

УДК 524.388-32

ДИНАМИЧЕСКИЙ СТАТУС ШИРОКОЙ КРАТНОЙ СИСТЕМЫ α ЦЕНТАВРА + ПРОКСИМА

© 2014 А. С. Матвиенко^{1*}, В. В. Орлов^{1,2**}¹Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, 199034 Россия²Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Санкт-Петербург, 196140 Россия

Поступила в редакцию 21 октября 2013 года; принята в печать 24 февраля 2014 года

Изучена динамика широкой кратной системы α Сеп АВ + Проксима. Оценена полная энергия системы по имеющимся данным наблюдений о массах, координатах, собственных движениях и лучевых скоростях компонентов. 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 Сеп АВ и Проксима разойдутся через некоторое время на значительное расстояние друг от друга. Также выполнено численное моделирование динамической эволюции широкой пары α Сеп АВ + Проксима в регулярном поле Галактики. 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 С (Проксима), известная с ошибкой 200 м с^{-1} . Для уверенного определения характера движений в этой системе необходимо уменьшение ошибки лучевой скорости по крайней мере на порядок.

Ключевые слова: *звёзды: двойные: визуальные—звёзды: кинематика и динамика—звёзды: индивидуальные: α Сеп, Проксима*

1. ВВЕДЕНИЕ

Тройная система α Сеп (АВ и С) является ближайшей звездной системой к Солнцу. Компонент С (Проксима) видимой величины $V_C = 11^{\text{m}}05$ (спектральный класс М5.5 Ve) находится на расстоянии примерно $15\,000 \pm 700$ астрономических единиц от центра масс пары АВ, что в 20 раз меньше расстояния от нее до Солнца. Компоненты А и В видимой величины $V_A = -0^{\text{m}}01$ и $V_B = 1^{\text{m}}34$ (спектральные классы G2 V и K1 V) образуют двойную систему с периодом $P_{AB} \approx 80$ лет. Пока до конца не ясно, действительно ли компонент С входит в систему α Сеп и обращается по эллиптической орбите вокруг центра масс пары АВ или же имеет место прохождение компонента С мимо пары АВ по гиперболической орбите. Основная трудность связана с точностью определения лучевой скорости компонента С (см. обсуждение в статье Вертхаймера и Лохлина [1]).

Исследованию связанности этой системы посвящено много работ, но результаты порой существенно расходятся. Например, в работе Аносовой и Орлова [2] было получено, что полная

энергия тройной системы отрицательна, однако орбита компонента С относительно центра масс пары АВ, вероятно, гиперболическая. В работе Аносовой и др. [3] было снова показано, что полная энергия тройной системы отрицательна, относительная орбита компонентов АВ является эллиптической с вероятностью $p \approx 1.0$, а для внешней двойной подсистемы АВ + С имеет место гиперболическое прохождение компонента С мимо двойной АВ с вероятностью $P \approx 1.0$. Аналогичный результат был получен в работе Мэтью и Джилмора [4]. В работе Вертхаймера и Лохлина [1] был получен другой результат: когда лучевая скорость компонента С системы берётся в пределах 1σ (σ — ошибка), то система АВ + С с вероятностью $p \approx 1.0$ не связана, а когда лучевая скорость компонента С берётся в пределах 2σ , то почти в половине случаев система оказывается связанной. Вертхаймер и Лохлин [1] собрали самые точные имеющиеся данные о системе α Сеп. Мы будем использовать их при исследовании вопроса о гравитационной связанности системы АВ + С.

