см. обсуждение в работе Морбиделли, 2013).

Здесь, однако, мы покидаем почву «традиционной» небесной механики, если под ней подразумевать исследования динамики в математически строгих задачах, подобных всем рассмотренным в этой книге. Когда мы исследуем происхождение планетной системы, главная трудность состоит не в том, чтобы изучить ее динамику: это можно сделать путем применения «грубой вычислительной силы». Реальный вызов состоит в том, чтобы понять, какой система была изначально и каковы главные ингредиенты, которые следует включать в упрощенную модель. Тогда эволюцию системы можно рассчитывать численно (аналитические модели здесь редко применимы), чтобы проверить, эволюционирует ли постулируемая начальная система естественным образом к финальной, имеющей желаемые характеристики, например воспроизводящие наблюдаемую структуру Солнечной системы. Обычно исследуемые системы имеют очень много степеней свободы: например, включаются все планеты (или даже еще более многочисленный набор протопланет) и большая популяция массивных планетезималей; иногда учитывается влияние газовой составляющей протопланетного диска, при этом используются уравнения гидродинамики. Научный язык смещается здесь от языка гамильтоновой динамики к языку статистической механики. Мы вправе сказать, что это уже более не небесная механика, а *динамическая планетная наука* (где объект более важен, чем сама динамика): актуальная тема для совершенно новой книги.

## Литература

- Агол и др. (2005)* Agol, E., Steffen, J., Sari, R., and Clarkson, W. (2005) On detecting terrestrial planets with timing of giant planet transits. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 359, 567.
- Анрап (1993)* Henrard, J. (1993) The adiabatic invariant in classical mechanics. In: *Dynamics Reported*. Jones, C.K.R.T., et al. (Eds.) Springer: Berlin. P. 117.
- Барнес (2008)* Barnes, R. (2008) Dynamics of multiple planet systems. In: *Exoplanets: Detection, Formation, Properties, Habitability*. Mason, J.W. (Ed.). Springer: Berlin. P. 177.
- Барнес и Гринберг (2006)* Barnes, R., and Greenberg, R. (2006) Extrasolar planetary systems near a secular separatrix. *Astrophys. J.*, 638, 478.
- Барнес и др. (2011)* Barnes, R., Greenberg, R., Quinn, T.R., McArthur, B.E., and Benedict, G.F. (2011) Origin and dynamics of the mutually inclined orbits of Upsilon Andromedae c and d. *Astrophys. J.*, 726, 71.

- Батыгин и Морбиделли (2013a)* Batygin, K., and Morbidelli, A. (2013a) Analytical treatment of planetary resonances. ArXiv: 1305.6513.
- Батыгин и Морбиделли (2013b)* Batygin, K., and Morbidelli, A. (2013b) Dissipative divergence of resonant orbits. *Astron. J.*, 145, 1.
- Батыгин и др. (2009)* Batygin, K., Laughlin, G., Meschiari, S., Rivera, E., Vogt, S., and Butler, P. (2009) A quasi-stationary solution to Gliese 436b's eccentricity. *Astrophys. J.*, 699, 23.
- Божэ и др. (2005)* Beaugé, C., Callegari, N., Ferraz-Mello, S., and Michtchenko, T.A. (2005) Resonances and stability of extra-solar planetary systems. In: *Dynamics of Populations of Planetary Systems, Proceedings of IAU Colloquium 197*. Knežević, Z., and Milani, A. (Eds.). Cambridge Univ. Press: Cambridge. P. 3.
- Боттке и др. (2001)* Bottke, W.F., Vokrouhlický, D., Brož, M., Nesvorný, D., and Morbidelli, A. (2001) Dynamical spreading of asteroid families by the Yarkovsky effect. *Science*, 294, Issue 5547, p. 1693.
- Боттке и др. (2007)* Bottke, W.F., Vokrouhlický, D., and Nesvorný, D. (2007) An asteroid breakup 160 Myr ago as the probable source of the K/T impactor. *Nature*, 449, Issue 7158, p. 48.
