

Т а б л и ц а 4

Оценки характерных расстояний для рентгеновского пульсара Her X-1

Параметр	Обозначение	Оценка, см	Параметр	Обозначение	Оценка, см
Радиус светового цилиндра	R_l	$\sim 6 \cdot 10^9$	Радиус коротации	R_c	$\sim 3 \cdot 10^8$
Радиус захвата	R_G	$\sim 10^{11}$	Радиус звезды	R_x	$\sim 10^6$
Альвеновский радиус	R_A	$\sim 10^8$			

$\dot{M} \approx 10^{17}$ г/с. Из наблюдений двойной системы известно, что масса нейтронной звезды $\sim 1,5 M_\odot$. Магнитный дипольный момент ее примем равным "стандартному" значению, $\mu = 10^{30}$ Э · см³. Перетекание вещества в этой системе происходит через внутреннюю точку Лагранжа и, следовательно, радиус захвата порядка большой полуоси двойной системы: $R_G \approx a \approx \approx 10^{11}$ см. Легко проверить, что радиус остановки меньше радиуса захвата; поэтому он определяется вторым выражением для альвеновского радиуса в (23.III). В табл. 4 мы приводим характерные величины для пульсара Her X-1. Альвеновский радиус для него равен $\sim 10^8$ см. Из (39.III) видно, что радиус коротации $3 \cdot 10^8$ см. Следовательно, для пульсара Her X-1 $R_{st} \approx R_c$ и $p \approx p_A$. Это удивительное совпадение будет объяснено позже, но оно показывает, что эффект вращения действительно оказывается существенным. Подчеркнем еще, что альвеновский радиус в сотни раз больше радиуса самой звезды. Задолго до того, как вещество попадает на поверхность нейтронной звезды, его движение начинает полностью контролироваться магнитным полем.

§ 7. Номенклатура

Режим взаимодействия замагниченной нейтронной звезды с окружающей плазмой существенно зависит от соотношения между четырьмя характерными расстояниями: радиусом остановки R_{st} , радиусом гравитационного захвата R_G , радиусом светового цилиндра R_l и радиусом коротации R_c . Различие в режимах оказывается настолько сильным, что нейтронные звезды в разных режимах проявляют себя совершенно по-разному. Поэтому, говоря о классификации режимов взаимодействия, можно говорить и о классификации нейтронных звезд. Классификация, обозначения и терминология будут излагаться согласно работам Липунова (1982а, 1984а, 1987а) и Корнилова и Липунова (1983а) (см. табл. 5).

Естественно, что не любая комбинация приведенных характерных величин может реализоваться: например, неравенства $R_l > R_c$ в принципе не может быть; с другой стороны, некоторые комбинации требуют аномально больших или малых параметров нейтронных звезд и являются нереалистичными. Одна и та же нейтронная звезда при неизменных внеш-

них и внутренних условиях может постепенно пройти разные режимы взаимодействия. Такое изменение мы будем называть эволюцией нейтронной звезды.

Опишем классификацию на примере идеализированного сценария эволюции одной нейтронной звезды. Пусть параметры внешней среды ρ_∞ , v_∞ , \dot{M}_c неизменны. Магнитный момент нейтронной звезды будем считать также неизменным. Пусть вначале потенциальный темп аккреции \dot{M}_c не слишком велик, так что обратным эффектом давления излучения можно пренебречь: $\dot{M}_c \leq \dot{M}_{cr}$. Пусть, кроме того, нейтронная звезда вначале вращается настолько быстро, что является мощным источником релятивистского ветра.

Эжектирующие нейтронные звезды (эжекторы). Будем называть эжектирующей нейтронной звездой, или проще — эжектором (Е), такую нейтронную звезду, у которой давление электромагнитного излучения и эжектируемых релятивистских частиц настолько велико, что окружающее вещество "выметается" за радиус захвата или за радиус светового цилиндра (если $R_l > R_G$). На рис. 38 показана качественная конфигурация светового цилиндра и поверхность остановки (каверна) эжектора. Наблюдательным примером эжектора является радиопульсар — одиночная нейтронная звезда (см. гл. VII).