2. ДАННЫЕ НАБЛЮДЕНИЙ

Данные наблюдений системы α Сеп АВ + Проксима из работы Вертхаймера и Лохлина [1] пред-

*E-mail: Spaiker_7@mail.ru

**E-mail: vorvor1956@yandex.ru

Таблица 1. Характеристики компонентов системы α Cen

Параметр	Проксима	α Cen AB
$\alpha_{1991.25}$, deg	$217.44894751 \pm 3.6 \times 10^{-7}$	$219.917533 \pm 1.4 \times 10^{-5}$
$\delta_{1991.25}$, deg	$-62.68135207 \pm 4.2 \times 10^{-7}$	$-60.837128 \pm 1.0 \times 10^{-5}$
π , mas	772.3 ± 2.4	742.1 ± 1.4
μ_α , mas/year	-3775.6 ± 1.5	-3643 ± 12
μ_δ , mas/year	768.2 ± 1.8	697 ± 9
V_r , km s $^{-1}$	-21.8 ± 0.2	-22.445 ± 0.002
M , M_\odot	0.107 ± 0.021	2.039 ± 0.009

ставлены в таблице 1. Здесь приводятся экваториальные координаты компонентов, их тригонометрические параллаксы, собственные движения, лучевые скорости и массы. Также приведены ошибки определения соответствующих величин.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

3.1. Элементы орбиты и полная энергия пары AB + C

Экваториальные сферические координаты R , α , δ для центра масс пары AB и компонента C были переведены в экваториальные прямоугольные координаты:

$$\begin{aligned} x &= R \cos \delta \cos \alpha, \\ y &= R \cos \delta \sin \alpha, \\ z &= R \sin \delta. \end{aligned}$$

Расстояния R до объектов от Солнца вычислены через их параллаксы:

$$R = \frac{1}{\pi},$$

где π выражен в угловых секундах, а R — в парсеках. Тангенциальные скорости объектов были вычислены по собственным движениям и расстояниям:

$$V_t = 4.74 R \mu.$$

Здесь V_t — проекция на картинную плоскость пространственной скорости звезды в гелиоцентрической системе координат. Величины V_t выражены в км с $^{-1}$, а собственные движения μ — в угловых секундах в год. После этого все координаты и скорости компонента C были переведены в систему отсчета, связанную с центром масс пары AB.

Затем была вычислена большая полуось орбиты компонента C относительно центра масс пары AB

по формуле для кеплеровского движения в задаче двух тел:

$$a = \left(\frac{2}{r_0} - \frac{V_0^2}{k^2} \right)^{-1},$$

где $r_0 = \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + z_0^2}$, $V_0^2 = \dot{x}_0^2 + \dot{y}_0^2 + \dot{z}_0^2$, $k^2 = G(M_{AB} + M_C)$, x_0, y_0, z_0 — координаты компонента C относительно центра массы пары AB, $\dot{x}_0, \dot{y}_0, \dot{z}_0$ — скорости компонента C относительно центра массы пары AB, M_{AB} — масса пары AB, M_C — масса компонента C, G — гравитационная постоянная.

Эксцентриситет относительной орбиты был вычислен по формулам:

$$e = \sqrt{\left(1 - \frac{r_0}{a}\right)^2 + \frac{s^2}{a k^2}}$$

для эллиптической орбиты и

$$e = \sqrt{\left(1 + \frac{r_0}{a}\right)^2 - \frac{s^2}{a k^2}}$$

для гиперболической орбиты, где

$$s = x_0 \dot{x}_0 + y_0 \dot{y}_0 + z_0 \dot{z}_0.$$

Была вычислена энергия движения компонента C относительно центра масс пары AB по двум формулам:

$$E_1 = -\frac{G M_{AB} M_C}{2 a},$$

$$E_2 = T_{AB} + T_C - \frac{G M_{AB} M_C}{r_0},$$

где $T_{AB} = \frac{M_{AB} V_{0AB}^2}{2}$ — кинетическая энергия движения центра масс двойной AB, $T_C = \frac{M_C V_{0C}^2}{2}$ — кинетическая энергия компонента C. Оба значения

Таблица 2. Результаты вычислений

Параметр	Значение
r_0 , au	$150.3 \times 10^2 \pm 3.9 \times 10^2$
V_0 , km s ⁻¹	0.7 ± 0.2
k^2 , km ³ s ⁻²	$284.9 \times 10^9 \pm 3.1 \times 10^9$
a , au	$-7.9 \times 10^3 \pm 8.7 \times 10^3$
e	2.2 ± 0.9
E_1 , erg	$2.4 \times 10^{26} \pm 2.6 \times 10^{26}$
E_2 , erg	$2.4 \times 10^{26} \pm 2.7 \times 10^{26}$
φ , deg	46 ± 19

энергии вычислены в системе координат, связанной с центром масс тройной системы. Значения E_1 и E_2 согласуются в пределах ошибок.

