

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 10

МАЙ, 1974

ВЫПУСК 2

ПОЧЕМУ РЕЛЯТИВИСТСКИЕ ЗВЕЗДЫ ИЗБЕГАЮТ ДВОЙСТВЕННОСТИ?

О. Х. ГУСЕЙНОВ, Х. И. НОВРУЗОВА

Поступила 10 августа 1973

Анализируется возможность встречи релятивистской звезды в двойной системе. На основании данных о пульсарах, Сверхновых, распределения А-В звезд в парах, тесных двойных системах и белых карликах делается вывод о том, что релятивистские звезды в двойных системах должны встречаться крайне редко: не более 1% релятивистских звезд могут входить в пары, и в основном это будут нейтронные звезды, а не черные дыры. Независимо от того, одиночна звезда или входит в пару, в ходе эволюции она теряет массу порядка 70%. В двойных системах, даже в тесных, почти вся потерянная компонентами масса уходит за пределы системы. Предлагается эволюционная схема для звезд. Утверждается, что остатки Сверхновых в Галактике, которые принимаются за II тип, находятся в плотной среде и значительно увеличили свои массы за счет межзвездного вещества. Масса, выброшенная при вспышке Сверхновой звезды, редко превосходит массу Солнца.

В связи с открытием пульсаров и особенно рентгеновских источников в двойных системах очень важно проанализировать возможность встречи релятивистской звезды в двойной системе.

Если предположить в двойной системе сферически-симметричный взрыв Сверхновой, то кинетическая энергия, полученная обычной компонентой от потока выброшенного вещества, равна

$$E = \frac{E_0 R_1^4}{16a^4} \frac{\alpha \mathfrak{M}_2}{\mathfrak{M}_1 + \mathfrak{M}_2 \alpha R_1^2 / 4a^2}, \quad (1)$$

где α — доля выброшенной массы, E_0 — кинетическая энергия всего выброшенного вещества в момент выхода за орбиту первого компонента, a — расстояние между компонентами, \mathfrak{M}_2 — масса взрывающейся звезды, \mathfrak{M}_1 и R_1 — масса и радиус обычной звезды. Отсюда можно

получить выражение для расстояния, на котором возможен разрыв пары,

$$a \leq \frac{R_1}{2} \frac{\mathfrak{M}_2}{\mathfrak{M}_1} \left| \frac{E_0 R_1}{\gamma \mathfrak{M}_2^2} \frac{1}{2(1-x) \mathfrak{M}_2/\mathfrak{M}_1} \right. \quad (2)$$

Полагая $x=1/2$, $R_1=1.3 \cdot 10^{11}$ см, $\mathfrak{M}_1 = \mathfrak{M}_2 = 6 \cdot 10^{33}$ г, $E_0 = 10^{51}$ эрг, получим $a \leq 2 \cdot 10^{11}$ см, т. е. a — величина, очень близкая к радиусу самой звезды. Таким образом, сферически-симметричный взрыв практически не дает разрыва.

Но тот факт, что пульсары — продукты взрыва Сверхновых — одиночные объекты, не согласуется с сохранением пары при взрывах. Поэтому рассмотрим другой вариант: асимметричный взрыв при образовании релятивистской звезды в двойной системе. Условие разрыва в этом случае приближенно будет:

$$\frac{\mathfrak{M}_2 v^2}{2} > \frac{\gamma \mathfrak{M}_1 \mathfrak{M}_2}{a}, \quad (3)$$

откуда

$$a > \frac{2\gamma \mathfrak{M}_1}{v^2},$$

где \mathfrak{M}_2 — масса релятивистской компоненты, \mathfrak{M}_1 — масса обычной компоненты, a — ближайшее расстояние, на котором возможен разрыв.

Средняя величина пространственной скорости пульсаров порядка 100 км/сек [1 — 4]. Поэтому, подставляя в (3) $v = 100$ км/сек, можно получить предельное расстояние между компонентами, на котором возможен разрыв.

