

Эволюция от нестационарного состояния в состояние стационарное является универсальным законом природы. Различие состоит лишь в том, что в одних областях, системах, переход в стационарное состояние происходит очень быстро, в других случаях для этого перехода нужны огромные промежутки времени.

Стационарность и нестационарность звездных систем

Звездная система в момент, когда она сформировалась, должна быть нестационарной. Так должно быть потому, что для каждой системы с заданным числом звезд определенной массы, заданными общими потенциальной и кинетической энергиями и заданным общим количеством вращения, имеется лишь одно-единственное стационарное состояние. Все остальные состояния, а их бесчисленное множество, являются нестационарными. Поэтому практически невероятно, чтобы звездная система при формировании оказалась сразу в стационарном состоянии.

Также невозможно, расселив жителей на острове в соответствии с некоторым планом, надеяться, что это точно то самое расселение, которое отвечает условиям жизни и взаимоотношению людей на острове. Безусловно, расселение в соответствии с планом окажется нестационарным, жизнь внесет в него свои поправки, стационарное состояние будет достигнуто в результате взаимодействия людей и природы и людей между собой.

Если при составлении плана расселения людей на острове будут учтены географические особенности острова, то распределение поселенцев на острове, определяемое планом, хотя и не будет стационарным, но окажется сравнительно близким к нему. Поправки, внесенные жизнью, будут невелики. В том же случае, если географические особенности острова не будут учитываться или будут учитываться неправильно, например, если большая часть поселенцев будет размещена во внутренней гористой области острова, а не на плодородных землях побережья, то полученное нестационарное распределение будет очень далеким от стационарного, эволюция к стационарному распределению будет сопровождаться коренными изменениями в расселении поселенцев.

Таким образом, среди нестационарных состояний одни близки к стационарному, другие далеки от него.

Звездная система, нужно полагать, в момент, когда она сформировалась, находится в состоянии, весьма далеком от стационарного. Это утверждение вытекает из того, что формирование звездной системы есть, по всем данным, процесс, характеризующийся резким изменением состояний вещества и сопровождающийся выделением огромных количеств энергии. Результатом таких резких изменений состояния всегда является нестационарность.

Даже в том случае, если верна гипотеза формирования звезд и звездных систем из диффузной материи и, следовательно, процесс формирования протекает менее бурно, без выделения больших количеств энергии, звездная система в начальный момент окажется в состоянии, весьма далеком от стационарного. В самом деле, представим себе сферическое газовое облако, достигшее стационарного состояния. В этом облаке притяжение материи в направлении центра облака уравнивается газовым давлением, поэтому газ в целом неподвижен, хотя отдельные молекулы, разумеется, движутся.

Допустим теперь, что весь газ этого облака сконденсировался в отдельные звезды, сформировалась звездная система. В самый первый момент после формирования звезды будут неподвижны, так как были неподвижны массы газа, из которых сконденсировались звезды. Притяжение к центру системы сохранит свою величину, так как сила тяготения зависит от массы, а масса системы не изменилась. А вот давления газа, уравнивающего это притяжение, теперь уже не будет. Все звезды начнут двигаться в направлении центра системы, система начнет сжиматься, следовательно, она станет нестационарной.

Подчиняясь универсальному закону природы, звездная система после этого должна эволюционировать, стремясь к стационарному состоянию.

Вот здесь необходимо рассмотреть влияние регулярных и иррегулярных сил отдельно. Во всех звездных системах с числом членов, большим нескольких десятков, т. е. в шаровых скоплениях и галактиках, регулярные силы эффективнее, действуют быстрее, чем иррегулярные силы, поэтому сначала достигается стационарность, как принято говорить, в регулярном поле. Это означает достижение такого состояния, при котором ни распределение звезд в системе, ни распределение скоростей звезд не

меняется в результате действия одних регулярных сил. При таком состоянии каждая звезда движется и скорость ее меняется. Но как только из данного места системы под действием регулярных сил уходит звезда, регулярные силы в это же место приводят другую звезду, обладающую той же скоростью, поэтому хотя звезды меняются, положение в каждом месте системы остается неизменным.