Также был вычислен угол между вектором скорости компонента С и линией, соединяющей компонент С и центр масс пары АВ, по формуле:

$$\varphi = \arccos \frac{s}{r_0 V_0}.$$

Средние ошибки величин оценивались по формулам распространения средних ошибок (см., например, книгу Агекяна [5]).

Результаты вычислений представлены в таблице 2. Из таблицы видно, что орбита, вероятно, является гиперболической ($a < 0$, $E > 0$). В то же время погрешность величины a превышает само значение $|a|$. Это связано с тем, что лучевая скорость для компонента С известна с недостаточной высокой точностью. Чтобы можно было с уверенностью определить тип орбиты и сказать, связаны или не связаны физически компонент С и пара АВ, нужно улучшить точность определения лучевой скорости компонента С. На данном уровне точности вероятность гиперболичности орбиты равна $p_1 = 88\%$, а вероятность эллиптичности орбиты равна $p_2 = 1 - p_1 = 12\%$ в предположении о нормальном распределении ошибки величины E . Все формулы, используемые при вычислениях, были взяты из справочника Абалакина и др. [6].

3.2. Моделирование методом Монте-Карло

Для того, чтобы исследовать влияние ошибок наблюдательных данных (см. таблицу 1) на полученные результаты, мы использовали метод Монте-Карло (ММК). Посредством ММК были построены распределения энергии E_1 и угла φ .

Предполагалось, что ошибки наблюдательных данных распределены по нормальному закону и

не зависят друг от друга. При каждом испытании начальным данным присваивались новые значения, вычисляемые по формуле:

$$K = U + \sigma_U V,$$

где K — новые значения α , δ , π , μ_α , μ_δ , V_r , M для Проксимы (компонент С) и центра масс пары АВ; U — исходные значения этих параметров из таблицы 1; σ_U — погрешности параметров из таблицы 1; V — случайные числа, распределённые по нормальному закону со стандартом $\sigma = 1$ и математическим ожиданием $\bar{V} = 0$, для их задания использовалась приближенная формула:

$$V = \sum_{i=0}^{12} \xi_i - 6,$$

где ξ_i — числа, распределенные равномерно-случайно на отрезке $[0, 1]$.

Взяв количество испытаний $N = 10^6$, мы получили N новых значений энергии и угла φ . Энергия оказалась положительной в 883 418 случаях и отрицательной — в 116 582 случаях, т.е. с вероятностью $p_1 = 88.3\%$ орбита является гиперболической и с вероятностью $p_2 = 11.7\%$ орбита является эллиптической. Эти оценки хорошо согласуются с приведенными выше оценками $p_1 = 88\%$ и $p_2 = 12\%$, полученными с помощью формул распространения средних ошибок. Также были определены минимальное $E_{\min} = -3.68 \times 10^{26}$ эрг и максимальное $E_{\max} = 2.83 \times 10^{27}$ эрг значения энергии. На отрезке $[E_{\min}/E_0, E_{\max}/E_0]$ построено распределение отношения энергий E_n/E_0 (см. рис. 1), где значения E_n получены с помощью ММК, $E_0 = 2.42 \times 10^{26}$ эрг — значение энергии, вычисленное по наблюдательным данным из таблицы 1. Нулевое значение энергии разделяет случаи связанности и несвязанности АВ и С.

