

ПРИРОДА

№ 4, 2001 г.

Сурдин В.Г.

Судьба звездных скоплений

© “Природа”

Использование и распространение этого материала
в коммерческих целях
возможно лишь с разрешения редакции



Сетевая образовательная библиотека “VIVOS VOCO!”
(грант РФФИ 00-07-90172)

vivovoco.nns.ru
vivovoco.rsl.ru
www.ibmh.msk.su/vivovoco

Судьба звездных скоплений

В.Г.Сурдин

Симметрия формы и симметрия эволюции

Симметрия в природе — признак красоты: биолога восхищает радиолария, химик любуется фуллереном, физик с детским любопытством изучает мыльные пузыри, астроном с изумлением взирает на звездные скопления. Идеальная форма последних сулит легкую разгадку их природы. Но это не так. Хотя звездные скопления — объект пристального внимания астрономов (многие посвящают их изучению всю свою жизнь), в происхождении и эволюции этих «звездных городов» еще много неясного. Особенно это касается шаровых звездных скоплений — наиболее старых, массивных и симметричных среди всех остальных. По мере изучения этих элегантных «небесных созданий» путем все более точного моделирования их жизни с помощью компьютера наше восхищение перед их пространственной симметрией уступает место более глубокому чувству, вызванному симметрией их эволюционного цикла.

Дело в том, что процесс формирования звезд, и особенно звездных скоплений, скрыт в недрах гигантских газо-пылевых облаков. Когда эти области стали доступны для наблюдения при

© В.Г.Сурдин



Владимир Георгиевич Сурдин, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Государственного астрономического института им.П.К.Штернберга. Область научных интересов — формирование звезд и звездных скоплений. Один из постоянных авторов «Природы».

помощи инфракрасных и радиотелескопов, когда астрономы обнаружили там формирующиеся звездные скопления, то показалось, что главная проблема их эволюции решена. Но, как выясняется, понять свойства звездных скоплений невозможно, не решив проблему их смерти. Эта мысль, очевидная для биолога, пока еще непривычна астроному, ибо звездные системы эволюционируют медленно, а возраст Вселенной не так уж велик. Поэтому, намереваясь рассказать о динамической эволюции звездных скоплений, мы

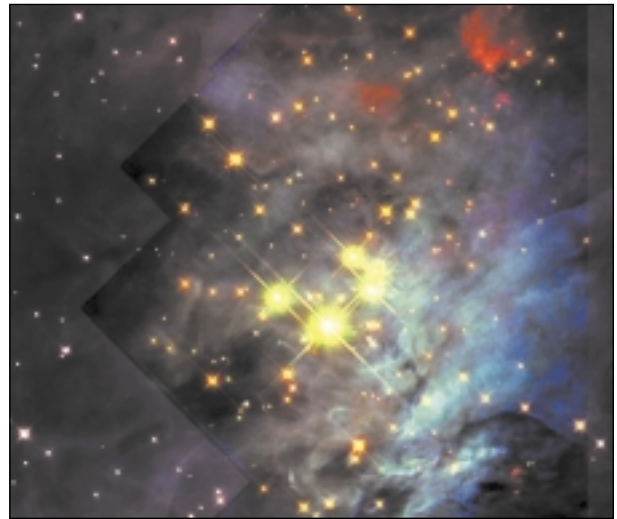
особенно подробно рассмотрим механизмы их разрушения, позволяющие понять некоторые «темные» стороны их жизни.

Многообразие звездных систем

Все звезды — члены тех или иных систем; до сих пор астрономы не обнаруживали светил, свободно и в одиночку блуждающих по Вселенной. Системы звезд поражают нас диапазоном масштабов и разнообразием морфологии: от двойных звезд до гигант-



Шаровое звездное скопление Мессье 13, наблюдаемое в созвездии Геркулеса, одно из крупнейших в Галактике. Содержит более миллиона звезд и имеет диаметр около 100 пк.