Возвратимся к примеру возможного формирования звездной системы в результате конденсации звезд в сферическом газовом облаке. Как мы уже отметили, сразу после формирования каждая звезда станет двигаться к центру. В центре системы звезда достигнет наибольшей скорости, пройдет центр и станет удаляться от него, теряя постепенно скорость, остановится на некотором расстоянии и снова двинется в сторону центра. Так каждая звезда будет совершать радиальные колебания через центр системы. Но период колебания разных звезд около центра будет различным, поэтому если в самом начале все звезды двигались в направлении центра, то после того, как каждая из них совершит несколько колебаний, в каждый данный момент часть звезд будет приближаться к центру, а часть удаляться от него. Произойдет перемешивание звезд. Наконец, наступит время, когда в каждой точке системы число звезд, движущихся в сторону центра, будет равно числу звезд, движущихся от него. Это и будет состояние стационарное в регулярном поле.

В дальнейшем регулярные силы не будут изменять ни распределения звезд в системе, ни распределения скоростей звезд. Время перехода в состояние стационарное в регулярном поле равно, следовательно, нескольким периодам колебаний звезды около центра. Можно подсчитать, что это время T_1 , выраженное в секундах, приблизительно равно

$$T_1 = \frac{2}{\sqrt{G\rho}}, \quad (54)$$

где G — постоянная тяготения, а ρ — средняя плотность системы, выраженная в граммах на 1 куб. сантиметр. Как показывает формула (54), время перехода в состояние стационарное в регулярном поле зависит только от средней плотности системы.

В рассеянных и шаровых звездных скоплениях средняя плотность материи равна приблизительно 10^{-22} — 10^{-23} г/см³, поэтому для звездных скоплений время пере-

хода в состоянии стационарное в регулярном поле приблизительно равно $3 \cdot 10^7 - 10^8$ лет. Этот промежуток времени в масштабах космогонии невелик, — возраст звезд в шаровых скоплениях в десятки раз больше. Значит, шаровые скопления должны были давно успеть перейти в состояние стационарное в регулярном поле. И действительно, правильная форма шаровых скоплений, закономерное увеличение звездной плотности по мере приближения к их центру показывают, что в шаровых скоплениях достигнута стационарность в регулярном поле.

У рассеянных скоплений форма менее правильна. Но, во-первых, некоторые рассеянные скопления очень молоды, их возраст меньше 10^8 лет и, возможно, они еще нестационарны. Во-вторых, система, состоящая всего из нескольких десятков звезд и уже достигшая стационарного состояния, будет все-таки не вполне симметричной просто потому, что всякое случайное отклонение положения одной, двух, нескольких звезд, вызываемое иррегулярными силами, существенно нарушает симметрию системы.

Средняя плотность галактик меньше средней плотности звездных скоплений и составляет $10^{-23} - 10^{-24}$ г/см³. Кроме того, галактики, в отличие от звездных скоплений, являются вращающимися системами. В них перемешивание, вызываемое регулярными силами, происходит медленнее, и время перехода в состояние стационарное в регулярном поле больше того, которое получается по формуле (54). Его можно оценить в $3 \cdot 10^8 - 10^9$ лет, т. е. в несколько периодов обращения Солнца около центра Галактики.

Можно ли считать, что наша Галактика и другие галактики достигли стационарности в регулярном поле? Возраст Солнца оценивается в $5 \cdot 10^9$ лет или больше. Если бы все звезды галактик, а следовательно, и сами галактики, имели тот же возраст, то состояние стационарное в регулярном поле должно было быть достигнуто давно, галактики имели бы строго правильную форму, близкую к сжатому эллипсоиду вращения. И действительно, эллиптические галактики имеют правильную форму, близкую к форме сжатого эллипсоида вращения. Нельзя заметить никаких неправильностей, отклонений, даже мелких, от этой формы.

В спиральных галактиках (в том числе в нашей Галактике) подавляющая часть населения образует пра-

вильную симметричную систему, сходную со сжатым эллипсоидом вращения. Но наряду с этим в спиральных галактиках наблюдается спиральная структура и ряд неправильностей строения. Все эти отклонения от правильной эллипсоидальной формы в основном связаны с особым расположением звезд горячих гигантов и других молодых звезд. Естественно, что недавно образовавшиеся звезды еще не успели в достаточной степени испытать воздействие регулярного поля галактики. Мы можем сказать, что подсистема горячих гигантов и других молодых звезд еще не достигла состояния, стационарного в регулярном поле. Таким образом, изучение строения и динамики спиральных галактик приводит к выводу, что подавляющая часть звезд этих звездных систем сформировалась раньше, чем миллиард лет назад. Небольшая часть звезд сформировалась «недавно», менее миллиарда лет назад. Эти звезды, в основном горячие гиганты, имеют огромные светимости, поэтому, хотя число их и невелико, образуемая ими спиральная структура и ряд местных уплотнений в спиральных галактиках оптически выражены очень отчетливо, если, разумеется, наблюдать со стороны. При наблюдении изнутри картина спиральной структуры смазывается. Например, в спиральной галактике NGC 5457 (см. рис. 65) яркие спиральные ветви, кажется, излучают больше, чем все остальные области этой галактики. Но общая масса всех горячих гигантов, создающих сияние спиральных ветвей, составляет менее тысячной доли массы галактики.

