

На правах рукописи

Матвиенко Антон Сергеевич

**Динамика широких систем кратных звезд в
гравитационном поле Галактики**

01.03.01 – астрометрия и небесная механика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Санкт–Петербург – 2016

Работа выполнена в Санкт–Петербургском государственном университете.

Научный руководитель:

доктор физико–математических наук, профессор
Орлов Виктор Владимирович

Официальные оппоненты:

Расторгуев Алексей Сергеевич,
доктор физико–математических наук, профессор,
зав. Отделом изучения Галактики и переменных звезд Государственного астрономического института им. П.К. Штенберга МГУ им. М.В. Ломоносова

Вавилов Дмитрий Евгеньевич,
кандидат физико–математических наук,
научный сотрудник Лаборатории малых тел Солнечной системы Института прикладной астрономии РАН

Ведущая организация:

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина

Защита состоится „16“ мая 2017 г. в 15 ч. 30 м. на заседании диссертационного совета Д 212.232.15 при Санкт–Петербургском государственном университете по адресу: 198504, Санкт–Петербург, Старый Петергоф, Университетский пр., д. 28, ауд. 2143 (Математико–механический факультет).

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. М. Горького Санкт–Петербургского государственного университета по адресу: 199034, Санкт–Петербург, Университетская наб., 7/9 и на сайте <https://dissert.spbu.ru/dissert/soiskatelyu-uchjonoj-stepeni/dis-list/details/14/1217.html>

Автореферат разослан „ “ 2017 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат физико–математических наук

Миланова Ю.В.

Общая характеристика работы

Кратные звезды — системы, состоящие из трех или более звезд, которые на небесной сфере располагаются близко друг к другу. Если близость видимая (звезды вдоль луча зрения разнесены друг от друга на значительные расстояния, а в проекции на небесную сферу они находятся близко) — система называется оптической кратной. Если звезды находятся близко в трехмерном пространстве и гравитационно связаны, то система называется физической кратной. Если компоненты физической кратной системы могут быть разрешены (их можно увидеть по отдельности в оптический телескоп) — система называется визуальной кратной. Если же кратность звезды может быть определена только с помощью спектральных или фотометрических наблюдений, то она называется спектральной кратной или затменной кратной системой.

Кратные звезды также классифицируются по степени кратности. Тройные системы звезд, как правило, состоят из тесной двойной пары и их далекого спутника, который обращается вокруг пары, как вокруг единого тела. Например, тройной системой является двухкомпонентная α Centauri AB и удаленная от нее Proxima Centauri. Четырехкратные звезды довольно редки. Например, видимая в бинокль двойная звезда ϵ Лиры является визуально-четырехкратной системой. Пятикратные и шестикратные звезды встречаются исключительно редко. Одна из самых сложных систем — Кастор (α Близнецов), состоит из 6 звезд: далекий двойной спутник Кастор C вращается вокруг двух двойных звезд — Кастор A и Кастор B.

Диссертационная работа посвящена исследованию динамической эволюции широких кратных систем звезд. Рассматривались динамика системы α Centauri + Proxima, системы Кастор и динамика широких двойных систем в регулярном поле Галактики. Предложены и апробированы новые методы исследования динамической эволюции широких двойных систем с известными положениями, собственными движениями и лучевыми скоростями компонентов и метод численного исследования динамики широких двойных систем на космогонических временах в регулярном гравитационном поле Галактики. Разработанными методами получено, что по имеющимся наблюдательным данным система α Centauri + Proxima является неустойчивой. Для внешней двойной AB–C системы Кастор впервые получено семейство эллиптических орбит. Выявлена область устойчивости широких двойных систем в окрестности Солнца и впервые показано, что для систем с обратным вращением данная область состоит из двух частей. Также впервые получены зависимости формы и размеров области устойчивости движений широких двойных систем от галактоцентрического расстояния. Показано, что области устойчивости в классическом ньютоновском случае существенно отличаются по форме и структуре от областей в трех вариантах MOND, при этом варианты MOND согласуются между собой.

Актуальность работы

Кратные звезды широко распространены в окрестности Солнца. Среди них наблюдается значительное число широких систем, с расстояниями между компонентами, достигающими 30 000 а.е. Динамика таких систем представляет значительный интерес как с точки зрения звездной динамики, так и с позиций тестирования различных теорий гравитации. В литературе в последние годы появляется все больше работ, посвященных различным аспектам динамики широких систем в окрестности Солнца как в плане наблюдательных данных, так и в плане численного моделирования динамической эволюции таких систем с учетом внешних возмущающих факторов — поля Галактики и сближений с другими объектами Галактики.

