

Рис. 11.2. Схематические кривые остывания нейтронной звезды. Температура недр представлена как функция времени для различных процессов в предположении, что они действуют в одиночку: 1 — тормозное излучение коры; 2 — модифицированные урка-реакции [52].

более низких температурах оно уменьшается. Во-вторых, в сверхтекучей жидкости подавлены процессы образования нейтрино, что увеличивает характерное время охлаждения.

Мы пренебрегли также ролью магнитного поля в уменьшении фотонной непрозрачности нейтронной звезды вблизи поверхности. Для данного значения T уменьшение непрозрачности увеличивает T_e и, следовательно, фотонную светимость.

11.9. СРАВНЕНИЕ С НАБЛЮДЕНИЯМИ

Подробные кривые остывания нейтронной звезды были построены некоторыми авторами (см., например, [226, 420, 590] и помещенные в них ссылки на более ранние вычисления). Кроме того, недавно были получены результаты рентгеновских наблюдений со спутников около 50 остатков сверхновых, включая семь отмеченных в исторических хрониках [271, 272]. Так называемая «стандартная» модель вычислений без учета пионной конденсации и кваркового вещества предполагает поверхностную температуру T_e у объекта возрастом около 300 лет, равную по крайней мере $(1 \div 2) \cdot 10^6$ К, а минимальные температуры остаются в диапазоне $(0,5 \div 1,5) \cdot 10^6$ К в течение по крайней мере 10^4 лет [см. рис. 11.2 и уравнение (11.8.12)].

Верхний предел $\sim 3 \cdot 10^6$ К для пульсара в Крабовидной туманности, выведенный по наблюдениям покрытия пульсара Луной [571, 622], полностью совместим с этими обычными расчетами. Недавно наблюдения обсерватории «Эйнштейн» (спутник НЕАО-2) снизили верхний предел до $\sim 2 \cdot 10^6$ К. Этот результат и полученные из наблюдений верхние пределы

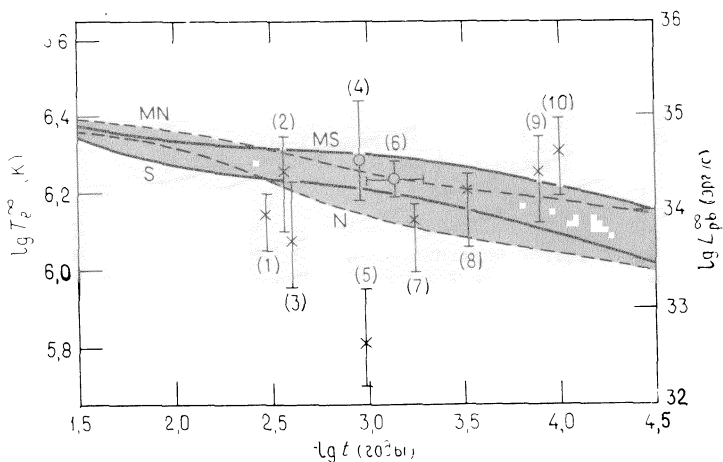


Рис. 11.3. Остывание нейтронной звезды: сравнение данных наблюдений обсерватории «Эйнштейн» и типичных теоретических кривых остывания. Согласно принятой модели, нейтронная звезда имеет массу $M = 1,3 M_{\odot}$, радиус $R = 16$ км и ее структура в основном определяется уравнением состояния в приближении тензорного взаимодействия. Измеряемые величины T_e^{∞} и L_{ph}^{∞} (измеренные на бесконечности) отложены как функция времени для четырех случаев: сверхтекучие нейтроны (S) и несверхтекучие (нормальные) нуклоны (N) в отсутствие магнитного поля, а также сверхтекучесть (MS) и несверхтекучесть (MN) при магнитном поле $4,4 \cdot 10^{12}$ Гс. Цифры относятся к данным наблюдений: (1) Cas A, (2) звезда Кеплера, (3) звезда Тихо, (4) Крабовидная туманность, (5) SN 1006, (6) RCW 103, (7) RCW 86, (8) W 28, (9) G 350,0 — 18, (10) G 22,7 — 0,2. Крестиками обозначен измеренный верхний предел, кружки относятся к возможному «открытию» точечных источников. Оцененные ошибки наблюдений связаны с неточностями определения межзвездного поглощения и расстояния до источника [420].