- Брассер (2002)* Brasser, R. (2002) Hill stability of a triple system with an inner binary of large mass ratio. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 332, 723.
- Буэ и др. (2009)* Boué, G., Laskar, J., and Kuchynka, P. (2009) Speed limit on Neptune migration imposed by Saturn tilting. *Astrophys. J. Letters*, 702, L19.
- ван Ларховен и Гринберг (2012)* Van Laerhoven, C., and Greenberg, R. (2012) Characterizing multi-planet systems with classical secular theory. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 113, 215.
- Ванг и др. (2012)* Wang, S., Ji, J., and Zhou, J.-L. (2012) Predicting the configuration of a planetary system: KOI-152 observed by Kepler. *Astrophys. J.*, 753, 170.
- Верас и Армитадж (2004)* Veras, D., and Armitage, P.J. (2004) The dynamics of two massive planets on inclined orbits. *Icarus*, 172, 349.
- Вокроулицкий и др. (2006a)* Vokrouhlický, D., Brož, M., Bottke, W.F., Nesvorný, D., and Morbidelli, A. (2006a) The peculiar case of the Agnia asteroid family. *Icarus*, 183, 349.
- Вокроулицкий и др. (2006b)* Vokrouhlický, D., Brož, M., Bottke, W.F., Nesvorný, D., and Morbidelli, A. (2006b) Yarkovsky/YORP chronology of asteroid families. *Icarus*, 182, 118.
- Вокроулицкий и др. (2003)* Vokrouhlický, D., Nesvorný, D., and Bottke, W.F. (2003) The vector alignments of asteroid spins by thermal torques. *Nature*, 425, Issue 6954, 147.
- Ву и Литвик (2011)* Wu, Y., and Lithwick, Y. (2011) Secular chaos and the production of hot Jupiters. *Astrophys. J.*, 735, 109.
- Ву и Мюррей (2003)* Wu, Y., and Murray, N. (2003) Planet migration and binary companions: The case of HD 80606b. *Astrophys. J.*, 589, 605.

- Галлардо (2006)* Gallardo, T., 2006. Atlas of the mean motion resonances in the Solar System. *Icarus*, 184, 29.
- Гамильтон и Уард (2004)* Hamilton, D.P., and Ward, W.R. (2004) Tilting Saturn. II. Numerical model. *Astron. J.*, 128, 2510.
- Глэдман (1993)* Gladman, B. (1993) Dynamics of systems of two close planets. *Icarus*, 106, 247.
- Глэдман и др. (2012)* Gladman, B., Lawler, S.M., Petit, J.-M., et al. (2012) The resonant trans-Neptunian populations. *Astron. J.*, 144, 23.
- Глэдман и др. (2008)* Gladman, B., Marsden, B.G., and Van Laerhoven, C. (2008) Nomenclature in the outer Solar System. In: *The Solar System Beyond Neptune*. Barucci, M.A., Boehnhardt, H., Cruikshank, D.P., and Morbidelli, A. (Eds.). Univ. of Arizona Press: Tucson. P. 3.
- Голдрейх и Ратнапорт (2003)* Goldreich, P., and Rappaport, N. (2003) Chaotic motions of Prometheus and Pandora. *Icarus*, 162, 391.
- Гомес и др. (2005)* Gomes, R., Levison, H.F., Tsiganis, K., and Morbidelli, A. (2005) Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. *Nature*, 435, Issue 7041, 466.
- Гоздзиевский (2003)* Goździewski, K. (2003) Stability of the HD 12661 planetary system. *Astron. Astrophys.*, 398, 1151.
- Гоздзиевский и др. (2013)* Goździewski, K., Słonina, M., Migaszewski, C., and Rozenkiewicz, A. (2013) Testing a hypothesis of the  $\nu$  Octantis planetary system. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 430, 533.
