

ГЛАВА 14

КОЛЛАПСИРОВАВШИЕ ЗВЕЗДЫ И «БЕЛЫЕ ДЫРЫ» (ОТОНЫ)

§ 1. Коллапсировавшие звезды в двойных системах

Начнем с задач и терминологии. В данной, последней, главе рассматриваются астрофизические аспекты релятивистского коллапса. Основная направленность изложения связана с практической возможностью обнаружения коллапса и тел, возникающих в результате такого коллапса. Эти тела называются по-разному: застывшие звезды, коллапсары, черные дыры. Наряду с телами, образующимися в конце эволюции звезд, можно представить себе тела космологического происхождения, оставшиеся в наследство от сингулярной стадии эволюции Вселенной. Их свойства могут быть такими же, как и свойства коллапсаров (черные дыры), но в принципе возможны и такие тела, которые с самого начала находятся под своим гравитационным радиусом и с течением времени взорвутся — «белые дыры» [Новиков (1964 b), Неeman (1965)].

Предлагается термин «отоны», произведенный от сокращения «ОТО», общая теория относительности, — в качестве видового наименования, объединяющего все разновидности тел с релятивистским полем тяготения, находящихся внутри так называемого «горизонта» или асимптотически приближающихся к нему. Фундаментальная теория таких тел изложена выше, впрочем, некоторые необходимые дополнения даются в § 2 и 5 данной главы.

В самой краткой формулировке все внешние проявления отона сводятся к его гравитационному полю. Гравитационное поле, т. е. изменение метрики, включает также и вклад вращательного момента отона, однако на большом расстоянии поле, зависящее от массы, убывает медленнее *). Таким образом, задача сужилась до задачи обнаружения статического поля тяготения невидимой массы, за которым должно следовать доказательство того, что эта масса является отоном.

*) В принципе есть еще и электростатическое поле, зависящее от общего заряда отона (см. § 10 гл. 12).

Гусейнов и Зельдович (1965е, 1966) предложили искать отоны в составе двойных звезд*). При этом масса отона, очевидно, обнаруживается по его возмущающему действию на движение второй светящейся видимой звезды.

В самом простом, идеализированном случае отон никак больше себя не проявляет; он не светится; его размеры и радиус, на котором происходит сильное гравитационное отклонение лучей, слишком малы, чтобы быть замеченными. Напомним элементарные сведения из теории двойных звезд. Двойные звезды делятся на визуально-двойные, затменно-двойные и спектрально-двойные. В последнем случае факт двойственности устанавливается по периодическому доплеровскому смещению спектральных линий. Часто в спектре видны линии только одной звезды — наиболее яркой, линии второй невидимы потому, что они «тонут» в свете более яркой компоненты. Таким образом, известна лишь проекция скорости яркой звезды на луч, направленный к наблюдателю. В этом случае оказывается, что из наблюдений можно найти одну только величину, характеризующую массы звезд, а именно, так называемую «функцию масс»

$$FM = \frac{M_2^3 \sin^3 i}{(M_1 + M_2)^2},$$

где i есть угол между нормалью к плоскости орбиты и лучом зрения. Предположим, что масса видимой звезды известна; простейший случай представляется, когда спектр звезды позволяет идентифицировать ее принадлежность к главной последовательности. В этом случае спектральный класс однозначно связан с массой. Если известен параллакс звезды, а значит, и ее расстояние от Солнечной системы, то можно найти абсолютную светимость, что позволяет проверить и уточнить массу.

Зная массу первой звезды M_1 и FM , можно найти массу второй компоненты M_2 ; в расчет входит $\sin i$. Задаваясь $\sin i = 1$, получаем минимальное значение M_2 . При среднем $\sin^2 i = \frac{2}{3}$ получаем M_2 , в среднем в 1,5 раза больше минимального.

Если оказывается, что M_2 превышает $2M_\odot$, а излучение от M_2 не видно, и при этом причиной невидимости не является присутствие более яркой соседней звезды, рядом с которой трудно различить слабосветящуюся, то предполагается заподозрить, что невидимым телом может быть отон.