Цели и задачи работы

Основной целью работы является исследование динамической эволюции широких кратных систем звезд в гравитационном регулярном поле Галактики. Для достижения поставленной цели были решены следующие частные задачи:

- определение орбитальных элементов внутренней и внешней двойных подсистем и исследование динамики визуальной тройной системы Кастор;
- разработка алгоритма, позволяющего изучать динамику широких кратных систем с известными индивидуальными положениями, собственными движениями и лучевыми скоростями компонентов в гравитационном поле Галактики;
- применение разработанного алгоритма для исследования динамики системы α Centauri + Proxima;
- разработка и применение алгоритма, позволяющего изучать динамическую эволюцию широких двойных систем в регулярном поле Галактики на космогонических временах;
- реализация разработанных методик для классической ньютоновской теории гравитации и для различных вариантов модифицированной ньютоновской динамики (MOND);
- изучение зависимости полученных результатов от галактоцентрического расстояния.

Научная новизна

- Впервые определено семейство эллиптических орбит для внешней двойной АВ–С в широкой визуальной тройной системе Кастор.

- Разработан новый метод исследования динамической эволюции широких двойных систем с известными индивидуальными положениями, собственными движениями и лучевыми скоростями компонентов в гравитационном поле Галактики.
- Применение метода к системе α Centauri + Proxima показало, что по имеющимся наблюдательным данным система является неустойчивой и распадается на интервале времени порядка 200 млн. лет — за это время компоненты отдаляются друг от друга на расстояние порядка 20 пк.
- Разработан новый метод численного исследования динамики широких двойных систем в регулярном поле Галактики на космогонических временах.
- Выявлена область устойчивости широких двойных систем в поле Галактики для окрестности Солнца; показано, что характерный размер этой области приблизительно равен приливному радиусу.
- Для двойных систем с обратным вращением впервые показано, что область устойчивых движений состоит из двух частей; вытянутое ответвление простирается приблизительно до 10 пк.
- Показано, что области устойчивости в классическом ньютоновском случае существенно отличаются по форме и структуре от областей устойчивости в различных вариантах MOND, при этом разные варианты MOND согласуются между собой.
- Впервые получены зависимости формы и размеров области устойчивости движений широких двойных систем от галактоцентрического расстояния.

Научная и практическая ценность

В диссертационной работе предложен алгоритм, позволяющий определить семейство орбит для широких двойных систем методом параметров видимого движения (ПВД) и оценить область устойчивости иерархических визуальных тройных систем.

Разработан метод изучения динамической эволюции широких двойных звезд с известными индивидуальными положениями, собственными движениями и лучевыми скоростями компонентов в гравитационном поле Галактики. Метод апробирован на системе α Centauri + Proxima.

Определены характеристики области устойчивости широких двойных систем в зависимости от расстояния до центра Галактики. Показано, что характерный размер этой области приблизительно равен радиусу Якоби. Для двойных систем с обратным вращением (обращение двойной происходит в направлении, противоположном

вращению Галактики) показано, что область устойчивых движений состоит из двух частей.

Полученные характеристики области устойчивости широких двойных систем в окрестности Солнца в рамках классической ньютоновской гравитации и в различных вариантах MOND существенно отличаются. Выявленные различия могут быть использованы для тестирования теории гравитации.

Результаты, выносимые на защиту

1. Впервые найдено семейство эллиптических орбит для внешней двойной подсистемы в иерархической визуальной тройной системе Кастор и сделана оценка области устойчивости для этой системы.
2. Показано, что при имеющихся наблюдательных данных широкая двойная α Centauri + Proxima разрушается во внешнем галактическом поле за характерное время порядка 200 млн. лет.
3. Получена зависимость характеристик области устойчивости широких двойных систем от расстояния до центра Галактики. А для двойных систем с обратным вращением показано, что область устойчивых движений состоит из двух частей.
4. Показано, что характеристики области устойчивости широких двойных систем в окрестности Солнца в различных вариантах MOND согласуются между собой, однако они существенно отличаются от классического ньютоновского случая.

Достоверность результатов

Достоверность результатов моделирования подтверждается согласием индивидуальных траекторий и характеристик областей устойчивости, полученных нами с использованием разных методов численного интегрирования. Достоверность также подтверждается качественным согласием с результатами других авторов, в сопоставимых случаях.

Апробация работы

Основные результаты работы неоднократно докладывались на семинаре Кафедры небесной механики СПбГУ.

Результаты работы докладывались на следующих конференциях:

1. Всероссийская научная конференция “Астрономия от ближнего космоса до космологических далей”, Москва, 25–30 мая, 2015.