В режиме эжекции нейтронная звезда замедляется, при этом уменьшает мощность релятивистского ветра: $L_m \sim \omega^4 \sim p^{-4}$. Радиус Шварцмана уменьшается и в некоторый момент каверна "схлопывается". Условие "схлопывания" зависит от соотношения между гравитационным радиусом R_G и радиусом светового цилиндра R_l . Астрофизически более правдоподобна ситуация, когда $R_G > R_l$; но не исключен и случай, когда

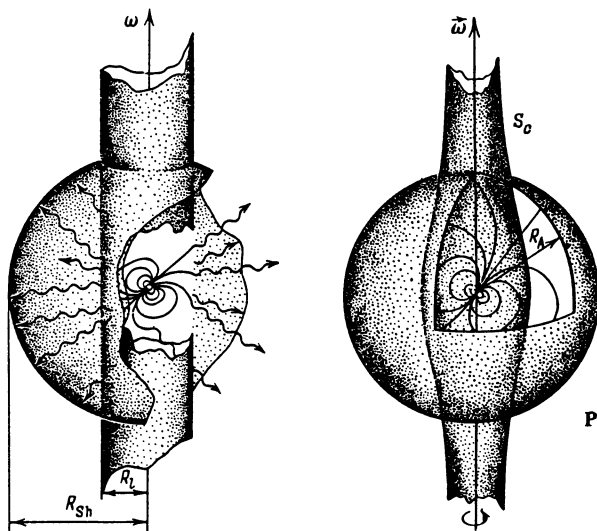


Рис. 38. Поверхность остановки охватывает световой цилиндр (эжектор)

Рис. 39. Режим "пропеллера"

$R_G < R_l$, тогда гравитация незначительна и условием окончания стадии эжектора, естественно, является $R_{st} < R_l$ — наступает новая стадия.

Режим "пропеллера" (P). После окончания стадии эжекции при достаточно общих условиях наступает стадия "пропеллера", на которой аккреции вещества на поверхность замагниченной звезды мешает быстро вращающееся магнитное поле. Как мы увидим дальше, при достаточно большом значении гравимагнитного параметра режим пропеллера может отсутствовать. В режиме пропеллера поверхность остановки (альвеновская поверхность) содержит поверхность S_c внутри себя: $R_{st} < R_c$ (рис. 39). За счет конечной магнитной вязкости момент вращения передается аккрецируемому веществу — нейтронная звезда тормозится. Чтобы началась аккреция, необходимо (но, по-видимому, недостаточно), чтобы скорость на альвеновской поверхности стала меньше кеплеровской: $R_{st} < R_c$. Стадия пропеллера до сих пор остается одной из наименее исследованных. Ряд исследований показывает, что условие $R_{st} < R_c$ не является достаточным для начала аккреции (Дэвис и Прингл, 1981). Но ясно, что рано или поздно нейтронная звезда замедляется настолько, что вращательные эффекты станут не важны и наступит стадия аккреции.

Аккреторы. На стадии аккреции радиус остановки с хорошей точностью оценивается по формуле (23.III). Он должен быть меньше радиуса коротации (см. рис. 37). Такие замагниченные нейтронные звезды, находящиеся на стадии аккреции, будем называть аккреторами. Это наиболее полно исследованный режим взаимодействия нейтронной звезды с аккрецируемой плазмой. Наблюдательные примеры — рентгеновские пульсары и рентгеновские барстеры.

Георотаторы. Предположим, что вращение звезды стало настолько медленным, что не препятствует аккреции плазмы, т.е. выполняются все условия предыдущего пункта. И все же вещество не сможет попасть на поверхность нейтронной звезды, если альвеновский радиус окажется больше

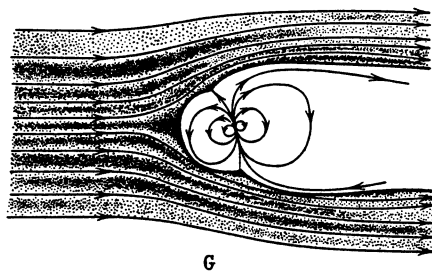


Рис. 40. Георотатор

радиуса захвата (Илларионов и Сюняев, 1975; Липунов, 1982в). Это будет означать, что сила притяжения звезды на альвеновской поверхности незначительна. Аналогичная ситуация реализуется при взаимодействии солнечного ветра с магнитным полем Земли. Напомним, что скорость солнечного ветра ~ 300 км/с, в то же время параболическая скорость для Земли (вторая космическая скорость) — 11 км/с. Относительная роль гравитации при взаимодействии Земли с солнечным ветром $\sim (11/300)^2 \approx 10^{-5}$. Плазма в основном обтекает магнитосферу Земли,

уходя на "бесконечность" (рис. 40). Эта аналогия объясняет название стадии – георотатор.

Следовательно, дополнительным условием, кроме слабого вращения, будет $R_A > R_G$. Из него можно получить соотношение (см. (36.III))

$$y < y_G = \frac{v_\infty^7}{(2GM)^4} \quad (46.III)$$

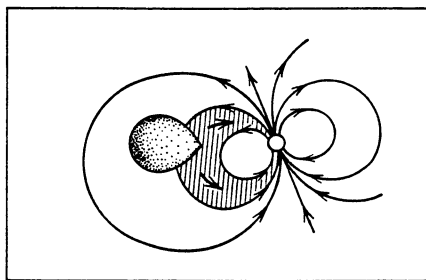
или

$$\mu > \mu_G \approx 3 \cdot 10^{33} m^2 v_8^{-7/2} \dot{M}_{17}^{1/2}. \quad (47.III)$$

Ясно, что георотатор либо обязан обладать большим магнитным полем, либо должен быть помещен в особенно разреженную среду.