Группа чрезвычайно молодых звезд в созвездии Ориона. Четыре яркие звезды, называемые Трапецией Ориона, уже расчистили вокруг себя пространство от остатков протозвездного газа. Но большинство звезд этого коллектива еще скрыто в недрах темного облака, лежащего за Трапецией.

ских галактик, состоящих из сотен миллиардов светил и имеющих самые замысловатые формы. В ряду этих систем немалый диапазон занимают звездные скопления и ассоциации, содержащие от 10^2 до 10^6 звезд. Звездные скопления как более концентрированные и ярко выраженные на небе агрегаты начали обнаруживать и описывать еще в XVII—XVIII вв. Но их роль в круговороте звездной эволюции оставалась неясной, пока в XX в. не были выделены значительно более разреженные и малозаметные группировки молодых звезд — ассоциации, а затем и комплексы. Ныне номенклатура внутригалактических звездных агрегатов такова:

- двойные и кратные (т.е. тройные и т.д.) звездные системы;
- рассеянные звездные скопления;
- шаровые звездные скопления;
- звездные ассоциации;
- звездно-газовые комплексы.

В динамическом смысле двойная звезда — система из двух светил, обращающихся вокруг общего центра масс. Она чрезвычайно стабильна и была

бы практически вечной, если бы не влияние соседей и физическая эволюция ее собственных компонентов. Близкие пролеты соседних звезд, массивных звездных скоплений и облаков межзвездного газа постепенно меняют характер движения компонентов двойной звезды: они либо катастрофически сближаются, либо удаляются друг от друга и навсегда теряют связь. При этом наблюдается любопытная закономерность: под действием гравитационных возмущений от пролетающих мимо звезд изначально далекие друг от друга компоненты двойных систем расходятся еще дальше, а изначально близкие — сближаются и в конце концов сливаются. Однако процесс этот длительный; внутренняя механическая устойчивость гарантирует двойным звездам долгую жизнь. Поэтому около половины всех звезд в Галактике объединены в двойные системы, размеры которых лежат в диапазоне от нескольких диаметров типичной звезды ($\sim 10^9$ м) до характерного межзвездного расстояния ($\sim 10^{16}$ м).

Звездные системы высокой кратности (тройные и более

сложные) представлены в Галактике не так широко. Причина очевидна: в отличие от устойчивого периодического движения двойной системы из трех и более тел имеет хаотическую внутреннюю динамику, чреватую взаимными сближениями компонентов и обменом между ними энергией. В результате кратная система быстро распадается на серию одиночных и двойных звезд. Впрочем, системы высокой кратности, имеющие иерархическую структуру, могут жить долго. Их члены упакованы по принципу матрешки: например, широкая система из двух тесных двойных звезд весьма устойчива. Такую двухуровневую систему представляет звезда ϵ Лирь. Извест-

ны и примеры более высокой иерархичности: одна из самых сложных систем — звезда Кастор (α Близнецов) — имеет шесть

компонентов, распределенных на трех уровнях иерархии. Но поскольку каждый более высокий уровень требует существенного увеличения размера системы, в нашей Галактике населенность таких агрегатов ограничена не-



Знаменитое рассеянное скопление Плеяды, легко доступное для наблюдения невооруженным глазом в созвездии Тельца. Возраст около 100 млн лет. Облака межзвездного газа, которые рассеивают свет ярких звезд скопления, не имеют к нему отношения: они лежат между Землей и Плеядами.



Рассеянное скопление Мессье 7. Наблюдается в созвездии Скорпиона, на фоне более далеких звезд центральной области Галактики. Возраст около 300 млн лет — весьма преклонный для рассеянного скопления.

сколькими десятками звезд [1]. Все более населенные скопления звезд имеют хаотическую структуру и динамику.