2. “Binary systems, their evolution and environments”, Ulaan Baatar, Mongolia, 1-5 September, 2014.
3. Всероссийская астрономическая конференция “Многоликая Вселенная” (ВАК-2013), Санкт-Петербург, 23–27 сентября, 2013.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих статьях; из них 5 – в рецензируемых изданиях, рекомендуемых ВАК (статьи с номерами 1 – 4 и 6):

1. Матвиенко А.С., Орлов В.В. Движения в широких парах на разных галактоцентрических расстояниях. Письма в Астрон. журн. 2016. Т. 42. N 6. С. 399–407.
2. Матвиенко А.С., Кияева О.В., Орлов В.В. Динамика кратной системы Кастора. Письма в Астрон. журн. 2015. Т. 41. N 1–2. С. 47–56.
3. Матвиенко А.С., Орлов В.В. Ограниченность движений в широких парах в поле Галактики. Письма в Астрон. журн. 2015. Т. 41. N 6. С. 294–302.
4. Матвиенко А.С., Орлов В.В. Движения в широких парах в рамках MOND. Письма в Астрон. журн. 2015. Т. 41. N 12. С. 887–895.
5. Матвиенко А.С., Орлов В.В. Орбиты компонент широких двойных звезд в поле Галактики. Улугбековские чтения. Издательство Ташкентского ун-та. 2014. Т. 3. С. 91–94.
6. Matvienko A.S., Orlov V.V. Dynamic Status of the Wide Multiple System α Centauri+Proxima. *Astrophysical Bulletin*. 2014. V. 69. N 2. С. 205–210.

Результаты работы отражены в следующих тезисах и трудах конференций:

- (a) Жучков Р.Я., Кияева О.В., Орлов В.В., Малоголовец Е.В., Матвиенко А.С., Глухова А.В., Рубинов А.В., Балегга Ю.Ю., Бикмаев И.Ф. Динамика экзотических кратных звезд. Тезисы докладов Всероссийской астрономической конференции “Многоликая Вселенная”. Санкт-Петербург, 23 – 27 сентября 2013 г. Санкт-Петербург. 2013. С. 86.
- (b) Матвиенко А.С., Орлов В.В. Динамическая эволюция системы α Центавра. Тезисы докладов Всероссийской астрономической конференции “Многоликая Вселенная”. Санкт-Петербург, 23 – 27 сентября 2013 г. Санкт-Петербург. 2013. С. 179.

Личный вклад автора

В совместных работах диссертант принимал участие в постановке задач, им были проведены все численные эксперименты. Анализ и обсуждение результатов проводились авторами совместно.

Объем и структура диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. Общий объем диссертации 119 страниц. Диссертация содержит 11 таблиц и 63 рисунка. Список литературы включает 76 наименований.

Содержание диссертации

Во *введении* обосновывается актуальность работы. Описывается постановка целей и задач диссертации, научная новизна, научная и практическая ценность исследования. Формулируются результаты, выносимые на защиту, приводятся сведения о публикациях и апробации работы с указанием личного вклада автора, а также краткое содержание диссертации.

В *первой главе* представлен исторический обзор изучения кратных и двойных систем от Гершеля до наших дней. Описана история наблюдений широких двойных и кратных систем и история численно-экспериментальных и теоретических исследований.

Во *второй главе* исследованы орбитальные движения в визуальной тройной системе α Gem (Кастор). Определены элементы орбиты внутренней пары АВ методом параметров видимого движения (ПВД) по дуге с 1900–1949 год. Для использования орбиты в дальнейших вычислениях она уточнялась методом дифференциальных поправок по программе Токовина ORBITX (1992).

Таблица 1: Орбиты тесной пары АВ системы Кастора.

Элемент	Докобо и Коста	Де Роса и др.	Метод ПВД	ПВД+ORBITX
P , лет	444.95	466.8 ± 6.3	450 ± 84	453.6 ± 0.8
a , ''	6.593	6.78 ± 0.05	6.90 ± 0.80	6.69 ± 0.03
i , °	114.61	113.56 ± 0.09	114.6 ± 3.0	114.2 ± 0.2
ω , °	253.31	249.3 ± 0.6	245 ± 29	248.8 ± 0.5
T , год	1960.1	1957.3 ± 0.3	1954 ± 79	1958.1 ± 0.4
e	0.323	0.333 ± 0.007	0.33 ± 0.12	0.326 ± 0.002
Ω , °	41.46	41.2 ± 0.1	41.1 ± 3.0	40.3 ± 0.2

Где P – период, a – большая полуось, i – наклон орбиты, ω – долгота перицентра, T – время прохождения через перицентр, e – эксцентриситет, Ω – долгота восходящего узла.