Таблица 1

РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ КОМПОНЕНТАМИ И ПЕРИОДЫ ОБРАЩЕНИЯ ДЛЯ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ, ДЛЯ КОТОРЫХ УДОВЛЕТВОРЯЕТСЯ УСЛОВИЕ РАЗРЫВА ПАРЫ

$\mathfrak{M}_1/\mathfrak{M}_2$	a (см)	P (дни)	$a_{ТДС}$ (см)	$P_{ТДС}$ (дни)
$\mathfrak{M}_1 = \mathfrak{M}_2 = 2$	$5 \cdot 10^{12}$	29	$3 \cdot 10^{12}$	14
$\mathfrak{M}_1 = \mathfrak{M}_2 = 3$	$8 \cdot 10^{12}$	65.7	$6 \cdot 10^{12}$	35
$\mathfrak{M}_1 = 2; \mathfrak{M}_2 = 3$	$5 \cdot 10^{12}$	28	$6 \cdot 10^{12}$	
$\mathfrak{M}_1 = \mathfrak{M}_2 = 5$	$1.3 \cdot 10^{13}$	98.6	$1.5 \cdot 10^{13}$	106
$\mathfrak{M}_1 = 2; \mathfrak{M}_2 = 5$	$5 \cdot 10^{12}$	23.7	$1.3 \cdot 10^{13}$	

В табл. 1 приведены наименьшие расстояния для разрыва пары с массами компонент 2, 3 и 5 \mathfrak{M}_\odot . В таблице приводятся также

наибольшие периоды обращения для этих систем, соответствующие расстоянию разрыва,

$$P^2 = \frac{a^3}{M_1 + M_2}. \quad (4)$$

Для сравнения здесь же даны максимальные расстояния между компонентами $a_{ТДС}$ и периоды $P_{ТДС}$ для систем с такими же массами, еще удовлетворяющих условию тесной двойственности. Мы берем случай, когда более массивная компонента M_2 заполняет внутреннюю поверхность Роша на стадии сжатия гелиевого ядра. Тогда [5] период тесной двойной системы (ТДС) определяется выражением

$$\lg P_{ТДС} = 2.2 \lg M_2 + 0.49. \quad (5)$$

Соответствующее максимальное расстояние $a_{ТДС}$ между компонентами ТДС определяется по (4).

Из табл. 1 видно, что чем больше массы компонент и их отношение M_2/M_1 , тем ближе разрыв к границам ТДС. Начиная с масс $\sim 3 M_{\odot}$, распадаются даже тесные двойные.

Таким образом, пары с массами компонент $\geq 2M_{\odot}$ (такие массы имеют в основном А-звезды главной последовательности) остаются связанными до расстояний, меньших $5 \cdot 10^{12}$ см. Для пар с более массивными компонентами $\sim 10 M_{\odot}$ (В-звезды главной последовательности) — соответственно до $3 \cdot 10^{13}$ см. Системы с промежуточными массами разрываются на расстояниях между этими величинами.

Выясним, какой процент среди кратных звезд одна из компонент которых является звездой типа А или В, составляют системы, удовлетворяющие условиям сохранения при взрыве. Рассмотрим:

$$1. \text{ Пары с А-компонентой: } a < 5 \cdot 10^{12} \text{ см, } 1/2 \leq \frac{M_1}{M_2} \leq 1.$$

$$2. \text{ Пары с В-компонентой: } a < 3 \cdot 10^{13} \text{ см, } 1/2 \leq \frac{M_1}{M_2} < 1.$$

С этой целью мы просмотрели звезды до $4^m 52$ [6] и отобрали все кратные системы, содержащие А-звезды главной последовательности. Распределение этих звезд в зависимости от отношения масс M_1/M_2 и расстояния a между компонентами приведено в табл. 2. Здесь M_1 — масса А-звезды. Оценки отношения масс M_1/M_2 проводились несколькими способами: по спектральным характеристикам, по отношению светимостей (в предположении о том, что вторая компонента также

находится на главной последовательности), по функции масс. Расстояния между компонентами оценивались по угловым расстояниям, по большим полуосям орбит или по большой полуоси видимой компоненты с учетом отношения масс компонентов.