Для угла φ также определены минимальное $\varphi_{\min} = 0^\circ.1$ и максимальное $\varphi_{\max} = 82^\circ.8$ значения. На отрезке $[\varphi_{\min}/\varphi_0, \varphi_{\max}/\varphi_0]$ построено распределение отношения углов φ_n/φ_0 (см. рис. 2). Здесь $\varphi_0 = 45^\circ.9$ — значение угла, вычисленное по наблюдательным данным из таблицы 1.

Оба распределения оказались несколько асимметричны: распределение по энергиям скошено в сторону больших энергий, а распределение по углам — в сторону меньших углов. В то же время максимумы распределений находятся вблизи единицы, что соответствует $E \approx E_0$ и $\varphi \approx \varphi_0$. В результате моделирования посредством ММК получено, что на данном уровне точности система α Cen АВ + Проксима с вероятностью $p_1 = 88\%$ не связана, а с вероятностью $p_2 = 12\%$ — связана, то есть Проксима (компонент С) скорее всего пролетает мимо пары АВ под углом $\varphi \approx 46^\circ \pm 19^\circ$.

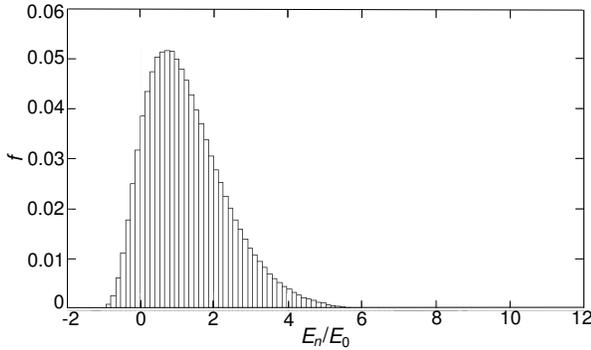


Рис. 1. Распределение отношения энергий E_n/E_0 .

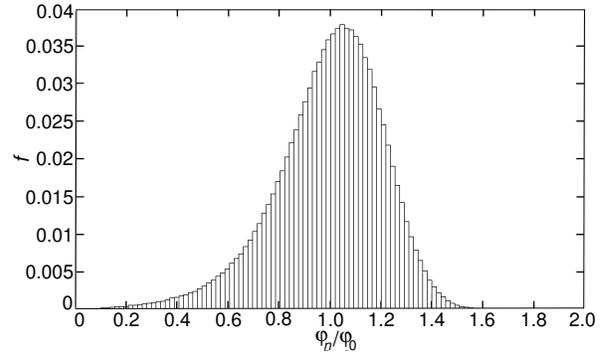


Рис. 2. Распределение отношения углов φ_n/φ_0 , где $\varphi_0 = 45^\circ 9'$.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ШИРОКОЙ ПАРЫ В ПОЛЕ ГАЛАКТИКИ

4.1. Метод моделирования

Нами была составлена и отлажена программа численного интегрирования уравнений движения компонентов широкой пары α Сеп АВ + Проксима во внешнем поле Галактики методом Рунге-Кутты 4-го порядка. Для программы интегрирования были выведены уравнения движения в системе отсчета, связанной с центром Галактики.

Модель потенциала Галактики была взята нами из статьи Феллхауэра и др. [7]. В этой модели галактический потенциал представляет сумму потенциалов гало, диска (модель Miyamoto–Nagai) и балджа (модель Hernquist):

$$\Phi(x, y, z) = \Phi_{\text{halo}}(R, z) + \Phi_{\text{disk}}(R, z) + \Phi_{\text{bulge}}(r).$$

Здесь

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

где $v_0 = 186 \text{ км с}^{-1}$, $d = 12 \text{ кпк}$, R и z — цилиндрические координаты, r — расстояние от центра Галактики;

$$\Phi_{\text{disk}}(R, z) = \frac{G M_d}{\sqrt{R^2 + \left(b + \sqrt{z^2 + c^2}\right)^2}},$$

где $M_d = 10^{11} M_\odot$, $b = 6.5 \text{ кпк}$, $c = 0.26 \text{ кпк}$;

$$\Phi_{\text{bulge}}(r) = \frac{G M_b}{r + a},$$

где $M_b = 3.4 \times 10^{10} M_\odot$, $a = 0.7 \text{ кпк}$.

