

Г. к. связан с потерей устойчивости объекта по отношению к сжатию. После потери устойчивости с течением времени объект всё сильнее отклоняется от исходного состояния равновесия между силами давления и гравитации, причём силы гравитации начинают преобладать над силами давления, что вызывает дальнейшее ускорение сжатия. На языке изложенной выше элементарной теории это означает, что коэф. α , к-рый вначале очень мал, быстро увеличивается и становится близким к 1.

В основе Г. к. при рождении звёзд и при образовании нейтронных звёзд и чёрных дыр лежат совершенно различные физ. процессы. Однако гидродинамич. картина развития Г. к. в осн. чертах одинакова в обоих случаях.

Рождение звёзд связано с джипсовской *гравитационной неустойчивостью* межзвёздной среды. Большое значение имеет также повышение давления на границе протозвёздного газопылевого облака, к-рое может возникнуть либо в результате ионизации наружных слоёв облака излучением горячих молодых звёзд, либо при отбегании облака ударной волной от взорвавшейся по соседству сверхновой звезды, либо, наконец, при столкновении с др. газопылевым облаком. Г. к. протозвёздного облака облегчается тем, что значит. часть выделяющейся при сжатии гравитац. энергии идёт не на повышение противодействующего сжатию давления, а уносится в виде ИК-излучения, испускаемого молекулами и пылью.

При образовании нейтронных звёзд и чёрных дыр толчком к началу Г. к. служат потеря звездой устойчивости вследствие диссоциации атомных ядер на составляющие их нуклоны и (или) *нейтронизация вещества* звезды (массивной захват атомными ядрами электронов), сопровождаемые интенсивными потерями энергии путём испускания электронных нейтрино.

Начавшийся Г. к. развивается во всё более ускоренном темпе в осн. по двум причинам. Во-первых, затраты энергии на расщепление частиц вещества (диссоциация молекул и ионизация атомов при сжатии протозвёздных облаков, диссоциация атомных ядер при образовании нейтронных звёзд) приводят к снижению показателя адиабаты γ , а следовательно, давления p (p и ρ при адиабатич. сжатии связаны соотношением $p \sim \rho^\gamma$). С уменьшением радиуса R объёма, занятого заданной массой газа, плотность увеличивается как R^{-3} , а сила давления, пропорциональная $R^2 p$, растёт соответственно как $R^{2-3\gamma}$. Поэтому сила тяжести, пропорциональная R^{-2} , будет возрастать при сжатии быстрее силы давления, если выполнено неравенство $2-3\gamma > -2$, или $\gamma < 4/3$. Т. о., если γ меньше критич. значения $4/3$, то по мере сжатия сила давления становится всё меньше по сравнению с силой гравитации и Г. к. переходит в режим свободного падения ($\alpha \approx 1$). Во-вторых, интенсивные потери энергии на излучение во время Г. к. приводят к существенному снижению коэф. пропорциональности между p и ρ^γ . В результате Г. к., начавшись при $\gamma < 4/3$, может продолжаться, даже если впоследствии это неравенство и не выполняется.

В центре реальных объектов перед началом Г. к. плотность значительно больше, чем в наружных слоях. Кроме того, преобладание сил гравитации над силами давления сказывается сильнее вблизи центра, где вскоре после начала Г. к. $\alpha \approx 1$, тогда как наружные слои остаются практически в равновесии ($\alpha \approx 0$). Поэтому характерное время Г. к. t_0 для слоёв, расположенных вблизи центра, меньше, чем для удаленных слоёв, и Г. к. с самого начала развивается неоднородным образом: в центр. области объекта выделяется почти однородное коллапсирующее ядро, после чего в более медленном темпе начинают стягиваться к центру лишённые «опоры» внеш. слои. Детальное описание Г. к. можно получить лишь с помощью быстродействующих ЭВМ

с учётом конкретных механизмов потерь энергии (ИК-излучение или нейтрино) и др. физ. свойств коллапсирующего вещества (*уравнения состояния*, кинетики сопутствующих элементарных процессов: диссоциации молекул, ионизации атомов, испарения пыли или диссоциации атомных ядер и нейтронизации). Сжатие выделившегося центр. ядра происходит примерно так же, как и Г. к. однородной сферы (рис. 1). Для наружных слоёв центр. ядро играет роль точечной массы, на к-рую они осаждаются в режиме нестационарной аккреции. Поэтому в первом приближении Г. к. можно представить как комбинацию этих простых вариантов сжатия (рис. 2). Расчёты на ЭВМ приводят к картине Г. к., качественно совпадающей с показанной на рис. 2.

Прекращение Г. к. связано со значит. увеличением плотности в центре коллапсирующего объекта (при одноврем. возрастании темп-ры). Прежде всего вблизи центра заканчиваются процессы диссоциации и ионизации и поэтому устанавливается неравенство $\gamma > 4/3$. Затем центр. область коллапсирующего объекта становится непрозрачной для излучения и резко замедля-

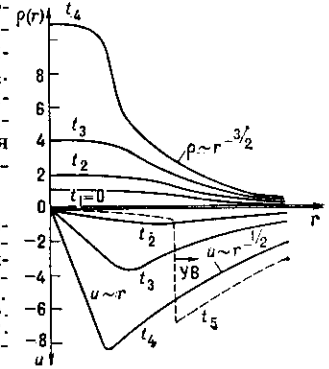


Рис. 2. Качественный вид распределений плотности и скорости при гравитационном коллапсе в последовательные моменты времени t_1 ($=0$) $< t_2 < \dots < t_4$ (в условных единицах). УВ — фронт ударной волны. Распределение плотности в момент t_5 не показано.

ется рост потерь энергии. В результате силы давления начинают расти быстрее сил гравитации и сжатие центр. ядра вскоре прекращается. Наступает вторая стадия Г. к. — выпадение (аккреция) на сколлапсировавшее ядро наружных слоёв оболочки. Ядро отделено от оболочки характерным минимумом в распределении скорости (рис. 2), в к-ром абс. величина скорости превышает скорость звука. Поэтому после остановки ядра вещество оболочки наталкивается на него со сверхзвуковой скоростью, образуя фронт сильной ударной волны (УВ), показанной на рис. 2 пунктиром. В центр. области объекта возникает избыток давления, под действием к-рого фронт УВ перемещается в наружном направлении. УВ не только останавливает падение оболочки, но может также придать наружному слою скорость, направленную от центра. Этот обнаруженный в детальных расчётах Г. к. эффект наз. гидродинамич. отражением (или отскоком). Его существование важно для диагностики Г. к. в наблюдениях, и в частности для теории вспышек *сверхновых звёзд*.

После выпадения на ядро осн. массы оболочки и затухания вызванных гидродинамич. отражением пульсаций ядра Г. к. фактически заканчивается. Однако значит. доля выделившейся в процессе Г. к. энергии не успевает излучиться и оказывается запасённой в виде теплоты в образовавшемся плотном гидростатически равновесном объекте (в протозвезде или в горячей нейтронной звезде). Излучение этой энергии обеспечивается медленным (по сравнению с характерным временем Г. к. t_0) процессом лучистой (в случае нейтронной звезды — нейтринной) теплопроводности. Существенный вклад в перенос энергии от центра к поверхности объекта может вносить также *конвекция*. По мере излучения энергии протозвезда продолжает медленно сжиматься и постепенно освобождается от заключённых в ней больших запасов гравитац. энергии. В соответствии с *вириала теоремой*, темп-ра в центре протозвезды повышается и в конце концов достигает величины, достаточной для протекания *термоядерных реакций*, — протозвезда превращается в обычную звезду.