Таблица 2

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРАТНЫХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ЗВЕЗДЫ
СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА А. ПО ОТНОШЕНИЯМ МАСС КОМПОНЕНТ И
РАССТОЯНИЯМ МЕЖДУ ЗВЕЗДАМИ

a (см)	$\frac{M_1}{M_2} < \frac{1}{7}$	$\frac{1}{7} < \frac{M_1}{M_2} < \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} < \frac{M_1}{M_2} < 1$	$\frac{M_1}{M_2} > 1$	Σ
$a < 10^{13}$	1				1
$10^{13} < a < 3 \cdot 10^{13}$		2	4		6+6
$3 \cdot 10^{13} < a < 10^{14}$		2	2		4+1
$10^{14} < a < 10^{15}$		1	4		5
$10^{15} < a < 10^{16}$	3	13	11	1	28
$a > 10^{16}$	6	5			12
Σ	10	23+2	21+5		

В семи случаях было указано, что системы являются спектрально-двойными, из которых у двух систем в спектрах видны линии обеих компонент. Мы внесли их в таблицу, учитывая наиболее вероятное значение для отношения масс и расстояния между компонентами в спектрально-двойных [7].

Таблица 3

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ КРАТНЫХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ ЗВЕЗДЫ
СПЕКТРАЛЬНОГО КЛАССА В. ПО ОТНОШЕНИЯМ МАСС КОМПОНЕНТ И
РАССТОЯНИЯМ МЕЖДУ ЗВЕЗДАМИ

a (см)	$\frac{M_1}{M_2} < \frac{1}{7}$	$\frac{1}{7} < \frac{M_1}{M_2} < \frac{1}{2}$	$\frac{1}{2} < \frac{M_1}{M_2} < 1$	$\frac{M_1}{M_2} > 1$	Σ
$a < 10^{12}$	2		4		4
$10^{12} < a < 3 \cdot 10^{12}$	2		2		4+7
$3 \cdot 10^{12} < a < 10^{14}$		3	1	3	7+3
$10^{14} < a < 10^{15}$			5	1	6
$10^{15} < a < 10^{16}$	5	4	10		19
$a > 10^{16}$	7	9	4	1	21
Σ	14	16+2	26+7	5+1	

Аналогичным методом анализировались и системы, содержащие В-звезды главной последовательности (табл. 3). В восьми случаях было известно только то, что система является спектрально-двойной и в двух

случаях говорилось о наличии в спектрах линий обеих компонент. Их также внесли в таблицу, учитывая наиболее вероятное значение для отношения масс и расстояний между компонентами в спектрально-двойных. По этим данным доля пар среди систем с А-компонентами, удовлетворяющих условиям сохранения при взрыве, составляет $\sim 10\%$, а среди систем с В-компонентами — приблизительно 13% .

Одним словом, если предположить что во всех массивных двойных происходит образование релятивистских звезд, то в результате взрыва при этом распадается $\sim 90\%$ пар. Связанными останутся лишь 10% двойных. Это тесные двойные системы. Но обычно считают [5], что состояние предколлапса может быть достигнуто лишь в достаточно массивной ТДС с общей начальной массой $\Sigma M = M_1 + M_2 \geq 15 M_{\odot}$. Если масса системы меньше этого значения, то почти наверняка образуются белые карлики. Предполагается, что белый карлик в таких системах — это бывшая ранее более массивная звезда пары. Она эволюционировала быстрее, теряя массу, часть которой передавалась менее массивной компоненте, а часть терялась системой в целом. Именно таким образом объяснялось образование белых карликов в двойных системах с более массивным обычным компонентом.