- Гринберг и ван Ларховен (2012)* Greenberg, R., and Van Laerhoven, C. (2012) Aligned major axes in a planetary system without tidal evolution: the 61 Virginis example. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 419, 429.
- Гуццо (2006)* Guzzo, M. (2006) The web of three-planet resonances in the outer Solar System. II. A source of orbital instability for Uranus and Neptune. *Icarus*, 181, 475.
- Дек и др. (2012)* Deck, K.M., Holman, M.J., Agol, E., et al. (2012) Rapid dynamical chaos in an exoplanetary system. *Astrophys. J.*, 755, L21.
- Делиль и др. (2012)* Delisle, J.-B., Laskar, J., Correia, A.C.M., and Boué, G. (2012) Dissipation in planar resonant planetary systems. *Astron. Astrophys.*, 546, A71.
- Джурич и Тремейн (2008)* Jurić, M., and Tremaine, S. (2008) Dynamical origin of extrasolar planet eccentricity distribution. *Astrophys. J.*, 686, 603.
- Доброволскис (1995)* Dobrovolskis, A. (1995) Chaotic rotation of Nereid? *Icarus*, 118, 181.
- Доннисон (2006)* Donnison, J.R. (2006) The Hill stability of a binary or planetary system during encounters with a third inclined body. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 369, 1267.
- Доил и др. (2011)* Doyle, L.R., Carter, J.A., Fabrycky, D.C., et al. (2011) Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet. *Science*, 333, 1602.

- Дункан и др. (1989)* Duncan, M., Quinn, T., and Tremaine, S. (1989) The long-term evolution of orbits in the solar system — a mapping approach. *Icarus*, 82, 402.
- Дюкеннуа и Мейор (1991)* Duquennoy, A., and Mayor, M. (1991) Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood. II — Distribution of the orbital elements in an unbiased sample. *Astron. Astrophys.*, 248, 485.
- Емельяненко (1992)* Emelyanenko, V.V. (1992) Dynamics of periodic comets and meteor streams. *Celest. Mech. Dyn. Astron.* 54, 91.
- Емельяненко и Бейли (1998)* Emelyanenko, V.V., and Bailey, M.E. (1998) Capture of Halley-type comets from the near-parabolic flux. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 298, 212.
- Жоу и Сан (2001)* Zhou, J.L., and Sun, Y.S. (2001) Lévy flights in comet motion and related chaotic systems. *Phys. Lett. A*, 287, 217.
- Жоу и др. (2000)* Zhou, J.L., Sun, Y.S., Zheng, J.Q., and Valtonen, M.J. (2000) The transfer of comets from near-parabolic to short-period orbits: map approach. *Astron. Astrophys.*, 364, 887.
- Жоу и др. (2002)* Zhou, J., Sun, Y., and Zhou, L. (2002) Evidence for Lévy random walks in the evolution of comets from the Oort cloud. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 84, 409.
- Иннанен (1997)* Innanen, K.A. (1997) The Kozai mechanism and the stability of planetary orbits in binary star systems. *Astron. J.*, 113, 1915.
- Каллегарри и др. (2006)* Callegari, N. Jr., Ferraz-Mello, S., and Michtchenko, T.A. (2006) Dynamics of two planets in the 3/2 mean-motion resonance: Application to the planetary system of the pulsar PSR B1257+12. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 94, 381.
- Каллегарри и др. (2004)* Callegari, N. Jr., Michtchenko, T.A., and Ferraz-Mello, S. (2004) Dynamics of two planets in the 2/1 mean-motion resonance. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 89, 201.
- Качучо и др. (2010)* Cachucho, F., Cincotta, P.M., and Ferraz-Mello, S. (2010) Chirikov diffusion in the asteroidal three-body resonance (5, -2, -2). *Celest. Mech. Dyn. Astron.* 108, 35.
- Квиллен (2011)* Quillen, A.C. (2011) Three-body resonance overlap in closely spaced multiple-planet systems. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 418, 1043.