В табл. 1 приведены полученные нами результаты и для сравнения элементы орбит, которые получены Докобо и Костой (1985) и Де Роса и др. (2012). Из таблицы видно, что метод ПВД дает удовлетворительные результаты.

Для внешней пары АВ–С методом ПВД по короткой дуге впервые построено семейство эллиптических орбит (см. рис. 1).

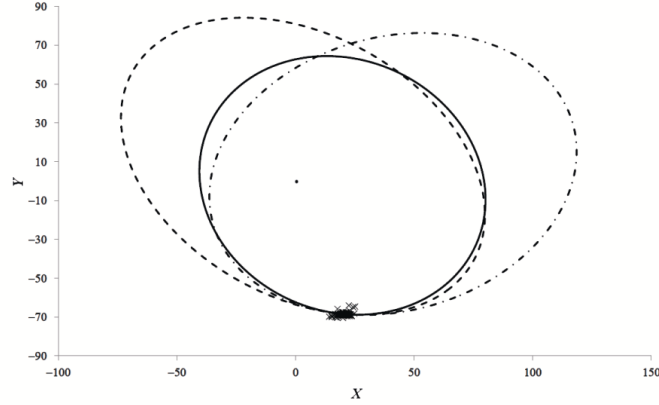


Рис. 1: Примеры орбит широкой пары АВ–С. Крестиками выделены наблюдения, сплошной линией показана орбита, соответствующая углу $\beta = 0^\circ$, прерывистой линией — орбита, соответствующая углу $\beta = -25^\circ.7$, прерывистой с точками — орбита, соответствующая углу $\beta = +25^\circ.7$ (β – угол между вектором \mathbf{r} и его проекцией на картинную плоскость). Центр масс пары АВ располагается в начале координат — точке $(0, 0)$.

Вероятно, движение компонентов в визуальной тройной системе Кастора представляет собой суперпозицию двух возмущенных эллиптических орбит. Оценена область устойчивости тройной системы с учетом внешнего приливного поля Галактики.

В *третьей главе* изучена динамика широкой кратной системы α Cen АВ и Proxima. Оценена полная энергия системы по имеющимся данным наблюдений о массах, координатах, собственных движениях и лучевых скоростях компонентов (см. табл. 2), ее значение положительное.

Таблица 2: Характеристики компонентов системы α Centauri.

Параметр	Proxima	Ошибка	α Centauri АВ	Ошибка
$\alpha_{1991.25}$, градусы	217.44894751	$3.6 \cdot 10^{-7}$	219.917533	$1.4 \cdot 10^{-5}$
$\delta_{1991.25}$, градусы	- 62.68135207	$4.2 \cdot 10^{-7}$	- 60.837128	$1.0 \cdot 10^{-5}$
π , мсд	772.3	2.4	742.1	1.4
μ_α , мсд/год	- 3775.6	1.5	-3643	12
μ_δ , мсд/год	768.2	1.8	697	9
V_r , км/с	- 21.8	0.2	-22.445	0.002
M , M_\odot	0.107	0.021	2.039	0.009

Где α – прямое восхождение, δ – склонение, π – параллакс, μ_α и μ_δ – собственное движение, V_r – лучевая скорость, M – масса.

Для учета влияния ошибок наблюдательных данных на результат реализован метод Монте–Карло. По $N = 10^6$ статистическим испытаниям показано, что с вероятностью около 90 % движение является гиперболическим, то есть α Cen AB и Proxima разойдутся через некоторое время на значительное расстояние друг от друга. Также выполнено численное моделирование динамической эволюции широкой пары α Cen AB и Proxima в регулярном поле Галактики. Модель потенциала Галактики была взята из статьи (Феллхауэр и др., 2006).

$$\Phi = \Phi_{halo} + \Phi_{disk} + \Phi_{bulge}, \quad (1)$$

$$\Phi_{halo} = \frac{v_0^2}{2} \ln(R^2 + \frac{z^2}{q_\phi^2} + d^2),$$

$$\Phi_{disk} = \frac{GM_d}{\sqrt{R^2 + (b + \sqrt{z^2 + c^2})^2}},$$

$$\Phi_{bulge} = \frac{GM_b}{r + a},$$

где R и z — цилиндрические координаты, а r — расстояние от центра Галактики; v_0 , d , q_ϕ — параметры гало (характеристики скорости, размера и сплюснутости); M_d , M_b — массы диска и балджа; b , c — характерные параметры длины и толщины диска; a — характерный размер балджа. Значения параметров модели приведены в табл. 3.

