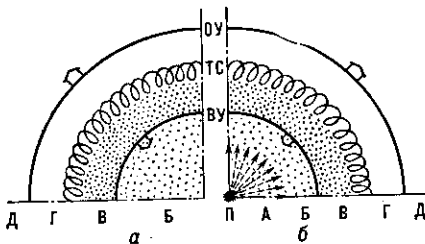


месте «исторических» сверхновых, вспыхнувших в Галактике за последнее тысячелетие. Молодые О. в. с. сохранили непосредств. следы взрыва звезды и поэтому представляют большой интерес для физики сверхновых звезд. По наблюдаемым свойствам О. в. с. и кривым блеска (зависимостям блеска от времени) сверхновых, породивших их, молодые объекты можно разделить на три группы. К первой группе относятся О. в. с. 1006, О. в. с. Тихо Браге (1572) и О. в. с. Кеплера (1604). Они образовались при вспышках сверхновых I типа, звездные остатки в них не обнаружены. Крабовидная туманность (О. в. с. 1054) и ЗС58 (О. в. с. 1181) составляют вторую группу. Эти О. в. с. возникли в результате вспышек сверхновых II типа, к-рые сопровождаются образованием нейтронных звезд — пульсаров. Представителем третьей группы (называемой «богатые кислородом» О. в. с.) является радиосточник Кассиопея А. Вспышка сверхновой, давшей этот О. в. с., была на 5-6<sup>m</sup> слабее обычных сверхновых I и II типов и поэтому не была зафиксирована астрономами; звездный остаток не обнаружен.

Взаимодействие выброшенного при вспышке сверхновой газа с окружающей средой описывается газодинамич. структурой с двумя ударными волнами (рис. 1). Основная ударная волна бежит наружу в невозмущенной межзвездной среде, если же вспышке предшествовала стадия истечения массы в форме *звездного ветра*, то сначала в потерянном предсверхновой веществе. При прохождении через фронт ударной волны околозвездный газ сжимается, нагревается и приобретает характерную для выброшенного вещества скорость. Возвратная ударная волна распространяется внутрь в выброшенном газе, и в ней этот газ сжимается, нагревается и тормозится. Иалучение горячего газа как за фронтом осн. ударной волны, так и за фронтом возвратной ударной волны носит тепловой характер и приходится на рентг. диапазон. В области, ограниченной основной и возвратной ударными волнами, находится граница между нагретым веществом и выброшенным газом. Вблизи границы возникает неустойчивость Рэлея — Тейлора, к-рая приводит к образованию в этом месте турбулентного слоя. На фронте осн. ударной волны и в турбулентном слое происходит ускорение реля-

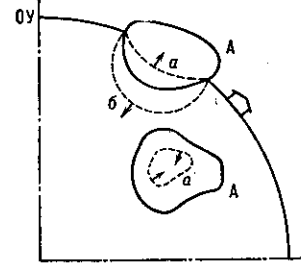
Рис. 1. Схемы остатков сверхновых звезд без звездного остатка (а) и с центральным пульсаром (б); П — звездный остаток в виде пульсара; ВУ — возвратная ударная волна; ТС — турбулентный слой на границе между выброшенным и нагретым веществом; ОУ — основная ударная волна; А, Б, В — выброшенный газ (А — внутренние слои выброшенного газа, пронизанные релятивистскими электронами, инжектируемыми пульсаром; В — выброшенный газ, сжатый и нагретый возвратной ударной волной); Г — околозвездный газ, сгребенный и нагретый основной ударной волной; Д — невозмущенная околозвездная среда. Широкие стрелки указывают направления распространения ударных волн относительно вещества.



тивистских электронов и усиление магн. поля. Эти области представляют собой источники нетеплового синхротронного радиоизлучения, имеющие оболочечную структуру. При наличии *пульсара* внутр. слои выброшенного вещества пронизываются релятивистскими электронами, инжектируемыми пульсаром, и вследствие этого являются мощным источником синхротронного излучения не только на радиочастотах, но и в оптич. и рентг. диапазонах. Выброшенный газ и околозвездное вещество могут иметь неоднородную клочковатую структуру, к-рая проявляется в виде конденсаций и волокон. По мере расширения О. в. с. и увеличения его размеров

осн. ударная волна обжимает находящиеся в межзвездной среде плотные облака (рис. 2), к-рые в свою очередь образуют крупномасштабную волокнистую структуру О. в. с.