Привлечение «невидимости» в качестве аргумента звучит комически, подобно диссертации «Отсутствие телеграфных столбов и проволоки в археологических раскопках как доказательство

*) Ранее вопрос об отонах в двойных звездах был поставлен 1963 г. Фаулером и Хойлом,

древней радиосвязи». Однако в действительности телу с данной большой массой не так легко остаться невидимым. Светимость такого тела на главной последовательности известна, в ходе дальнейшей эволюции светимость только увеличивается (гиганты). Для массы $M < 1,2 M_{\odot}$ превращение в белый карлик и для $M < 2M_{\odot}$ — в нейтронную звезду уменьшает светимость, но условие $M > 2M_{\odot}$ как раз и выбрано, чтобы исключить тривиальное решение.

Вслед за работой Гусейнова и Зельдовича (1965, 1966) Тримбл и Торн (1969) предложили также другие кандидаты.

Недавно Камерон (1971) выдвинул предположение о том, что затменная двойная звезда ϵ Aur содержит в своем составе отон, окруженный диском из твердых частиц, размером порядка нескольких миллиметров. Наконец, в работе Гусейнова и Новрузовой (1971) предложен еще один кандидат среди двойных звезд, отличающийся близостью к Солнечной системе (расстояние 20 пс).

В таблице XV приведены авторы, рассматривающие данную пару; название звезды; период обращения в днях; амплитуда

Таблица XV

Невидимые компоненты в составе спектрально-двойных звезд

Авторы	Название	Период (дни)	Скорость (км/с)	FM	M_1	M_2	m_1	Спектральный класс
Гусейнов	KS Pers	360,5	51,4	4,4	$\left\{ \begin{array}{l} 12 \\ 5 \\ 1 \end{array} \right.$	$\left. \begin{array}{l} 15 \\ 10 \\ 6 \end{array} \right\}$	7,7	$\left\{ \begin{array}{l} A0 \text{ II} \\ A5 \text{ Ia} \\ Ape \end{array} \right.$
Зельдович (1965)	ξ Pav	2214	17,9	1,19	4,0	4,4	4,4	K2 III
Тримбл, Торн (1969)	HD 187399	27,97	104,5	2,72	4,0	6,8	7,7	A0 III, (Bge, B9e β)
	HD 193928	21,64	130	4,94	10	14,2	9,4	WN6+
	HD 33232	3710	31,5	10	$\left\{ \begin{array}{l} 9,5 \\ 11 \end{array} \right.$	$\left. \begin{array}{l} 21,4 \\ 23 \end{array} \right\}$	8,1	$\left\{ \begin{array}{l} B3eV \\ B3eIII \end{array} \right.$
Тримбл, Торн (1969)	ω Eri	3057	18,1	1,32	1,9	3,3	4,39	A9 IV
	49 Ori	445,7	28,6	0,635	2,2	2,4	4,81	A4 IV
	71 Tau	5200	15,1	1,70	1,8	3,7	4,57	F0 V
	ξ Aqr	8016	11,31	0,711	2,0	2,4	4,69	A7 V
Камерон (1971)	ϵ Aur	9900		3,1	35	23		F2
Тримбл, Торн (1969); Гусейнов, Новрузова (1971)	δ Gem	2239	27,1	3,8	1,8	6,3	3,52	F0 IV

скорости в км/сек; функция масс FM ; масса видимой звезды M_1 , определенная по спектральному классу и светимости; масса невидимой звезды M_2 , вычисленная по FM , M_1 ; звездная величина m_1 видимой звезды и ее спектральный класс.

Заслуживает особого внимания система в последней строке, приведенная в недавней заметке Гусейнова и Новрузовой (1971). В случае δ Gem известен параллакс, равный 0,"056 или 0,"059, что соответствует расстоянию $17 \div 18$ пс. Благодаря известному расстоянию отпадает целый ряд неопределенностей, которые имеют место в других случаях. Звезда с массой $6,8 M_\odot$ должна на данном расстоянии иметь видимую величину не более $m_2 = 0,25$, две звезды по $3,4 M_\odot$ дадут $m_2 = 1,75$.