При моделировании масса выражалась в массах Солнца, расстояние — в парсеках, время — в миллионах лет. В принятых нами единицах гравитационная постоянная $G = 4.30 \times 10^{-3}$, а единица скорости равна 0.978 км с^{-1} .

4.2. Моделирование динамики системы α Сеп + Проксима

Для исследования динамической эволюции широкой пары α Сеп АВ + Проксима нами были взяты данные наблюдений из таблицы 1. По этим данным были вычислены относительные положения и скорости компонентов этой системы в галактоцентрической системе координат.

После этого была рассмотрена будущая эволюция системы на разных временах. Результаты представлены на рис. 3 в относительных координатах (разности координат Проксимы и центра масс пары α Сеп АВ) и на рис. 4 в галактоцентрических координатах в проекции на плоскость Галактики. Координаты вдоль осей приведены в парсеках. Система является неустойчивой в Галактическом поле. Компоненты расходятся на расстояние порядка 100 пк за время порядка 1 млрд лет и на расстояние порядка 1 кпк за время порядка 10 млрд лет. Таким образом, мы наблюдаем прохождение Проксимы мимо двойной α Сеп АВ по гиперболической орбите.

4.3. Эффект вариации лучевой скорости Проксимы

Как было отмечено выше, критическим параметром для установления гравитационной связанности широкой пары α Сеп АВ + Проксима является лучевая скорость V_r Проксимы, измеренная в настоящее время с ошибкой 200 м с^{-1} [1]. Исследуем влияние небольших вариаций скорости ΔV_r на устойчивость системы. Из рис. 5–7 видно, что при изменении величины V_r имеют место разные варианты эволюции системы. Сравнение рис. 5 и 6 показывает, что небольшое изменение скорости может привести к различным результатам: от квазиэллиптических движений (рис. 5) до разрушения системы (рис. 6). В промежуточных случаях (см. рис. 7) движения носят сложный характер с

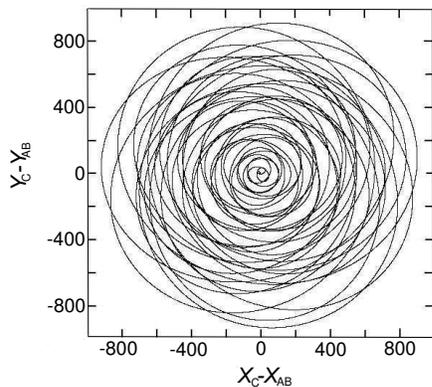


Рис. 3. Моделирование в будущее на время $t = 10^{10}$ лет в координатах компонента С относительно центра масс пары АВ.

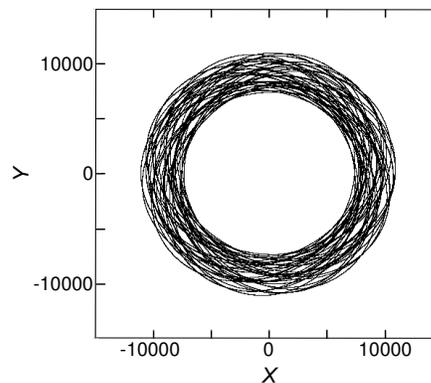


Рис. 4. Моделирование в будущее на время $t = 10^{10}$ лет в галактоцентрических координатах в проекции на плоскость Галактики.

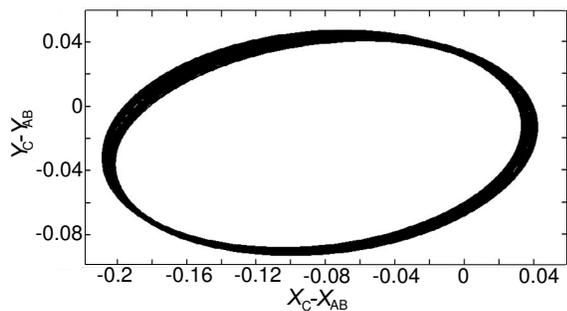


Рис. 5. Моделирование на время $t = 1.4 \times 10^9$ лет при $V_r = -22.0$ км с⁻¹ в координатах компонента С относительно центра масс пары АВ.