Рис. 2. Схема распространения ударных волн в среде с неоднородностями плотности — плотными конденсациями в околозвездном газе или плотными облаками в межзвездной среде; ОУ — неоднородности плотности; А — основная ударная волна, бегающая по невозмущенной среде между неоднородностями плотности; а — вторичная ударная волна, распространяющаяся внутрь неоднородностей плотности; б — отраженная ударная волна.



Эволюция О. в. с. — процесс торможения выброшенного газа при расширении в окружающую среду — определяется гл. обр. энергией взрыва  $E_0$ , массой выброшенного газа  $M_0$  и плотностью околозвездной среды  $\rho_0$ . В эволюции О. в. с. можно выделить три стадии: стадии свободного разлета, адиабатическая и радиативная стадии. На этих стадиях (за исключением самого начала стадии свободного разлета и, возможно, заключит. фазы радиативной стадии) О. в. с. имеют описанную выше структуру. На первой стадии из-за низкой плотности окружающей среды расширение выброшенного газа происходит в режиме свободного разлета, когда радиус  $R_s$ , скорость  $v_s$  фронта осн. ударной волны и возраст О. в. с.  $t$  связаны соотношением  $R_s = v_s t$ . В течение этой стадии почти вся энергия взрыва сосредоточена в кинетич. энергии выброшенного газа. По мере расширения торможение усиливается и, когда масса нагретого вещества  $(4\pi/3)R_s^3\rho_0$  становится сравнимой с  $M_0$ , происходит переход к адиабатич. стадии. Для характерных значений  $E_0 = 3 \cdot 10^{50}$  эрг,  $M_0 = 1 M_\odot$  ( $M_\odot$  — масса Солнца) и  $\rho_0 = 10^{-24}$  г/см<sup>3</sup> этот момент соответствует  $R_s = 2,5$  пк и  $t = R_s/(2E_0/M_0)^{1/2} \approx 460$  лет. На адиабатич. стадии потери энергии на излучение малы по сравнению с энергией взрыва, поэтому энергия газа, находящегося за фронтом осн. ударной волны, остаётся припл. постоянной, причём примерно 70% энергии взрыва преобразуется в тепловую энергию нагретого вещества. Адиабатич. расширение О. в. с. описывается соотношениями

$$R_s = 1,15(E_0/\rho_0)^{1/2}t^{2/3} \text{ [см]},$$

$$v_s = 2/3 R_s/t \text{ [см/с]},$$

$$T_s = 1,36 \cdot 10^{-9} v_s^2 \text{ [K]},$$

где  $T_s$  — темп-ра газа за фронтом осн. ударной волны. С увеличением радиуса  $R_s$  темп-ра  $T_s$  уменьшается и, когда она достигает значения  $\approx 6 \cdot 10^5$  К, соответствующего максимуму кривой радиац. потерь, адиабатич. стадия заканчивается и начинается радиативная. К данному моменту излучается ок. 50% тепловой энергии О. в. с., радиус достигает  $\approx 20$  пк, возраст  $\approx 37000$  лет. Интенсивные радиац. потери делают осн. ударную волну изотермической, за её фронтом образуется тонкая, плотная и холодная оболочка, содержащая примерно 50% нагретого вещества. Заключённый внутри оболочки горячий газ в силу своей очень низкой плотности почти не излучает и расширяется адиабатически. Такое поведение О. в. с. на радиативной стадии описывается выражениями

$$R_s = 0,042(E_0/\rho_0)^{1/2}t^{2/3} \text{ [см]},$$

$$v_s = 2/7 R_s/t \text{ [см/с]}.$$

Расширение О. в. с. продолжается до тех пор, пока давление газа в нём не сравняется с давлением невозмущенной межзвездной среды. Это происходит при  $R_s \approx 54$  пк и  $t \approx 10^6$  лет. К этому времени скорость рас-