Пример рассеянного скопления звезд известен многим — это симпатичная группа Плеяды (Стожары) на зимнем небе в созвездии Тельца. Хотя наш глаз замечает в ней в лучшем случае пять-шесть слабеньких звездочек, в телескоп их можно насчитать несколько сотен; это типичное рассеянное скопление. Термин «рассеянное» связан с их рыхлым внешним видом и в основном обязан малому числу звезд, среди которых всего несколько ярких, определяющих «лицо» скопления. В диске Галактики порядка 100 тыс. таких скоплений, но из них детально изучены лишь около 500. Возраст этих скоплений заключен в интервале 10^6 — 10^{10} лет, но преобладают молодые: среди изученных всего около 50 имеют возраст более 1 млрд лет. Типичный размер рассеянного скопления — несколько парсеков (1 пк = 3.26 световых лет). Их массы измеряются пока не очень точно:

они лежат в интервале 10^2 — 10^4 масс Солнца ($M_{\odot} = 2 \cdot 10^{30}$ кг), а средняя масса рассеянного скопления близка к $10^3 M_{\odot}$ [2].

Самые молодые рассеянные скопления возрастом 1—10 млн лет еще погружены в родительское газовое облако. В основном они сосредоточены в спиральных рукавах Галактики. Скопления возрастом более 30 млн лет уже практически не связаны с газом. А наиболее старые рассеянные скопления возрастом 8—12 млрд лет по массе и химическому составу звезд приближаются к шаровым и насыщают внешнюю часть диска Галактики, практически лишённую межзвездного газа.

Шаровые звездные скопления населяют не только диск Галактики, но и весь объем окружающего его гало. Их диаметры заключены в пределах от 10 до 500 пк. Массы большинства шаровых скоплений лежат в диапазоне от 10^4 до $2 \cdot 10^6 M_{\odot}$. Именно большому количеству звезд они обязаны своей правильной формой. По этой же причине, а также в силу своего положения вдали

от непрозрачного галактического диска, шаровые скопления видны в самых дальних уголках Галактики. Сейчас в каталоги занесено около 150 шаровых скоплений; всего их в Галактике, как показывают расчеты, не более 180 [3]. Таким образом, система шаровых скоплений изучена практически полностью.

Возраст таких скоплений близок к хаббловскому возрасту Вселенной (15—18 млрд лет). На это указывают несколько независимых фактов. Например — «химические часы», т.е. накопление в межзвездном веществе Галактики химических элементов тяжелее гелия, выбрасываемых умирающими звездами. Чем позже сформировалась из этого вещества звезда, тем больше в ее составе тяжелых элементов (кислорода, углерода, азота и др.). Звезды шаровых скоплений наиболее бедны такими элементами, а значит, они очень старые. Другое указание на преклонный возраст — их сильно вытянутые галактические орбиты. Это говорит о том, что шаровые скопления родились или вошли в со-

став Галактики ранее той эпохи, когда она пришла в стационарное состояние. Эти и другие факты указывают, что эпоха формирования шаровых скоплений предшествовала эпохе формирования Галактики или совпадала с ней [4].

От шаровых и рассеянных звездных скоплений, члены которых прочно связаны между собой взаимным притяжением, принципиально отличаются звездные ассоциации и комплексы, имеющие большую протяженность и очень низкую плотность, но демонстрирующие при этом несомненную генетическую связь своих членов. Наиболее известны группировки молодых массивных звезд спектральных классов O и B, открытые в первой половине XX в. и названные OB-ассоциациями. В отличие от звездных скоплений они не демонстрируют заметной концентрации звезд к центру системы и не выделяются в звездном поле «на глаз», однако совместное формирование их членов не вызывает сомнения. Эти разреженные звездные «коллективы» содержат от десятков до нескольких сотен голубых звезд и наверняка тысячи менее массивных звезд, которые не так легко заметить. Диаметры OB-ассоциаций варьируют от 15 до 300 пк, что значительно превышает размеры рассеянных скоплений с такой же характерной массой. Наконец, еще более рыхлые образования — обширные группировки молодых звезд, населяющие звездно-газовые комплексы [5]. Их размеры близки к 1000 пк, и по существу это фрагменты спиральных рукавов Галактики.