Таблица 3: Параметры модели потенциала Галактики.

Параметр	M_d, M_\odot	b , кпк	c , кпк	M_b, M_\odot	a , кпк	v_0 , км/с	q_ϕ	d , кпк
Значение	10^{11}	6.5	0.26	$3.4 \cdot 10^{10}$	0.7	186	1	12

Построена траектория относительного движения. Компоненты расходятся друг от друга на расстояние 20 пк за время порядка 200 млн. лет. Критическим параметром для определения динамического статуса системы является лучевая скорость компонента C (Proxima), известная с ошибкой 200 м/с. Поэтому был рассмотрен эффект вариации лучевой скорости Проксимы. Из рис. 2–3 видно, что при изменении значения V_r имеют место разные варианты эволюции системы. Сравнение рис. 2 и 3 показывает, что небольшое изменение скорости может привести к различным результатам: от квазиэллиптических движений (рис. 2) до разрушения системы (рис. 3).

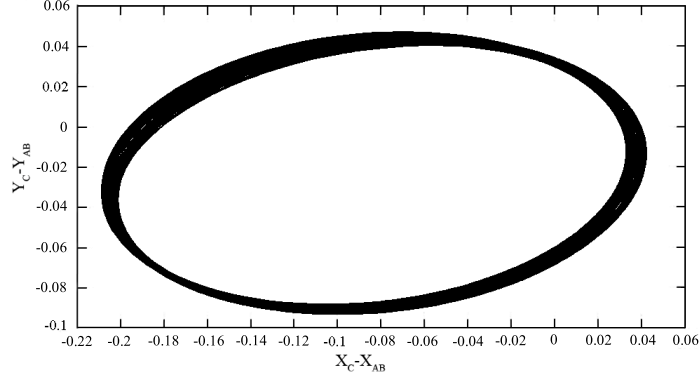


Рис. 2: Моделирование на время $t = 1.4 \cdot 10^9$ лет при $V_r = -22.0$ км/с в координатах компонента С относительно центра масс пары АВ.

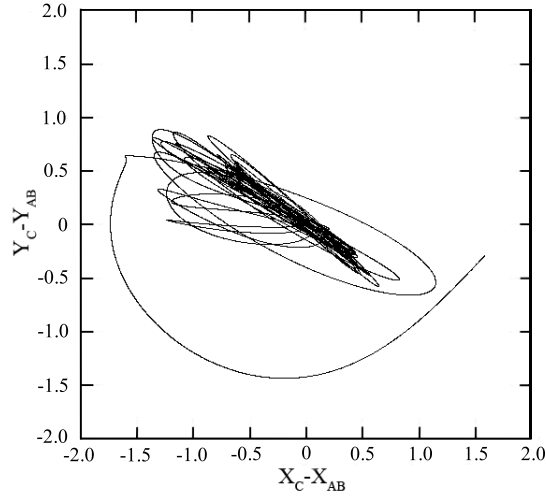


Рис. 3: Моделирование на время $t = 1.4 \cdot 10^9$ лет при $V_r = -21.853$ км/с в координатах компонента С относительно центра масс пары АВ.

С учетом того, что при малых вариациях в пределах ошибок возможны качественно различные сценарии динамической эволюции, для уверенного определения характера движений в этой системе необходимо уменьшение ошибки лучевой скорости Proxima Centauri по крайней мере на порядок.

В *четвертой главе* численно исследованы движения компонентов широких двойных звезд в регулярном гравитационном поле Галактики на временах $\sim 10^{10}$ лет на различных расстояниях R_0 от центра Галактики. Найдены области ограниченности движений компонентов в широких парах в зависимости от начальных условий: модуля относительной скорости компонентов, их взаимного расстояния и угла наклона вектора относительной скорости к плоскости Галактики. Показано, что форма и размеры областей существенно зависят от R_0 : с ростом R_0 размеры области начальных условий, соответствующих ограниченным движениям, возрастают. При углах накло-

на, близких к 90° , происходят сильные изменения эксцентриситета орбиты двойной системы, которые могут приводить к тесным сближениям звезд с перицентрическим расстоянием меньше 1 а.е. При обратных движениях (вращение двойной происходит в направлении, противоположном вращению Галактики) во всех случаях имеются вытянутые ответвления области ограниченных движений, в некоторых случаях простирающиеся по крайней мере до 10 пк (см. рис. 4).