Магнитные двойные системы (магнеторы). До сих пор мы рассматривали одиночную нейтронную звезду. Точнее, для рассмотренных выше

Рис. 41. Магнитная двойная система (магнетор)



M

режимов фактически было неважно, входит нейтронная звезда в двойную систему или нет. Но в двойной системе есть еще одно характерное расстояние – большая полуось двойной системы a . В принципе может произойти так, что альвеновский радиус, формально определенный по формуле (23.III), будет больше a : $R_A > a$. Нормальная звезда-соседка окажется внутри альвеновской поверхности замагниченной звезды (рис. 41). Такой тип замагниченных звезд в своеобразных магнитных двойных системах, будем называть магнеторами (M). Этот режим был впервые рассмотрен Митрофановым и др. (1977) для белых карликов в тесных двойных системах, называемых полярами. Для нейтронных звезд тип M может реализоваться только в экстремальных условиях практически полного отсутствия вещества в двойных системах.

Сверхкритические режимы взаимодействия. До сих пор мы считали, что энерговыделение на поверхности остановки меньше эддингтоновского предела. Это вполне оправдано для таких режимов, как G и M, так как гравитация для них не важна. Однако для типов E, P и A это не всегда так. Критический темп аккреции, при котором достигается эддингтоновский предел, ничем не выделен (29.II):

$$\dot{M}_{cr} \approx 10^{18} R_6 \text{ г/с} \approx 1,5 \cdot 10^{-8} R_6 M_\odot / \text{год}.$$

В то же время при обмене массой в массивных двойных системах темп аккреции может достигать значений в десятки тысяч раз больше \dot{M}_{cr} .

Как мы видели в предыдущей главе, в динамической модели сверхкритической аккреции большая часть вещества образует оттекающий поток, окутывая нейтронную звезду совершенно непрозрачной оболочкой. Совершенно необычны астрофизические проявления нейтронной звезды в таком режиме (см. гл. VIII). Поэтому выделяются еще три типа в зависимости от соотношения между характерными размерами (см. табл. 5):

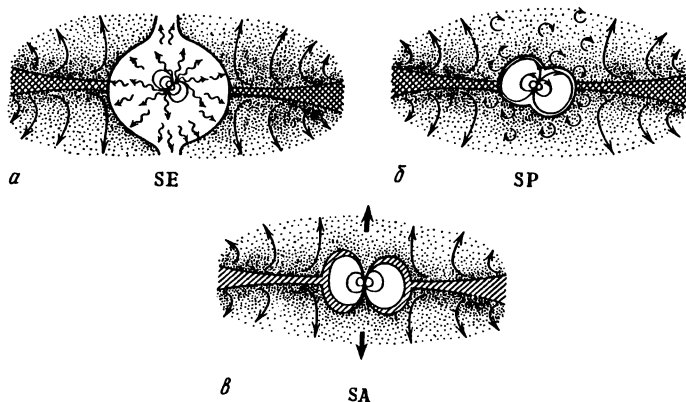


Рис. 42. Сверхкритические режимы

SE – суперэжектор (рис. 42, а), SP – суперпропеллер (рис. 42, б) и SA – супераккретор (рис. 42, в).

Коллапс в черную дыру (ВН). В процессе аккреции на нейтронную звезду монотонно растет ее масса (в особенности быстро в режиме сверхкритической аккреции). Если масса нейтронной звезды превзойдет предел Оппенгеймера–Волкова M_{OV} , звезда неизбежно сколлапсирует в черную дыру. По нашему мнению, это не подлежащий сомнению, совершенно реальный путь рождения черных дыр в Галактике (см. Корнилов и Липунов, 1983б). Описанная выше классификация подытожена в табл. 5.

Т а б л и ц а 5
Классификация нейтронных звезд

Обозначение	Название	Соотношение между характерными расстояниями	Темп аккреции
E	Эжектор	$R_{st} > \max\{R_G, R_I\}$	$\dot{M}_c < \dot{M}_{cr}$
P	Пропеллер	$R_c < R_{st} < \max\{R_G, R_I\}$	''
A	Аккретор	$R_{st} < \min\{R_c, R_G\}$	''
G	Георотатор	$R_G < R_{st} < R_c$	''
M	Магнетор	$R_{st} > a, R_c > a$	''
SE	Суперэжектор	$R_{st} > R_I$	$\dot{M}_c > \dot{M}_{cr}$
SP	Суперпропеллер	$R_c < R_{st} < R_I$	''
SA	Супераккретор	$R_{st} < R_c, R_{st} < R_G$	''
ВН	Черная дыра	$M_x > M_{OV}$	произвольный