Рождение и молодость звездных коллективов

Какова связь между описанными выше группировками звезд и какова их роль в жизни Галактики? Именно эти вопросы интересуют сейчас астрономов, изучающих звездные скопления. Дело в том, что научившись при по-

мощи инфракрасных телескопов заглядывать в недра космических облаков, туда, где рождаются звезды, мы увидели, что рождаются они большими группами. Но что происходит с ними дальше? В период формирования они выглядят очень плотными и стабильными, но почему же тогда не сохраняются надолго? Почему доля звезд Галактики, объединенных в звездные скопления, чрезвычайно мала ($\sim 10^{-3}$)? В поиске ответов на эти вопросы астрономы обнаружили в последние годы много интересного.

Оказалось, что в период формирования и ранней молодости звездного скопления существует несколько явлений, весьма быстро приводящих к его частичному или даже полному разрушению. Наиболее важное из них — выброс из формирующегося скопления остатков межзвездного газа. Это происходит сразу после рождения наиболее массивных звезд, обладающих очень мощным излучением, способным разогреть и даже ионизовать протозвездный газ. Образовавшийся горячий плазменный шар своим высоким давлением разрушает родительское облако, и новорожденная группа звезд оказывается «изъятой» из той «гравитационной ловушки», которой служило для него массивное облако.

Предоставленную самой себе группу новорожденных звезд ожидает три возможных исхода. Первый, когда скорости хаотического движения звезд так велики, что они преодолевают взаимное притяжение и разлетаются от места рождения навсегда, — образуется расширяющееся «облако» молодых светил, или ассоциация. Второй, когда взаимного притяжения звезд достаточно, чтобы удержать их вместе, — образуется звездное скопление. И третий исход, когда медленно движущиеся звезды остаются на месте и формируют гравитационно связанное скопление, а более «шустрые» светила разлетаются в виде ассоциации.

Очевидно, в зависимости от конкретных условий, в различ-

ных областях звездообразования реализуются все три варианта. Наблюдения показывают, что нередко звездное скопление находится в центре ассоциации, а она сама представляет как бы корону, звезды в которой слабо связаны гравитацией как со скоплением, так и друг с другом. У некоторых OB-ассоциаций по измеренным движениям звезд обнаружены признаки расширения со скоростью 7—10 км/с. При этом характерное время расширения составляет 2—5 млн лет. Поэтому через несколько миллионов лет после рождения такая ассоциация полностью растворяется в окружающем поле звезд. Наши расчеты показывают, что именно таким путем — через расширяющиеся ассоциации — большинство звезд попадают в галактический диск; а в составе скоплений остается их меньшая часть [6,7]. Но история «разрушительной молодости» скопления на этом не заканчивается.

Медленные звезды, не способные преодолеть притяжение, начинают приближаться друг к другу и взаимодействовать все сильнее. Происходящий при этом процесс обмена энергией между ними впервые был описан на современном математическом языке английским астрономом Д. Линден-Беллом в 1967 г. и назван бурной релаксацией (violent relaxation). Но первая мысль об этом процессе родилась у Исаака Ньютона, обладавшего поразительным физическим чутьем. В известных письмах Ричарду Бентли он высказал несколько замечательных идей, в частности о гравитационной неустойчивости однородного вещества. Там же он нарисовал умозрительную картину, фактически предвосхитившую теорию звездной релаксации. В первом, наиболее известном письме к Бентли от 10 декабря 1692 г., формулируя идею о гравитационной неустойчивости, Ньютон описал идеальную картину коллапса: «Мне представляется, что если бы вещество нашего Солн-



Туманность Розетка (NGC 2244) — очень красивый объект диаметром около 100 световых лет (30 пк). В центре «розетки» — молодое звездное скопление, которое разогрело окружающий газ и уже изгнало его из центральной части облака.