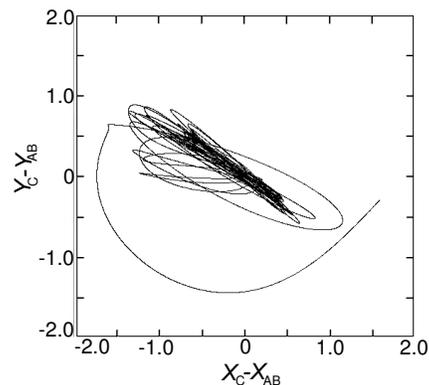


Рис. 6. Моделирование на время $t = 1.4 \times 10^9$ лет при $V_r = -21.853$ км с⁻¹ в координатах компонента С относительно центра масс пары АВ.

элементами стохастичности, однако система остается связанной на промежутках времени порядка нескольких миллиардов лет.

С учетом того, что при малых вариациях в пределах ошибок возможны качественно различные сценарии динамической эволюции системы, необходимо уточнять лучевую скорость Проксима.

5. ОБСУЖДЕНИЕ

Выполненное статистическое моделирование показало, что на достигнутом уровне точности определения орбитальных параметров и масс компонентов тройной системы α Cen АВ + Проксима компонент С, вероятно, проходит мимо пары АВ по гиперболической орбите. Вероятность прохождения составляет около 88%, а вероятность движения по эллиптической орбите равна примерно

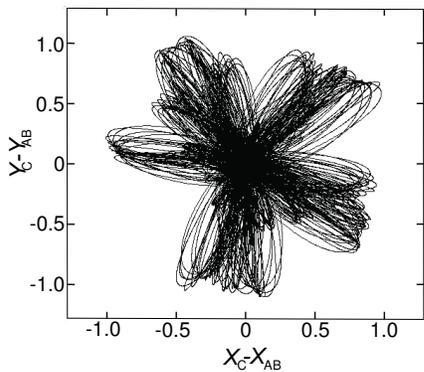


Рис. 7. Моделирование на время $t = 10^{10}$ лет при $V_r = -21.860$ км с⁻¹ в координатах компонента С относительно центра масс пары АВ.

12%. Следовательно, связанность системы АВ + С также не исключена.

Ключевым параметром, определяющим связанность или несвязанность системы, является лучевая скорость компонента С. Ошибка определения использованной нами величины составляет около 200 м с^{-1} (см. таблицу 1). Можно надеяться, что будущие спектральные наблюдения этой звезды позволят уточнить абсолютное значение лучевой скорости, что, в свою очередь, даст возможность более уверенно определить динамический статус этой широкой тройной системы.

На достигнутом уровне точности мы можем обсудить несколько гипотетических сценариев эволюции системы α Сеп:

- (1) пролёт компонента С мимо пары АВ;
- (2) устойчивое обращение С вокруг АВ;
- (3) распад тройной системы;
- (4) выброс компонента С по сильно вытянутой эллиптической орбите.

Последние два сценария маловероятны, поскольку в этих случаях движение компонента С относительно центра масс АВ должно быть близко к радиальному — угол φ должен быть близок к нулю или 180° (в случае возвращения после выброса). Однако из рис. 2 видно, что такие значения φ крайне маловероятны даже на достигнутом уровне точности.