Форма неправильных галактик явно показывает, что они не находятся в состоянии, стационарном в регулярном поле. Значит ли это, что подавляющая часть звезд неправильных галактик моложе миллиарда лет? Нет, такой вывод был бы поспешным. Система, достигшая стационарного состояния, может стать снова нестационарной в результате действия внешних сил. Если, например, тесно сблизятся две галактики, то взаимное приливное действие исказит форму каждой из них. Давно было замечено, что галактики типа II встречаются, как правило, парами. По-видимому, неправильная форма таких галактик объясняется изменениями, вызванными взаимным приливным действием. Ярким примером такой пары неправильных галактик являются Большое и Малое Магеллановы Облака. Возможно, что сильные искажения их формы вызваны и близостью нашей Галактики, имеющей

значительно большую массу, чем масса Магеллановых Облаков. Весьма интересно, что детальное изучение строения Магеллановых Облаков, выполненное Вокулером, обнаружило в каждом из них признаки спиральной структуры. Нужно думать, что и спиральная структура в результате действия приливных сил подверглась искажениям, стала неотчетливой.

Степень искажения формы и степень нестационарности зависят от того, насколько тесно сблизилась две галактики. Может быть, в данный момент расстояние между ними не очень мало, но если до этого они были ближе друг к другу, искажение форм могло быть сильным и оно будет сохраняться в течение периода, пока галактики не достигнут снова состояния стационарного в регулярном поле.

Общая плотность материи в скоплениях галактик значительно ниже, чем в самих галактиках, и равна 10^{-28} — 10^{-27} г/см³. Время достижения состояния стационарного в регулярном поле составляет $3 \cdot 10^9$ — 10^{10} лет. Этот период времени примерно равен оценке возраста обозреваемой области Вселенной и самих скоплений галактик. Поэтому процесс перехода в состояние стационарное в регулярном поле для тех скоплений галактик, которые устойчивы, может быть, только недавно завершился, а может быть, еще и не произошел. Как мы выяснили выше, неправильные скопления галактик, подобные скоплению в Деве или в Печи, неустойчивы и должны распадаться. Имеет смысл говорить о переходе в стационарное состояние лишь правильных сферических скоплений галактик, подобных скоплению в Волосах Вероники и в Северной Короне. Изучение скопления в Волосах Вероники показывает, что в его областях, близких к центру, расположение галактик обнаруживает симметрию, а число галактик в единице объема пространства закономерно и быстро растет по мере приближения к центру скопления. На периферии же скопления видны существенные неоднородности в распределении галактик, значительные нарушения симметрии. Можно считать, что центральные области скопления достигли состояния стационарного в регулярном поле, а периферийные области еще нет. Эта точка зрения подкрепляется тем, что во внутренних областях скопления плотность материи выше и потому переход в стационарность здесь должен происходить быстрее.

Как мы видим, разные части одной и той же системы могут находиться на разных стадиях эволюции. Так как в центральных областях звездных систем и систем галактик плотность материи более высокая, то эти области в ходе эволюции опережают другие части системы. Регулярные силы действуют быстрее иррегулярных там, где число звезд больше нескольких десятков. Поэтому, когда система стала стационарной в регулярном поле,

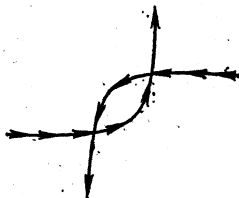


Рис. 121. Изменение направлений скоростей при звездных сближениях.

она еще нестационарна в иррегулярном поле. Это значит, что иррегулярные силы — силы, возникающие при звездных сближениях, изменяют распределение звезд в системе и распределение скоростей звезд. В нашем примере со звездной системой, сформировавшейся в сферическом газовом облаке, звезды под действием регулярных сил совершают радиальные колебания через центр системы и перемешиваются. Но регулярная сила в сферической системе всегда направлена точно в центр системы и потому под ее действием радиальные колебания всегда останутся радиальными колебаниями. Поперечные скорости не смогут появиться. Иное дело — иррегулярные силы. При сближении две звезды описывают одна относительно другой гиперболические орбиты, как это показано на рис. 121, направление их скоростей после сближения изменяется. Постепенно под действием иррегулярных сил все направления для скоростей становятся равноправными. Число звезд, движущихся в радиальном и поперечном направлениях, сравнивается. Помимо равномерного распределения по направлениям устанавливается определенное распределение по величинам скоростей, называемое максвелловским распределением. При этом распределении число тел, имеющих скорость v , пропорционально

$$v^2 e^{-3v^2/2\bar{v}^2}$$

Здесь \bar{v} — средняя скорость, тел в системе, а e — основание натуральных логарифмов, постоянное число, широко употребляемое в высшей математике и равное приблизительно 2,72.