Таблица 4

ХАРАКТЕРИСТИКИ ТРЕХ ШИРОКИХ СИСТЕМ, СОДЕРЖАЩИХ БЕЛЫЕ
КАРЛИКИ

Звезда	Спектр	Mv	$\frac{M}{M_{\odot}}$	P (год)	r _{пс}	$\bar{\pi}''$	e	a (см)
α CMa Сириус	A 1 V	+ 1.4 ^m	2.28	49	2.7		0.58	3·10 ¹⁴
	B A 5	+11.7	0.98					
α CMt Прогцион	A F 5IV—V	+ 2.6	1.76	40	3.5		0.31	3.5·10 ¹⁴
	B	+13.1	0.65					
40 o ² Eridan	B 9	+ 6.0	0.45	247		0.202	0.40	6·10 ¹⁴
	C M 4		0.21					

Рассмотрим три хорошо известные двойные системы с компонентой — белым карликом. Это Сириус, Прогцион и 40 o² Эридана. Но параметры этих трех систем (табл. 4.) таковы, что можно с уверенностью сказать: они никогда не были ТДС. Три указанные пары являются достаточно широкими визуально-двойными, и нельзя обменом массы между компонентами системы объяснить образование в них белого карлика. Но, может быть, эти пары образовались путем случайного захвата? Это маловероятно, т. к. тогда получается, что из пяти белых карликов [8], расположенных в объеме 5 пс в окрестностях Солнца, три

входят в системы, образованные случайным захватом. Поэтому привлечение случайного захвата неоправдано. Во всех трех приведенных парах образование белых карликов следует объяснять большой потерей массы из системы в целом.

Среди указанных систем α^2 Эридана представляется наиболее интересной. Масса белого карлика здесь равна $0.21 M_{\odot}$, а масса обычной компоненты спектрального класса B9 равна $0.45 M_{\odot}$ и абсолютная звездная величина его $+6^m.0$. Судя по этим данным, даже обычная компонента α^2 Эридана — это сильно проэволюционировавшая звезда, находящаяся где-то на переходной стадии от ядра планетарной туманности к белому карлику. Очень маленькая суммарная масса системы приводит к мысли, что обе звезды в ходе эволюции интенсивно теряли массу за пределы системы.

Происходит ли образование белых карликов в ТДС иначе? Согласно теории, да [5]. Обратимся к фактам. Нам известен белый карлик в затменно-переменной системе WZ Sge. Массы ее компонент [9] таковы: белый карлик — $0.59 M_{\odot}$, обычная компонента — $0.03 M_{\odot}$. Такое распределение масс в системе указывает на то, что вся потерянная компонентами масса ушла из системы. В [9] имеется еще одна система, компонентой которой, по-видимому, является белый карлик, хотя там его спектральный класс характеризуется как sdBe. Это система DQ Her. Но параметры этого субкарлика скорее напоминают белый карлик: масса его $0.12 M_{\odot}$, радиус $0.046 R_{\odot}$ и абсолютная звездная величина $+8^m.5$. Все это позволяет думать, что эта звезда — белый карлик. Компонента ее имеет массу $0.20 M_{\odot}$. Объяснение здесь должно быть таким же, как и для WZ Sge.

Сравним характеристики одиночных и входящих в двойные системы белых карликов. Из 31 белого карлика, расположенного в объеме 25 пс в окрестности Солнца [8], 20 белых карликов — одиночные и 11 входят в двойные системы. Для них получены следующие результаты:

Средняя величина	B—V	для одиночных	$+0^m.29$
„	„	B—V	двойных $+0^m.25$
„	„	U—B	одиночных $-0^m.50$
„	„	U—B	двойных $-0^m.54$

Близкие значения показателей цвета одиночных и входящих в двойные системы белых карликов предполагают не сильно различающиеся у них светимости, температуры, а следовательно, и массы. Таким образом, можно сказать, что двойственность системы не играет заметной

роли при образовании белых карликов. Белые карлики в двойных системах, так же, как и одиночные, образуются путем интенсивной потери массы из системы. Поэтому „вторичный обмен массой“ в ТДС, когда могла бы расти масса белого карлика и было бы возможно образование релятивистской звезды, маловероятен. Это еще в несколько раз уменьшает вероятность встречи релятивистской звезды в двойной системе.

Верхний предел для релятивистских звезд в двойных системах можно получить из данных о пульсарах. Из 105 известных радиопульсаров ни один не входит в двойные системы. Поэтому не более 1% релятивистских звезд может входить в пары.