ца и планет, да и все вещество Вселенной было бы равномерно рассеяно по всему небу и каждая частица обладала бы внутренне присущим ей тяготением ко всем остальным, а все пространство, по которому было бы рассеяно это вещество, было бы конечным, то вне этого пространства вещество под действием своего тяготения стремилось бы ко всему веществу внутри него и, следовательно, падало бы к центру пространства, и образовало бы там одну гигантскую сферическую массу».

Но уже в четвертом письме от 25 февраля 1693 г. великий физик доводит картину коллапса протозвездного вещества до более реалистического уровня: «Однако материя при падении могла бы собираться в множество круглых масс, наподобие тел планет, а те, притягивая друг друга, могли бы обрести наклонность спуска и в результате падать не на большое центральное тело, а в стороне от него, и, опи-

сав вокруг него полукруг, снова начать подниматься теми же шагами и ступенями движения и скорости, какими до того они опускались, на манер комет, обрастающих вокруг Солнца» [8].

Как известно, пролетающие через внутренние области Солнечной системы кометы при случайном взаимодействии с планетами часто изменяют свою траекторию так, что навсегда уходят за пределы планетной системы. Такая же судьба ждет многие звезды, проходящие близ центра скопления в период его первоначального сжатия: ведь при движении в нестационарном гравитационном поле энергия частиц не сохраняется. Численные модели показывают, что от 5 до 30% всех звезд после этого навсегда покидают скопление с весьма большими скоростями. Вслед за этим происходят события иного рода, но имеющие те же последствия. Значительная доля массивных новорожденных звезд входит в состав тесных

двойных систем, компоненты которых обращаются вокруг центра масс со скоростью в десятки километров в секунду. Спустя несколько миллионов лет после рождения одна из звезд в каждой паре заканчивает свою эволюцию, взрывается как сверхновая и теряет при этом большую часть своей массы; а ее соседка, имея большую орбитальную скорость и неожиданно лишившись притяжения партнера, вылетает, как камень из пращи, и покидает скопление навсегда.

В связи с этим можно вспомнить, что в областях звездообразования кроме медленно расширяющихся звездных ассоциаций наблюдаются также «убегающие звезды» («runaway stars»), находящиеся за пределом ассоциации, но имеющие к ней прямое отношение. Их движение указывает, что они покинули область формирования несколько миллионов лет назад и удаляются от нее значительно быстрее, чем расширяется ассоциация. Например, звезды AE Aur и μ Col раз-

летаются из области Трапеции Ориона со скоростью 130 км/с, а двойная система Vela X-1 с рентгеновским пульсаром 2.5 млн лет назад вылетела из звездной ассоциации Vela OB1 и удаляется от нее со скоростью 90 км/с. Трудно сказать, какой именно из описанных выше эффектов сыграл роль в каждом конкретном случае, но оба они эффективно разрушают скопления.

Итак, по прошествии нескольких миллионов лет после рождения группы звезд в недрах космического облака оно разрушается новорожденными звездами, а сами звезды в большинстве своем покидают место рождения. Лишь меньшая их часть (~10%) остается связанной в звездных скоплениях, время жизни которых измеряется уже сотнями миллионов и даже миллиардами лет.

Механизмы эволюции взрослых скоплений

После того как молодое звездное скопление рассталось с остатками родительского газа и быстрыми звездами, оно приходит в стационарное состояние, но все равно продолжает медленно терять звезды под действием процессов внутренней релаксации и под влиянием внешних гравитационных возмущений.

Двигаясь в стационарном гравитационном поле скопления, звезды время от времени сближаются друг с другом и под действием взаимного притяжения изменяют свои траектории и энергию движения. Звездная система, как и любая другая система взаимодействующих частиц, стремится со временем к термодинамическому равновесию и максвелловскому распределению энергии между частицами. Однако звездное скопление не колба с газом: у него нет стенок. Поэтому звезды, получившие в ходе обмена энергией большую скорость, вылетают из скопления навсегда, подобно тому, как испаряются молекулы из открытого стакана с водой. Астрономы называют это диссипацией звездных скоплений. Особенно активно происходит диссипация относительно маломассивных рассеянных скоплений: тысячи звезд полностью «испаряются» за несколько сотен миллионов лет.