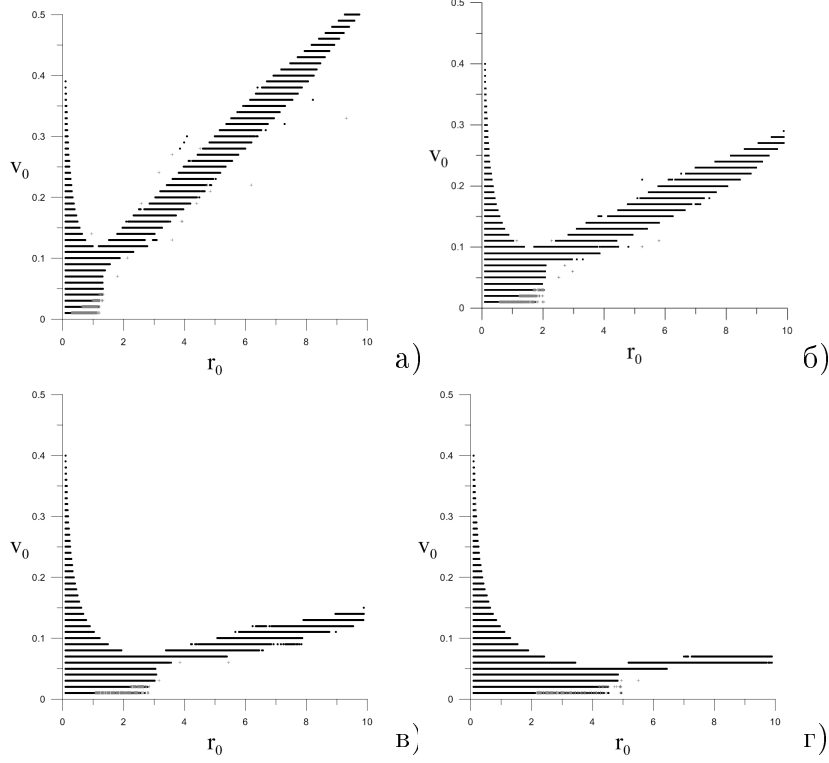


Рис. 4: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (крестики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 180^\circ$: а) $R_0 = 4$ кпк; б) $R_0 = 8$ кпк; в) $R_0 = 16$ кпк; г) $R_0 = 32$ кпк.

Вблизи центра Галактики учитывалось влияние бара. Для исследования эффекта бара нами была проведена серия численных экспериментов при $R_0 = 1, 2$ кпк. С одной стороны, рассматривалась модель ротационно-симметричного потенциала (1). С другой стороны, к модели (1) добавлен вращающийся бар массой $M_{\text{bar}} = 1.0 \cdot 10^9 M_\odot$, а масса балджа M_b была уменьшена на эту величину с сохранением его размера a . Потенциал бара был взят в виде (Палоуш и др. 1993):

$$\Phi_{\text{bar}} = - \frac{GM_{\text{bar}}}{\sqrt{q_{\text{bar}}^2 + x^2 + y^2 \left(\frac{a_{\text{bar}}}{b_{\text{bar}}}\right)^2 + z^2 \left(\frac{a_{\text{bar}}}{c_{\text{bar}}}\right)^2}},$$

где $q_{\text{bar}} = 5.0$ кпк, $\frac{a_{\text{bar}}}{b_{\text{bar}}} = \frac{1}{0.42}$, $\frac{a_{\text{bar}}}{c_{\text{bar}}} = \frac{1}{0.33}$.

Примеры результатов в зависимости от R_0 и от наличия бара представлены на рис. 5.