поверхностных температур для ряда других молодых остатков сверхновых показаны на рис. 11.3 и приведены в табл. 11.1. На рис. 11.3 данные наблюдений сравниваются с предсказаниями теории. Из семи остатков сверхновых, отмеченных в исторических хрониках (первые семь строк в табл. 11.1), только для Крабовидной туманности определено известно, что она содержит нейтронную звезду. Исторические сверхновые очень важны, потому что их возраст точно известен. Наблюдаемые верхние пределы для T_e близки к теоретическим пределам. Некоторые из наблюдавшихся верхних пределов (для Cas A, остатка сверхновой Тихо и особенно для SN 1006) даже опускаются ниже самого низкого теоретического предела; это говорит либо о том, что нейтронная звезда охлаждается быстрее, чем предсказывают стандартные расчеты, либо о том, что после взрыва сверхновой нейтронной звезды не осталось. Первую возможность можно объяснить более экзотическими механизмами охлаждения (пионный конденсат или кварковое

Таблица 11.1

ГОРЯЧИЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ В ОСТАТКАХ СВЕРХНОВЫХ

Название	Возраст, ¹⁾ лет	D , ²⁾ кпс	R_{\max} ³⁾	T_e , 10^6 К	Литера- тура
Cas A Сверхновая	300	2,8	0,4'	< 1,5	[416]
Кеплера Сверхновая Тихо	375	8,0 ⁴⁾	0,2	< 2,1	[272]
Крбовидная туманность	407	3,0 ⁴⁾	0,5	< 1,8	[272]
SN 1006	925	2,0	1,6	< 2,0	[256]
RCW 86	973	1,0	3,3	< 0,8	[472]
W 28	1794	2,5 ⁴⁾	2,5	< 1,5	[272]
G 350,0—18	3400	2,3 ⁵⁾	5,0	< 1,8	[271]
G 22,7—0,2	$\sim 10^4$	4,0 ⁵⁾	7,0	< 2,0	[271]
Сверхновая в Парусах	$\sim 10^4$	0,4	1,4	< 1,5	[257]
RCW 103	$\sim 10^3$	3,3		< 2,2	[581]

¹⁾ Возраст приведен на 1979 г. — *Прим. перев.*

²⁾ Расстояние остатка сверхновой от Солнца.

³⁾ Расстояние (от центра остатка сверхновой), в пределах которого можно было бы найти звезду, если ее поперечная скорость не превышает 1000 км/с.

⁴⁾ См. [624].

⁵⁾ См. [140].

вещество), а вторая может потребовать пересмотра наших представлений о сверхновых и нейтронных звездах¹⁾.

Из почти 50 остатков сверхновых, наблюдавшихся до настоящего времени, только для четырех обнаружены свидетельства существования центрального точечного рентгеновского источника. Помимо пульсара в Крбовидной туманности, лишь для пульсара в созвездии Парусов известно, что он связан с остатком сверхновой. Наблюдения пульсара в созвездии Парусов говорят о поверхностной температуре $\sim 1,5 \cdot 10^6$ К. Однако, как и для пульсара в Крбовидной туманности, без информации о спектре нельзя быть уверенным, что излучение является тепловым, так что приведенное

¹⁾ Гипотеза о том, что сверхновые II типа оставляют после себя нейтронную звезду, а сверхновые I типа полностью разрушают звезду, может частично объяснить данные рентгеновских наблюдений [123, 420]. Обсуждение вопроса о типах сверхновых см. в гл. 18.

значение лучше интерпретировать как верхний предел. Два других точечных источника находятся в остатке RCW 103 и в 3C 58 — возможном остатке SN 1185. Для RCW 103 имеются указания на температуру $2,2 \times 10^6$ К, а для 3C 58 не получено надежного предельного значения. Неудача попыток регистрации точечных источников в других остатках сверхновых при переменных верхних пределах снова говорит либо о быстром остывании, либо об отсутствии нейтронных звезд в большинстве остатков сверхновых. На данном этапе можно только строить предположения о конечных результатах этого важного исследования. Со всей очевидностью требуются дальнейшие наблюдения и улучшенные теоретические расчеты.

Упражнение 11.9. Координатночувствительный пропорциональный счетчик на обсерватории «Эйнштейн» имеет чувствительность $2,5 \cdot 10^{-5}$ фотон/(см² · с) в области энергий 0,2—3,0 кэВ. Какой верхний предел для T_e может установить спутник, если предположить, что нейтронная звезда имеет радиус 10 км и расположена на расстоянии 100 пс от нас?

Ответ: $T_e \leq 0,2 \cdot 10^6$ К.

Упражнение 11.10. Используйте формулы для гравитационного красного смещения и замедления времени и покажите, что сфера массой M и радиусом R , излучающая как черное тело с температурой T и светимостью L , при измерениях удаленным наблюдателем проявляется как излучающая при температуре T_∞ со светимостью L_∞ , где

$$L_\infty = L(-g_{00}),$$

$$T_\infty = T(-g_{00})^{1/2},$$

и

$$-g_{00} = 1 - \frac{2M}{R}.$$

(Можно использовать тот факт, что удаленный наблюдатель видит также распределение фотонов чернотельного излучения.)