Так как релятивистские звезды образуются при взрыве Сверхновых, то орбиты системы должны при этом вытягиваться. Это утверждение, казалось бы, противоречит наблюдательным данным. Но это не так. Релятивистские звезды, входящие в двойные системы и обнаружившие себя как рентгеновские источники, действительно имеют круговые орбиты. Но они входят в тесные пары, а поскольку по статистике средний эксцентриситет для ТДС равен 0.06, то орбиты у них почти круговые. По-видимому, в ТДС существуют механизмы, приводящие систему к устойчивой конфигурации с минимальной энергией — круговой. Такими механизмами могут являться приливные силы, магнитные, поток вещества [10]. В визуальных и спектральных двойных таких механизмов нет и они имеют более вытянутые орбиты. По каталогу Бечвара [11] средние эксцентриситеты для них таковы:

визуальные	(200 пар)	0.4—0.5
спектральные	(100 пар)	0.2—0.3

Исходя из всего вышесказанного о потере вещества звездами и учитывая нынешние массы в системе Сириус — наиболее массивной из систем с белыми карликами, можно сказать: спутник Сириуса первоначально имел массу $\sim 3M_{\odot}$, потеряв часть которой в ходе эволюции, он превратился в белый карлик с массой $0.98M_{\odot}$, то есть все звезды с массами $M \leq 3M_{\odot}$ могут заканчивать эволюцию белым карликом. А так как массивные звезды могут терять еще большую часть массы, порядка 70%, то в состоянии предколлапса звезды в основном будут иметь массы $\sim 2-3M_{\odot}$. Это говорит о том, что результатом коллапса — взрыва Сверхновой — почти всегда должна быть нейтронная звезда, а не черная дыра.

Из всего вышесказанного следуют чрезвычайно важные выводы для всей теории эволюции звезд:

1. Обменом массой в двойных системах можно пренебречь вследствие его незначительности. Наблюдаемое перетекание вещества в

тесных парах далеко не свидетельствует о его оседании на поверхности второй компоненты.

2. Независимо от того, одиночна звезда или входит в пару, она в ходе эволюции теряет массу порядка 70%.

3. Из-за значительных потерь вещества к состоянию предколлапса — предсверхновой — звезды приходят с такими массами ($\sim 2-3 M_{\odot}$), что результатом коллапса почти всегда будет нейтронная звезда, а не черная дыра.

Основываясь на первом результате, уже можно понять почему релятивистские звезды так редко встречаются в двойных системах. Известно, что в Галактике имеются всего 50 переменных рентгеновских источников со светимостью $\sim 10^{37}$ эрг/сек. Излучение их принято считать обязанным аккреции на релятивистские компоненты в тесных парах. Причем, обычными компонентами в этих системах в основном являются звезды-гиганты.

Результат третьего пункта хорошо согласуется с данными работы [12]. В этой работе было показано, что во всех остатках Сверхновых звезд нашей Галактики имеются активные источники — пульсары, которые питают туманности релятивистскими частицами и магнитным полем.

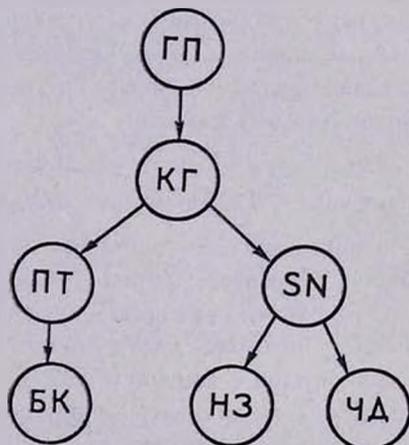


Рис. 1. Схема эволюции звезд разных масс от главной последовательности до конечных продуктов эволюции.