Продолжая аналогию со стаканом воды, легко понять, что любое внешнее гравитационное воздействие влияет на скопление звезд подобно нагревателю, опущенному в воду, т.е. усиливает «испарение» молекул — звезд. Для рассеянных скоплений, движущихся в пределах галактического диска по почти круговым орбитам, главным источником гравитационных возмущений служат близкие пролеты гигантских молекулярных облаков с массами 10^5 — 10^6 М. [9]. При этом среднее время жизни

рассеянного скопления в диске Галактики оказывается всего $3 \cdot 10^8$ лет. Именно поэтому все известные рассеянные скопления так молоды — старые давно разрушились.

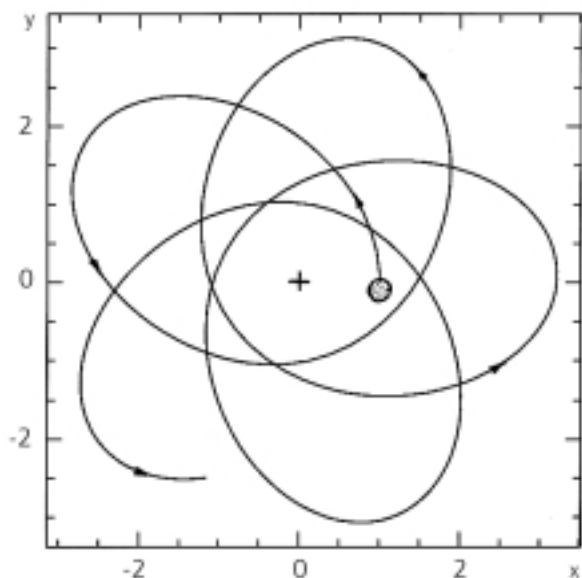
Для шаровых скоплений, большую часть жизни проводящих за пределами галактического диска, встречи с межзвездными облаками существенного значения не имеют, ибо происходят крайне редко [10]. Зато эти скопления регулярно пересекают плотный диск Галактики, попадая в его весьма неоднородное поле и испытывая при этом резкий «гравитационный удар». Такие удары ощутимо «нагревают» шаровое скопление, ускоряя его диссипацию и заставляя оставшиеся в скоплении звезды удаляться от центра (по аналогии с лабораторной физикой можно назвать это тепловым расширением скопления). В этом случае расширение звездного скопления чревато его распадом, поскольку неоднородное гравитационное поле Галактики вызывает приливы и стремится растянуть скопление вдоль направления на галактический центр. Поэтому рыхлое скопление теряет звезды со своей периферии, которые некоторое время сопровождают его по галактической орбите (как метеорный рой сопровождает ядро кометы), а затем «растворяются» среди прочих звезд Галактики.

Еще один чрезвычайно любопытный эффект, влияющий на жизнь самых массивных шаровых скоплений, — это динамическое трение, тормозящее движение массивного тела, летящего сквозь рой легких частиц. Этот эффект хорошо известен физикам в случае кулоновского взаимодействия и с успехом используется в ускорительной технике для электронного охлаждения пучков быстрых протонов. В Галактике роль протона играет шаровое скопление, роль электронов — окружающие его звезды, а кулоновскую силу заменяет гравитация. Возмущая движение звезд и отдавая им свою энергию, скопление по спирали пада-