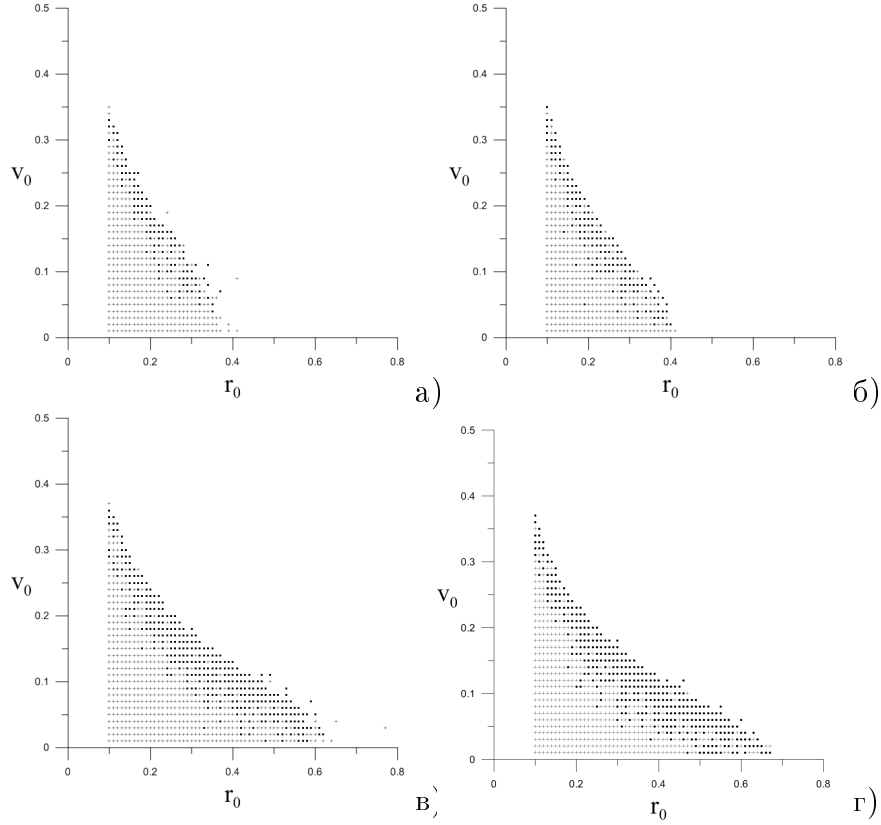


Рис. 5: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (крестики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 90^\circ$: а) $R_0 = 1$ кпк, бар присутствует; б) $R_0 = 1$ кпк, бар отсутствует; в) $R_0 = 2$ кпк, бар присутствует; г) $R_0 = 2$ кпк, бар отсутствует.

Приведены примеры траекторий относительного движения звезд и зависимостей от времени оскулирующих элементов орбит для систем с ограниченными движениями.

В *пятой главе* численно исследованы движения компонентов широких двойных звезд окрестности Солнца в регулярном гравитационном поле Галактики на временах $\sim 10^{10}$ лет в рамках модифицированной ньютоновской динамики (MOND). В MOND было предложено следующее соотношение между истинным ускорением \mathbf{a} объекта, которое обусловлено силой тяжести и ускорением \mathbf{a}_N , предсказываемым на основе ньютоновской механики:

$$\mathbf{a}_N = \mu(x) \mathbf{a},$$

где $x = \frac{a}{a_0}$, $a_0 = (1.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-8}$ см/с² – фундаментальная постоянная, обозначающая переход от ньютоновского режима при $a \gg a_0$ к режиму “глубокого MOND” при $a \ll a_0$, а $\mu(x)$ – функция, которая обладает следующими двумя асимптотическими свойствами: $\mu(x) \rightarrow 1$ при $x \gg 1$ и $\mu(x) \rightarrow x$ при $x \ll 1$.

Были рассмотрены три представления функции μ :

$$(2) \quad \mu = \frac{x}{x+1}, \quad (3) \quad \mu = \frac{x}{\sqrt{1+x^2}}, \quad (4) \quad \mu = \frac{4x}{(1+\sqrt{1+4x})^2}.$$

Проведено сравнение для трех моделей MOND и классического случая. Найдены области ограниченности движений компонентов в широких парах в зависимости от начальных условий: модуля относительной скорости компонентов, их взаимного расстояния и угла наклона вектора относительной скорости к плоскости Галактики.