- Коломбо (1966)* Colombo, G. (1966) Cassini's second and third laws. *Astron. J.*, 71, 891.
- Коррейя и др. (2009)* Correia, A.C.M., Udry, S., Mayor, M., et al. (2009) The HARPS search for southern extra-solar planets. XVI. HD 45364, a pair of planets in a 3:2 mean motion resonance. *Astron. Astrophys.* 496, 521.
- Коррейя и др. (2013)* Correia, A.C.M., Boué, G., Laskar, J., and Morais, M.H.M. (2013) Tidal damping of the mutual inclination in hierarchical systems. *Astron. Astrophys.*, 553, A39.
- Ласкар (1990)* Laskar, J. (1990) The chaotic motion of the solar system. — A numerical estimate of the size of the chaotic zones. *Icarus*, 88, 266.

- Ласкар (1994)* Laskar, J. (1994) Large-scale chaos in the solar system. *Astron. Astrophys.*, 287, L9.
- Ласкар и Коррейя (2009)* Laskar, J., and Correia, A.C.M. (2009) HD 60532, a planetary system in a 3:1 mean motion resonance. *Astron. Astrophys.*, 496, L5.
- Ли и Пил (2003)* Lee, M.H., and Peale, S. (2003) Secular evolution of hierarchical planetary systems. *Astrophys. J.*, 592, 1201.
- Ли и др. (2006)* Lee, M.H., Butler, R.P., Fischer, D.A., Marcy, G.W., and Vogt, S.S. (2006) On the 2:1 orbital resonance in the HD 82943 planetary system. *Astrophys. J.*, 641, 1178.
- Лега и др. (2007)* Lega, E., Froeschlé, C., and Guzzo, M. (2007) Diffusion in Hamiltonian quasi-integrable system. In: *Topics in Gravitational Dynamics Solar, Extra-Solar and Galactic Systems. Lecture Notes in Physics*, v. 729. Benest, D., Froeschlé, C., and Lega, E. (Eds.). Springer: Berlin. P. 29.
- Левисон и др. (2011)* Levison, H.F., Morbidelli, A., Tsiganis, K., Nesvorný, D., and Gomes, R. (2011) Late orbital instabilities in the outer planets induced by interaction with a self-gravitating planetesimal disk. *Astron. J.*, 142, 152.
- Либер и Арнар (2007)* Libert, A.-S., and Henrard, J. (2007) Exoplanetary systems: The role of an equilibrium at high mutual inclination in shaping the global behavior of the 3-D secular planetary three-body problem. *Icarus*, 191, 469.
- Либер и Тсизанис (2009)* Libert, A.-S., and Tsiganis, K. (2009) Kozai resonance in extrasolar systems. *Astron. Astrophys.*, 493, 677.
- Либер и Тсизанис (2011)* Libert, A.-S., and Tsiganis, K. (2011) Formation of 3D multi-planet systems by dynamical disruption of multiple-resonance configurations. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 412, 2353.
- Лиссауэр и др. (2011)* Lissauer, J.J., Ragozzine, D., Fabrycky, D.C., Steffen, J.H., Ford, E.B., Jenkins, J.M., Shporer, A., Holman, M.J., Rowe, J.F., Quintana, E.V., Batalha, N.M., Borucki, W.J., Bryson, S.T., Caldwell, D.A., Carter, J.A., Ciardi, D., Dunham, E.W., Fortney, J.J., Gautier, T.N. III, Howell, S.B., Koch, D.G., Latham, D.W., Marcy, G.W., Morehead, R.C., and Sasselov, D. (2011) Architecture and dynamics of Kepler's candidate multiple transiting planet systems. *Astrophys. J. Suppl.*, 197, 8.
- Литвик и Ву (2011)* Lithwick, Y., and Wu, Y. (2011) Theory of secular chaos and Mercury's orbit. *Astrophys. J.*, 739, 31.
- Литвик и Ву (2012)* Lithwick, Y., and Wu, Y. (2012) Resonant repulsion of Kepler planet pairs. *Astrophys. J. Letters*, 756, L11.