Выражение (55) показывает, что при максвелловском распределении преобладают скорости, близкие к средней скорости. Число тел с очень малыми скоростями незначительно, так как при этом мал множитель v^2 . Мало и число тел с большими скоростями, так как при увеличении v очень быстро уменьшается множитель $e^{-3v^2/2\bar{v}^2}$.

Австрийский физик Больцман доказал, что в результате взаимодействий сближающихся тел, какие бы тела ни были и какие бы силы между ними ни действовали, всегда в конечном счете устанавливается максвелловское распределение скоростей. Поэтому и скорости молекул окружающего нас воздуха и скорости звезд в той системе, где установилось состояние стационарное в иррегулярном поле, распределены по максвелловскому закону. В свою очередь изменение скоростей вызывает новое перераспределение звезд в пространстве. Когда этот процесс закончится, система достигнет состояния стационарного в иррегулярном поле. Необходимое для этого время называют временем релаксации. Теоретическое исследование показывает, что оно приблизительно равно

$$T_2 = \frac{\bar{v}^3}{200G^2M^2D}. \quad (56)$$

Время релаксации тем меньше, чем больше D — число звезд в единице объема, так как при большей звездной плотности звезды чаще тесно сближаются, иррегулярные силы действуют быстрее. Эти силы тем больше, чем массивнее каждая из сблизившихся звезд, поэтому большие массы M сильно способствуют эффективности иррегулярных сил. А большие скорости, наоборот, сильно уменьшают роль иррегулярных сил. Это объясняется тем, что две звезды, при сближении быстро пролетевшие одна около другой, просто не успевают значительно повлиять друг на друга, изменить друг у друга величину и направление скорости. Поэтому время релаксации пропорционально даже третьей степени средней скорости \bar{v} звезд в системе.

В рассеянных скоплениях средняя скорость звезд невелика и равна 0,3—0,4 км/с. Поэтому время релаксации

в рассеянных скоплениях не очень велико: оно составляет 10^7 — 10^8 лет. В рассеянных скоплениях состояниях, стационарные в регулярном и в иррегулярном поле, достигаются приблизительно одновременно.

В шаровых скоплениях средние скорости звезд приблизительно в 10 раз больше, а следовательно, время релаксации приблизительно в 1000 раз больше. Ясно, что шаровые скопления еще не успели достигнуть состояния стационарного в иррегулярном поле. Впрочем, в центральных областях шаровых скоплений очень высокая звездная плотность D . Это способствует уменьшению времени релаксации, и надо полагать, что центральные области шаровых скоплений уже стационарны в иррегулярном поле.

В галактиках средние относительные скорости звезд еще в десять раз больше, чем средние скорости в шаровых скоплениях. Поэтому время релаксации в галактиках очень велико, порядка 10^{13} — 10^{14} лет, т. е. в тысячи раз больше времени существования галактик. То, что иррегулярные силы в Галактике еще не успели сработать, подтверждается и наблюдаемым распределением скоростей звезд в окрестности Солнца. Вместо максвелловского распределения скоростей, при котором все направления скоростей равноправны, в окрестности Солнца звезды преимущественно движутся в направлении на центр Галактики и от него, а скорости, перпендикулярные к основной плоскости Галактики, встречаются редко. Только в ядрах галактик, где скорости звезд меньше, а звездная плотность больше, по-видимому, достигнута стационарность в иррегулярном поле.

Большой величине времени релаксации в скоплениях галактик сильно способствуют их огромные скорости одна относительно другой, равные нескольким сотням километров в секунду, и очень малое число галактик в единице объема D . Уменьшают время релаксации гигантские массы галактик — членов скопления. В итоге время релаксации получается равным 10^{11} — 10^{13} лет, из чего ясно, что скопления галактик не могли достигнуть стационарности в иррегулярном поле.

Диссипация звездных систем

Две противоположные точки зрения, рассматривающие происхождение звезд: первая — как процесс сжатия массивного диффузного облака и вторая — как процесс рас-