Наблюдения несовместимы с предположением о нормальной второй звезде безотносительно к правильности интерпретации класса и эволюционной стадии видимой первой звезды. Однако не очень уверенно определены лучевая скорость и FM . Следует присоединиться к выводу Гусейнова и Новрузовой о крайней важности дальнейшего и углубленного исследования этой системы.

Близость звезды делает возможным изучение ее собственного движения в картинной плоскости и поиски инфракрасного излучения (на тот случай, что невидимая звезда окружена темной материей, перерабатывающей видимый свет в инфракрасный).

Рассмотрим альтернативные объяснения систем, приведенных в таблице, без привлечения отонов.

1. Ошибка в определении элементов орбиты, завышающая FM . Очевидно, что системы, перечисленные в таблице, заслуживают специального более тщательного исследования.

В частности, последний кандидат, предложенный Гусейновым и Новрузовой, находится так близко, что собственное движение звезды в картинной плоскости может достичь нескольких десятых долей угловой секунды. Его измерение дало бы возможность уточнить элементы орбиты.

2. Ошибка в определении M_1 . Полагая, что видимая компонента принадлежит главной последовательности и зная расстояние (параллакс), получаем верхнюю оценку M_1 . Если M_1 меньше, то меньше M_2 , но всегда $M_2 > FM$. В этом отношении выделяются те случаи, когда $FM > M_1$.

3. Наиболее уязвимым является объяснение «невидимости» второй компоненты. В спектрально-двойных звездах есть две системы линий. Если вторая компонента не имеет линий в спектре, то она числится невидимой. Вторая компонента невидима и в том случае, если ее светимость в несколько раз меньше светимости первого.

Для звезд на главной последовательности светимости растут с увеличением массы; если $M_2 > M_1$, невидимость необъяснима.

Однако если вторая звезда принадлежит главной последовательности, а первая сошла с нее и ярче (при данной массе M_1), то вторая может быть невидима. Наконец, вторая компонента может быть тесной парой («2» = «3» + «4»). Тогда при

$$M_2 = M_3 + M_4, \quad L_{3,4} = L_3 + L_4 \sim \frac{1}{4} L_2,$$

ожидается светимость в несколько раз меньше.

Наряду с вопросами, требующими конкретного исследования перечисленных систем, есть общий эволюционный вопрос о вероятности того, что отон окажется в составе двойной звезды.

В предыдущей главе отмечалось, что все исследованные до сих пор пульсары являются одиночными. Этот факт связывался с тем, что при взрыве сверхновой с внезапным разлетом значительной части ее массы двойная система может диссоциировать. В этой связи интересно замечание Камерона (1971), основанное на неопубликованной работе Вилсона и на расчетах Арнетта (1969).

Коллапсировавшая звезда имеет массу больше массы нейтронной звезды. Соответственно нужна и большая масса предсверхновой порядка (согласно расчетам Арнетта) $M > 15$ или $M > 30 M_\odot$. Но при большей массе релятивистские эффекты возникают при меньшей плотности, $\rho_c \sim M^{-2}$. В этих условиях нейтрино легко выходят и потеря устойчивости заканчивается релятивистским коллапсом без промежуточной остановки. Весьма вероятно, что потеря массы при этом относительно меньше, чем при образовании пульсаров, а следовательно двойная система останется связанной.

Исследование двойных систем и, в частности, поиски рентгеновского излучения (см. § 3) являются вполне реальным подходом к поискам небесных тел новой, необычной природы.

§ 2. Магнитные явления при релятивистском коллапсе

Выше уже отмечалось усиление магнитного поля при сжатии звезды в силу вмороженности силовых линий.

Однако в крайнем своем выражении сжатие, приводящее к гравитационному самозамыканию, качественно меняет ситуацию, как показано в работах Гинзбурга (1964) и Гинзбурга и Озерного (1964).

Магнитный дипольный момент, измеренный на конечном расстоянии от отона (например, при $r = 2r_g$ или $r = 3r_g$), где хотя бы приближенно справедлива электродинамика плоского пространства, стремится к нулю с течением времени, по мере того как приближается к r_g поверхность звезды, на которой задан поток силовых линий.