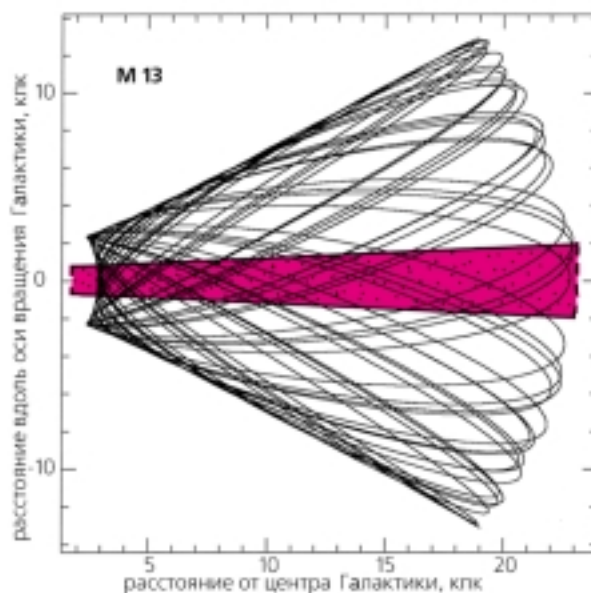
ет к центру Галактики. Чем ближе оно оказывается к плотному галактическому ядру, тем сильнее ощущает его приливное влияние и теряет от этого свои наружные слои. Так что до самого центра Галактики добывается в лучшем случае «огрызок» шарового скопления — его ядро, вносящее свой вклад в строительство галактического ядра [11].

Изучение описанных выше и многих других механизмов эволюции звездных скоплений привело к важным выводам об эволюции Галактики в целом. Во-первых, яснее стало происхождение ядер галактик и звезд гало: важную роль в этом сыграла уже несуществующая, разрушившаяся часть популяции шаровых скоплений. Во-вторых, теперь мы лучше понимаем, какие свойства шаровых скоплений являются врожденными, а какие — приобретенными в ходе длительной динамической эволюции. Именно врожденные свойства этих древних звездных скоплений помогают восстанавливать историю формирования нашей Галактики. Наконец, одной из важнейших особенностей современного рождения звезд оказалось их взаимодействие с окружающим газом, приводящее к формированию различных звездных систем — скоплений, ассоциаций, комплексов. ■

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований. Проекты 98-02-30048, 00-15-96627, 00-02-17804.



Типичная орбита шарового скопления в проекции на плоскость Галактики. Если бы вся масса Галактики была сосредоточена в ее центре (как в Солнечной системе она сосредоточена в Солнце), то орбита была бы обычной эллиптической. Но вещество Галактики распределено во всем ее объеме, поэтому орбита похожа на сильно прецессирующий эллипс.



Орбита шарового скопления Мессье 13 в проекции на меридиональную плоскость Галактики. По вертикали — расстояние (в кпк) вдоль оси вращения галактического диска; по горизонтали — вдоль радиуса диска от его центра. В центре показано сечение диска.

Литература

1. Сурдин В.Г. // Вестн. МГУ. Сер. Физика, астрономия. 1997. Т.52. №1. С.63—66.
2. Данилов В.М., Селезнев А.Ф. // Astron. and Astrophys. Transactions. 1994. V.6. P.85—155.
3. Сурдин В.Г. // Письма в «Астрон. журн.». 1994. Т.20. №6. С.467—472.
4. Meylan G., Heggie D.C. // The Astron. Astrophys. Rev. 1997. V.8. P.1—143.
5. Ефремов Ю.Н. Очаги звездообразования в галактиках. Звездные комплексы и спиральные рукава. М., 1989.
6. Сурдин В.Г. Письма в «Астрон журн.». 1995. Т.21. №8. С.574—579.
7. Moskal E.V., Surdin V.G. // Astron. and Astrophys. Transactions. 1998. V.15. P.37—43.
8. Данилов Ю.А. // Вопр. истории естествознания и техники. 1993. №1. С.30.
9. Сурдин В.Г. Гигантские молекулярные облака. М., 1990.
10. Сурдин В.Г. // Письма в «Астрон. журн.». 1997. Т.23. №3—4. С.268—272.
11. Сурдин В.Г., Архипова Н.А. // Письма в «Астрон. журн.». 1998. Т.24. №5—6. С.407—414.