- Литвик и Наоз (2011)* Lithwick, Y., and Naoz, S. (2011) The eccentric Kozai mechanism for a test particle. *Astrophys. J.*, 742, 94.
- Лью и Сан (1994)* Liu, J., and Sun, Y.S. (1994) Chaotic motions of comets in near-parabolic orbits: mapping approaches. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 60, 3.
- Ловис и др. (2011)* Lovis, C., Segransan, D., Mayor, M., Udry, S., Benz, W., Bertaux, J.-L., Bouchy, F., Correia, A.C.M., Laskar, J., Lo Curto, G., Mordasini, C.,



- Pepe, F., Queloz, D., and Santos, N.C. (2011) The HARPS search for southern extra-solar planets. XXVIII. Up to seven planets orbiting HD 10180: probing the architecture of low-mass planetary systems. *Astron. Astrophys.*, 528, 112.
- Мадрик и Ву (2006)* Mudryk, L.R., and Wu, Y. (2006) Resonance overlap is responsible for ejecting planets in binary systems. *Astrophys. J.*, 639, 423.
- Мальшикин и Тремейн (1999)* Malyshkin, L., and Tremaine, S. (1999) The Keplerian map for the restricted three-body problem as a model of comet evolution. *Icarus*, 142, 341.
- Мальхотра (1990)* Malhotra, R. (1990) Capture probabilities for secondary resonances. *Icarus*, 87, 249.
- Мальхотра (1993)* Malhotra, R. (1993) The origin of Pluto's peculiar orbit. *Nature*, 365, Issue 6449, 819.
- Мальхотра (1995)* Malhotra, R. (1995) The origin of Pluto's orbit: Implications for the Solar System beyond Neptune. *Astron. J.*, 110, 420.
- Мальхотра (1998)* Malhotra, R. (1998) Orbital resonances and chaos in the Solar system. In: *Solar System Formation and Evolution*, ASP Conf. Ser. 149. Lazzaro, D., Vieira Martins, R., Ferraz-Mello, S., Fernández, J., and Beaugé, C. (Eds.). Astron. Soc. of the Pacific: San Francisco. P. 57.
- Мардлинг (2007)* Mardling, R.A. (2007) Long-term tidal evolution of short-period planets with companions. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 382, 1768.
- Марти и др. (2013)* Martí, J.G., Giuppone, C.A., and Beaugé, C. (2013) Dynamical analysis of the Gliese-876 Laplace resonance. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 433, 928.
- Мартынова и др. (2005)* Мартынова, А.И., Орлов, В.В., и Соколов, Л.Л. (2005) Анализ окрестности резонанса 2:1 в задаче трех тел равных масс. *Письма Астрон. журн.* 31 (3), 234.
- Марцари и др. (2006)* Marzari, F., Scholl, H., and Tricarico, P. (2006) A numerical study of the 2:1 planetary resonance. *Astron. Astrophys.*, 453, 341.
- Маршалл (1990)* Marchal, C. (1990) *The Three-Body Problem*. Elsevier: Amsterdam.
- Матье и др. (2000)* Mathieu, R.D., Ghez, A.M., Jensen, E.L., and Simon, M. (2000) Young binary stars and associated disks. In: *Protostars and Planets IV*. Mannings, V., Boss, A.P., and Russell, S.S. (Eds.). Univ. Arizona Press: Tucson. P. 703.
- Мельников и Шевченко (2010)* Melnikov, A.V., and Shevchenko, I.I. (2010) The rotation states predominant among the planetary satellites. *Icarus*, 209, 786.
- Мескиари (2012)* Meschiari, S. (2012) Circumbinary planet formation in the Kepler-16 system. I. N-body simulations. *Astrophys. J.*, 752, 71.