Учитывая вышесказанное и существование эволюционной последовательности красный гигант — планетарная туманность — белый карлик [13, 14], следует принять эволюционную схему, приведенную на рис. 1. Звезды главной последовательности с массами $< 2.5 M_{\odot}$ заканчивают эволюцию состоянием белого карлика. Черные дыры образуются из

звезд с массами больше $6M_{\odot}$. Здесь под черной дырой мы понимаем астрофизические объекты сверхвысокой плотности, взаимодействующие с окружающей средой только посредством гравитационного поля. Если правильна функция звездообразования Салпетера, то черные дыры должны появляться в Галактике в ~ 5 раз реже, чем нейтронные звезды. Отметим, что наши исследования частоты рождения релятивистских звезд в Галактике указывают на ее совпадение с частотой вспышек Сверхновых, т. е. ~ 2 звезды в 100 лет.

Если принять во внимание еще то, что пространственная плотность А-звезд приблизительно в 4 раза превосходит плотность звезд спектральных классов О и В, а также зависимость времени жизни звезды от ее массы, можно прийти к следующим заключениям:

1. Остатки вспышек Сверхновых звезд должны в основном быть связаны с рассеянными скоплениями и О, В ассоциациями.

2. Все остатки Сверхновых в Галактике, относящихся ко II типу, находятся в плотной среде и значительно увеличили свою массу за счет межзвездного вещества.

Эти выводы хорошо согласуются с выводами работы [15]. Сейчас мы имеем все основания для утверждения, что во время вспышек Сверхновых обоих типов выбрасывается малая масса.

Выброшенная масса редко может превосходить массу Солнца. Поэтому отношение энергии излучения к кинетической энергии газа для Сверхновых II типа обычно определяется неправильно. Не совсем правильно оцениваются и возрасты остатков вспышек Сверхновых звезд.

Шемахинская астрофизическая
обсерватория

WHY DO RELATIVISTIC STARS AVOID DUPLICITY?

O. KH. GUSEINOV, KH. I. NOVRUZOVA

The possibility to meet a relativistic star in a double system has been analyzed. On the basis on the data on pulsars, supernovae, distribution of A-B stars in pairs, close double systems and white dwarfs it is concluded that occurances of relativistic stars in double systems are rather rare. No more than 1% of the relativistic stars can be contained in pairs, and they are mainly neutron stars, but not black holes. During the evolution the star loses about 70% of its mass independent of its being a single or a member of a paire. In double systems,

even in close ones, the whole lost mass escapes the system. An evolution scheme for stars is suggested. It is suggested that supernova remnants in the Galaxy of assumed type II are in dense medium and increase their masses on account of interstellar matter. The mass ejected during supernova outburst rarely exceeds one solar mass.

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. J. E. Gunn, J. P. Ostriker, *Ap. J.*, 160, 979, 1970.
2. K. R. Lang, *Ap. J.*, 164, 249, 1971.
3. M. S. Ewing, R. A. Batchelor, D. D. Friefeld, R. M. Price, D. H. Staelin, *Ap. J.*, 162, 169, 1970.
4. О. Х. Гусейнов, Ф. К. Касумов, В. И. Лазарев, А. В. Осипчук, *Астрон. ж.*, 50, 39, 1973.
5. Л. И. Снежко, *Сообщ. САО АН СССР*, вып. 6, 1972.
6. П. Г. Куликовский, *Справочник любителя астрономии*, М., 1971.
7. О. Х. Гусейнов, Х. И. Новрузова, *Цирк. ШАО*, № 1, 1972.
8. R. Woolly, E. A. Epps, M. J. Penston, S. B. Roscock, *Catalog of Stars within 25 parsecs of the Sun*, *Roy. Obs. Annals*, No. 5, 1970.
9. М. А. Свечников, *Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей тесных двойных звезд*, Свердловск, 1969.
10. G. W. Gebbons, S. W. Hawking, *Nature*, 232, 465, 1971.
11. А. Везуг, *Atlas Coeli—II*, 1964.
12. P. R. Amiel, O. H. Guseinov, *Astron. Astrophys.*, 31, 37—40, 1974.
13. И. С. Шкловский, *Астрон. ж.*, 33, 315, 1956.
14. О. Х. Гусейнов, *Астрофизика*, 9, 425, 1973.
15. И. С. Шкловский, *Астрон. ж.*, 51, № 1, 1974.