Сделать выбор между первым и вторым сценариями труднее. Случайное сближение одиночной звезды с двойной системой с такой малой скоростью (около 1 км с^{-1}) в звездном поле крайне мало вероятно. Однако, как было отмечено Аносовой и др. [3], звезды α Сеп АВ и Проксима могут быть членами движущейся группы звезд, а в таком случае вероятность сближения между членами группы будет не столь мала. С другой стороны, все три звезды имеют примерно одинаковый возраст — около 5×10^9 лет (см. работу [8], а также ссылки в ней). Этот факт является сильным аргументом в пользу их совместного образования. Казалось бы, это исключает сценарий пролёта и свидетельствует в пользу сценария устойчивого обращения. Тем не менее, если звезды образовались в пределах одного скопления, то после его разрушения бывшие члены скопления будут двигаться в поле Галактики по близким орбитам и время от времени могут сближаться друг с другом. Этот механизм может быть еще одним объяснением значительного числа широких кратных звёзд, наблюдаемых в окрестности Солнца.

В данной работе рассматривалось влияние регулярного поля Галактики на динамику широкой

двойной системы α Сеп АВ + Проксима на временах порядка миллиардов лет. Заметим, что на таких временах возможны тесные сближения компонентов системы с другими звездами поля Галактики, в результате которых характер движений компонентов может несколько измениться. Мы не рассматривали такие сближения, поскольку мы не можем прогнозировать число и параметры сближений на космогонических временах.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При исследовании системы α Сеп АВ и Проксима (компонент С) были получены следующие результаты.

- (1) Движение в широкой паре АВ + С, вероятно, является гиперболическим — энергия тройной системы положительна с вероятностью около 88%.
- (2) Для имеющихся наблюдательных данных моделирование показывает уход Проксима от пары АВ за время порядка 200 млн лет на расстояние порядка 20 пк.
- (3) Лучевая скорость Проксима (известная с ошибкой 200 м с^{-1}) является критическим параметром для решения вопроса о динамическом статусе этой системы. Требуется её уточнение из наблюдений хотя бы на порядок величины.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 02-12-00185-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J. G. Wertheimer and G. Laughlin, *Astronom. J.* **132**, 1995 (2006).
2. J. P. Anosova and V. V. Orlov, *Astronom. and Astrophys.* **252**, 123 (1991).
3. J. P. Anosova, V. V. Orlov, and N. A. Pavlova, *Astronom. and Astrophys.* **292**, 115 (1994).
4. R. Mathews and G. Gilmore, *Monthly Notices Royal Astronom. Soc.* **261**, L5 (1993).
5. Т.А.Агемян, *Основы теории ошибок для астрономов и физиков* (Наука, Москва, 1972).
6. В.К.Абалакин, Е.П.Аксенов, Е.А.Гребеников и др., *Справочное руководство по небесной механике и астродинамике* (Наука, Москва, 1976).
7. M. Fellhauer, V. Belokurov, N. W. Evans, et al., *Astrophys. J.* **651**, 167 (2006).
8. L. E. De Warf, K. M. Datin, and E. F. Guinan, *Astrophys. J.* **722**, 343 (2010).

Dynamic Status of the Wide Multiple System α Centauri + Proxima**A. S. Matvienko and V. V. Orlov**

We study the dynamics of a wide multiple system α Centauri + Proxima. The total energy of the system was estimated according to the available observational data on masses, coordinates, proper motions, and radial velocities of its components. To account for the effect of the observational data errors on the result, we have implemented the Monte Carlo method. From $N = 10^6$ statistical tests we show that with the probability of about 90% the motion is hyperbolic, i.e., α Cen AB and Proxima will after a while diverge from each other by a considerable distance. We also perform numerical modeling of dynamic evolution of the wide pair α Cen AB + Proxima in the regular field of the Galaxy. The trajectory of relative motion is constructed. The components diverge from each other by a distance of 20 pc over the time scale of about 200 Myr. The critical parameter for determining the dynamic status of the system is the radial velocity of the C component (Proxima), known with an error of 200 m s^{-1} . For a reliable determination of the nature of motions in the system, we have to decrease the radial velocity error by at least an order of magnitude.

Keywords: *stars: binaries: visual—stars: kinematics and dynamics—stars: individual: α Cen, Proxima*