- Мищенко и др. (2008a)* Michtchenko, T.A., Beaugé, C., and Ferraz-Mello, S. (2008a) Dynamic portrait of the planetary 2/1 mean-motion resonance — I. Systems with a more massive outer planet. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 387, 747.
- Мищенко и др. (2008b)* Michtchenko, T.A., Beaugé, C., and Ferraz-Mello, S. (2008b) Dynamic portrait of the planetary 2/1 mean-motion resonance — II. Systems with a more massive inner planet. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 391, 215.

- Мищенко и Мальхотра (2004)* Michtchenko, T.A., and Malhotra, R. (2004) Secular dynamics of the three-body problem: application to the upsilon Andromedae planetary system. *Icarus*, 168, 237.
- Морбиделли (2013)* Morbidelli, A. (2013) Dynamical evolution of planetary systems. In: *Planets, Stars and Stellar Systems*. Oswalt, T.D., French, L.M., and Kalas, P. (Eds.). Springer: Dordrecht. P. 63.
- Морбиделли и Браун (2004)* Morbidelli, A., and Brown, M.E. (2004) The Kuiper belt and the primordial evolution of the Solar System. In: *Comets II*. Festou, M.C., Keller, H.U., and Weaver, H.A. (Eds.). Univ. Arizona Press: Tucson. P.175.
- Морбиделли и др. (2007)* Morbidelli, A., Tsiganis, K., Crida, A., Levison, H.F., and Gomes, R. (2007) Dynamics of the giant planets of the Solar System in the gaseous protoplanetary disk and their relationship to the current orbital architecture. *Astron. J.*, 134, 1790.
- Наоз и др. (2011)* Naoz, S., Farr, W., Lithwick, Y., Rasio, F., and Teyssandier, J. (2011) Hot Jupiters from secular planet-planet interactions. *Nature*, 473, Issue 7346, 187.
- Нейштадт (1975)* Нейштадт А.И. (1975) Прохождение через сепаратрису в резонансной задаче с медленно изменяющимся параметром. *Прикл. мат. и мех.*, 39 (4), 621.
- Несворный (2009)* Nesvorný, D. (2009) Transit timing variations for eccentric and inclined exoplanets. *Astrophys. J.*, 701, 1116.
- Несворный и Божэ (2010)* Nesvorný, D., and Beaugé, C. (2010) Fast inversion method for determination of planetary parameters from transit timing variations. *Astrophys. J. Letters*, 709, L44.
- Несворный и др. (2002)* Nesvorný, D., Bottke, W.F. Jr., Dones, L., and Levison, H.F. (2002) The recent breakup of an asteroid in the main-belt region. *Nature*, 417, Issue 6890, 720.
- Несворный и др. (2012)* Nesvorný, D., Kipping, D.M., Buchhave, L.A., Bakos, G.A., Hartman, J., and Schmitt, A.R. (2012) The detection and characterization of a nontransiting planet by transit timing variations. *Science*, 336, Issue 6085, 1133.
- Пардекопер и др. (2012)* Paardekooper, S.-J., Leinhardt, Z.M., Thébault, T., and Baruteau, C. (2012) How not to build Tatooine: The difficulty of in situ formation of circumbinary planets Kepler 16b, Kepler 34b, and Kepler 35b. *Astrophys. J. Letters*, 754, L16.
- Папалоюцу и Теркем (2010)* Papaloizou, J.C.B., and Terquem, C. (2010) On the dynamics of multiple systems of hot super-Earths and Neptunes: tidal circularization, resonance and the HD 40307 system. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 405, 573.
- Пиш (1976)* Peale, S.J. (1976) Orbital resonances in the Solar system. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 14, 215.
- Пиш (1986)* Peale, S.J. (1986) Orbital resonances, unusual configurations and exotic rotation states among planetary satellites. In: *Satellites*. Burns, J.A., and Mathews, M.S. (Eds.). Univ. of Arizona Press: Tucson. P. 159.

- Пил (1999)* Peale, S.J. (1999) Origin and evolution of the natural satellites. *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 37, 533.