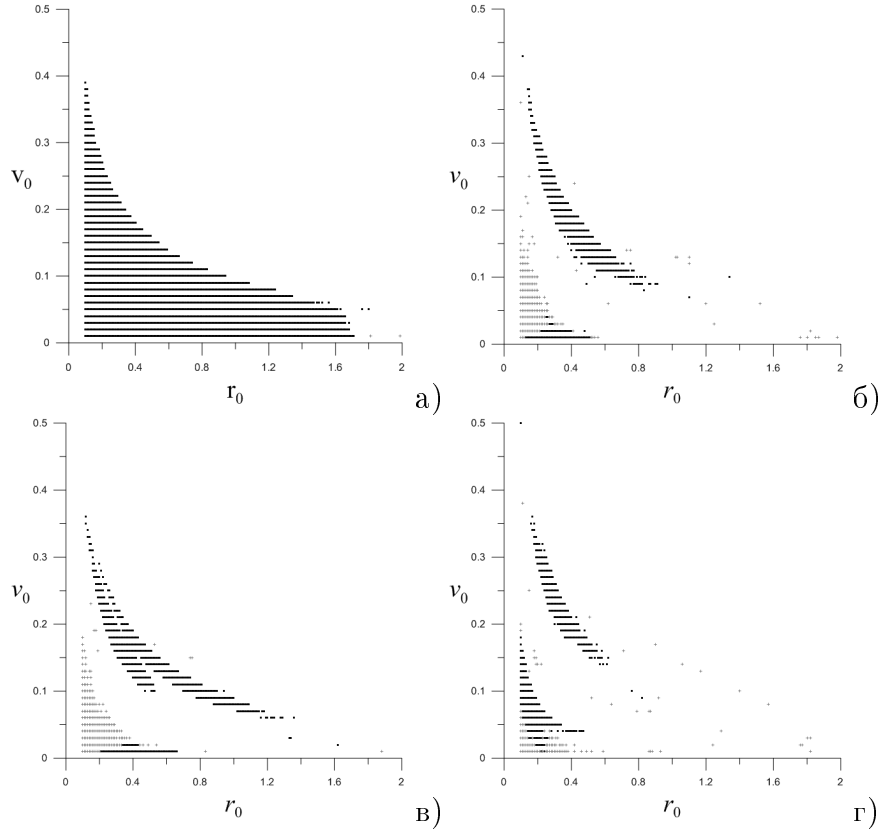


Рис. 6: Области ограниченных движений (точки) и “столкновения” (крестики) широких двойных звезд при $\alpha_0 = 0^\circ$: а) классическая ньютоновская динамика; б) вариант MOND–1, формула (2); в) вариант MOND–2, формула (3); г) вариант MOND–3, формула (4).

Показано, что форма и размеры областей в трех моделях MOND согласуются, но при этом существенно отличаются от классического случая (см. например рис. 6). В классическом случае при углах наклона, близких к 90° , происходят сильные изменения эксцентриситета орбиты двойной системы, которые могут приводить к тесным сближениям звезд с перицентрическим расстоянием меньше 1 а.е. В рассмотренных моделях MOND подобные изменения происходят при любых значениях угла наклона. При обратных движениях во всех случаях имеются области ограниченных движений, простирающиеся по крайней мере до 10 пк. Приведены примеры траекторий относительного движения звезд для систем с ограниченными движениями. Полученные результаты могут быть использованы в качестве теста модифицированных теорий гравитации.

В *заключении* излагаются основные результаты диссертации.

Литература

1. Агекян Т.А., Аносова Ж.П. Исследование динамики тройных систем методом статистических испытаний // Астрон. журн. 1967. Т. 44. С. 1261-1272.
2. Аносова и Орлов (Anosova J.P., Orlov V.V.) The dynamical evolution of the nearby multiple stellar systems ADS 48, ADS 6175 (α Geminorum), α Centauri, and ADS 9909 (ξ Scorpii) // Astron. and Astrophys. 1991. V. 252. №1. P. 123-126.
3. Быков О. П., Холшевников К. В. Прямые методы определения орбит небесных тел / СПб.: Издательство СПбГУ, 2013. 152 с.
4. Де Роза и др. (De Rosa R.J. et al.) The Volume-limited A-Star (VAST) survey. II. Orbital motion monitoring of A-type star multiples // Mon. Not. R. Astron. Soc. 2012. V. 422. P. 2765-2785.
5. Докобо и Коста (Docobo J.A. and Costa J.A.) New orbit for WDS 07346+3153 // in IAU Comm. 26. Circ. d'Inf. 1985. №96. P. 1.
6. Киселев А.А., Кияева О.В. Определение орбиты визуально-двойной звезды методом параметров видимого движения из наблюдений на короткой дуге // Астрон. журн. 1980. Т. 57. №6. С. 1227-1241.
7. Кияева О.В. Использование далеких по времени наблюдений для уточнения орбиты визуально-двойной звезды, полученной методом параметров видимого движения по короткой дуге // Астрон. журн. 1983. Т. 60. №6. С. 1208-1216.
8. Мильгром (Milgrom M.) A modification of the Newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis // Astrophys. J. 1983. V. 270. P. 365-370.
9. Мильгром (Milgrom M.) MOND theory // Canadian Journal of Physics. 2015. V. 93. I. 2. P. 107-118.
10. Орлов В.В., Петрова А.В. Динамическая устойчивость тройных звезд // Письма в Астрон. журн. 2000. Т. 26. №4. С. 301-312.
11. Палоуш (Palous J. et al.) Formation of Rings in Weak Bars - Inelastic Collisions and Star Formation // Astron. Astrophys. 1993. V. 274. P. 189-202.
12. Токовинин (Tokovinin A.A.) MSC - a catalogue of physical multiple stars // Astron. Astrophys. 1997. V. 124. P. 75-84.
13. Феллхауэр и др. (Fellhauer M.) The Origin of the Bifurcation in the Sagittarius Stream // Astrophys J. 2006. V. 651. I. 1. P. 167-173.