- Петроски (1986)* Petrosky, T.Y. (1986) Chaos and cometary clouds in the solar system. *Phys. Lett. A*, 117, 328.
- Пилат-Лохингер и Дворак (2002)* Pilat-Lohinger, E., and Dvorak, R. (2002) Stability of S-type orbits in binaries. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 82, 143.
- Пилат-Лохингер и др. (2003)* Pilat-Lohinger, E., Funk, B., and Dvorak, R. (2003) Stability limits in double stars – a study of inclined planetary orbits. *Astron. Astrophys.*, 400, 1085.
- Пифтанкин и Трещев (2007)* Пифтанкин, Г.Н., и Трещев, Д.В. (2007) Сепаратрисное отображение в гамильтоновых системах. *УМН*, 62 (2), 3.
- Попова и Шевченко (2013)* Попова, Е.А., and Shevchenko, I.I. (2013) Kepler-16b: safe in a resonance cell. *Astrophys. J.*, 769, 152.
- Райт и др. (2011)* Wright, J.T., Veras, D., Ford, E.B., et al. (2011) The California planet survey. III. A possible 2:1 resonance in the exoplanetary triple system HD 37124. *Astrophys. J.*, 730, 93.
- Робутель и Габерн (2006)* Robutel, P., and Gabern, F. (2006) The resonant structure of Jupiter's Trojan asteroids – I. Long-term stability and diffusion. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 372, 1463.
- Рубинкам (1995)* Rubincam, D.P. (1995) Asteroid orbit evolution due to thermal drag. *J. Geophys. Res.*, 100, 1585.
- Сливан (2002)* Slivan, S.M. (2002) Spin vector alignment of Koronis family asteroids. *Nature*, 419, Issue 6902, 49.
- Смирнов и Шевченко (2013)* Smirnov, E.A., and Shevchenko, I.I. (2013) Massive identification of asteroids in three-body resonances. *Icarus*, 222, 220.
- Такеда и Расио (2005)* Takeda, G., and Rasio, F.A. (2005) High orbital eccentricities of extrasolar planets induced by the Kozai mechanism. *Astrophys. J.* 627, 1001.
- Тераи и Ито (2013)* Terai, T., and Itoh, Y. (2013) High-precision measurements of the brightness variation of Nereid. *Publ. Astron. Soc. Japan*, 65, no. 2, article no. 46.
- Тсиганис и др. (2005)* Tsiganis, K., Gomes, R., Morbidelli, A., and Levison, H.F. (2005) Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. *Nature*, 435, Issue 7041, 459.
- Уард и Гамильтон (2004)* Ward, W.R., and Hamilton, D.P. (2004) Tilting Saturn. I. Analytic model. *Astron. J.*, 128, 2501.
- Уиздом и др. (1984)* Wisdom, J., Peale, S.J., and Mignard, F. (1984) The chaotic rotation of Hyperion. *Icarus*, 58, 137.
- Фабрички и др. (2012)* Fabrycky, D.C., Lissauer, J.J., Ragozzine, D., et al. (2012) Architecture of Kepler's multi-transiting systems: II. New investigations with twice as many candidates. *ArXiv: 1202.6328*.
- Фаринелла и др. (1998)* Farinella, P., Vokrouhlický, D., and Hartmann, W.K. (1998) Meteorite delivery via Yarkovsky orbital drift. *Icarus*, 132, 378.

- Фернандес и Ин (1984)* Fernández, J.A., and Ip, W.-H. (1984) Some dynamical aspects of the accretion of Uranus and Neptune: The exchange of orbital angular momentum with planetesimals. *Icarus*, 58, 109.
- Ферраз-Мелло и др. (2005)* Ferraz-Mello, S., Michtchenko, T., Beaugé, C., and Callegari, N. Jr. (2005) Extrasolar planetary systems. In: *Chaos and Stability in Planetary Systems*. Dvorak, R., Freistetter, F., and Kurths, J. (Eds.). *Lect. Notes Phys.*, 683. Springer: Heidelberg. P. 219.
- Форд и др. (2000)* Ford, E.B., Kozinsky, B., and Rasio, F.A. (2000) Secular evolution of hierarchical triple star systems. *Astrophys. J.*, 535, 385.
- Фрешиле и др. (2006)* Froeschlé, C., Lega, E., and Guzzo, M. (2006) Analysis of the chaotic behaviour of orbits diffusing along the Arnold web. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 95, 141.
- Хагизипоур и др. (2010)* Haghighipour, N., Dvorak, R., and Pilat-Lohinger, E. (2010) Planetary dynamics and habitable planet formation in binary star systems. In: *Planets in Binary Star Systems*. Haghighipour, N. (Ed.). Springer: Dordrecht. P. 285.
- Харбисон и др. (2011)* Harbison, R.A., Thomas, P.C., and Nicholson, P.C. (2011) Rotational modeling of Hyperion. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 110, 1.
- Хессельброк и др. (2013)* Hesselbrock, A.J., Alexander, S.G., Harp, T.W., and Abel, N.P. (2013) An investigation of the relationship between shape and rotation to explain the light curve of Nereid. *Astron. J.*, 145, 144.
- Хольман и Мюррей (2005)* Holman, M.J., and Murray, N.W. (2005) The use of transit timing to detect terrestrial-mass extrasolar planets. *Science*, 307, Issue 5713, 1288.
- Хольман и Вигерт (1999)* Holman, M.J., and Wiegert, P.A. (1999) Long-term stability of planets in binary systems. *Astron. J.*, 117, 621.
- Холшевников и Кузнецов (2011)* Kholshchevnikov, K.V., and Kuznetsov, E.D. (2011) Stability of planetary systems with respect to masses. *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 109, 201.
- Хэйес (2008)* Hayes, W.B. (2008) Surfing on the edge: chaos versus near-integrability in the system of Jovian planets. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 386, 295.
- Чаттерджи и др. (2008)* Chatterjee, S., Ford, E.B., Matsumura, S., and Rasio, F.A. (2008) Dynamical outcomes of planet-planet scattering. *Astrophys. J.*, 686, 580.
- Чириков (1979)* Chirikov, B.V. (1979) Universal instability of many-dimensional oscillator systems. *Phys. Rep.*, 52, 263.
- Чириков и Вечеславов (1986)* Chirikov, B.V., and Vecheslavov, V.V. (1986) Chaotic dynamics of comet Halley. INP Preprint 86-184. Institute of Nuclear Physics, Novosibirsk.<sup>3</sup>
- Чириков и Вечеславов (1989)* Chirikov, B.V., and Vecheslavov, V.V. (1989) Chaotic dynamics of comet Halley. *Astron. Astrophys.* 221, 146.

<sup>3</sup><http://www.quantware.ups-tlse.fr/chirikov/publbinp.html>

- Чинкотта и др. (2003)* Cincotta, P.M., Giordano, C.M., and Simó, C. (2003) Phase space structure of multi-dimensional systems by means of the mean exponential growth factor of nearby orbits. *Physica D*, 182, 151.
- Шевченко (2008)* Shevchenko, I.I. (2008) Adiabatic chaos in the Prometheus–Pandora system. *Month. Not. Roy. Astron. Soc.*, 384, 1211; 407, 704.
- Шевченко (2010)* Shevchenko, I.I. (2010) Hamiltonian intermittency and Lévy flights in the three-body problem. *Phys. Rev. E*, 81, 066216.
- Шевченко (2011)* Shevchenko, I.I. (2011) Lyapunov and diffusion timescales in the solar neighborhood. *Astrophys. J.*, 733, 39.
- Шидлиховский (1990)* Šidlichovský, M. (1990) The existence of a chaotic region due to the overlap of secular resonances  $\nu_5$  and  $\nu_6$ . *Celest. Mech. Dyn. Astron.*, 49, 177.