

испускается наружу, не испытывая возмущений. Итак, приблизительно  $1/4$  ( $1/2 \cdot 1/2$ ) всей светимости будет наблюдаться в виде обильного потока гамма-излучения, а остальное — в виде мягкого рентгена.

*Упражнение 15.5.* Процесс, в результате которого ускоренные в ударной волне электроны испускают фотоны, согласно рассмотренной выше картине, — это релятивистский комптон-эффект. Покажите, что фотоны со средней энергией  $E_i$ , рассеиваемые релятивистскими электронами с энергией  $E_e \gg m_e c^2$ , приобретают среднюю энергию  $E_f = (4/3)(E_e/m_e c^2)^2 E_i$  (в предположении, что распределения электронов и фотонов изотропны). Пользуясь этим результатом, покажите, почему мягкие рентгеновские лучи, испускаемые звездной поверхностью, могут покидать фронт ударной волны с энергиями, лежащими в гамма-диапазоне.

Существуют ли достаточно сильные бесстолкновительные процессы, приводящие к образованию тонкого фронта ударной волны, высокой температуре газа и излучению жестких фотонов, в настоящее время неизвестно. Наблюдения не дают убедительных оснований для предположения, что нейтронные звезды со стационарной аккрецией излучают интенсивные потоки гамма-лучей. Однако и в этом случае трудности обнаружения фотонов в диапазоне 10—100 МэВ не позволяют прийти к определенному заключению<sup>1)</sup>.

#### 15.4. АККРЕЦИЯ НА БЕЛЫЕ КАРЛИКИ

Недостаток места не позволяет нам обсудить теорию аккреции на белые карлики сколько-нибудь подробно<sup>2)</sup>. Тем не менее этот процесс важен по нескольким причинам.

1) Согласно общему мнению, мягкое и жесткое рентгеновское излучение, которое наблюдается от известных двойных систем, включающих белые карлики типа AM Her, DQ Her и SS Cyg, вызвано аккрецией на *магнитные* белые карлики [322]. Рентгеновский источник AM Her и ему подобные обладают сильной круговой поляризацией ( $\geq 10\%$ ) в оптическом диапазоне. Отсюда делается вывод, что на поверхности этих источников су-

<sup>1)</sup> Сообщение о всплесках космического гамма-излучения в диапазоне энергий 0,2—1,5 МэВ появилось в 1973 г. [313], и с этого времени они подтверждались многочисленными последующими наблюдениями (обзор работ и ссылки на литературу даны в [314]). Короткие временные масштабы всплесков ( $0,1 \text{ с} \leq \Delta t \leq 100 \text{ с}$ ) послужили основанием для применения к этим источникам моделей компактной звезды (особенно нейтронной звезды). Обзоры этих и других моделей, объясняющих наблюдаемые гамма-всплески, приведены в [326, 491].

<sup>2)</sup> Читателям, интересующимся этим вопросом, рекомендуем ознакомиться с работами, упоминающимися в разд. 14.1 и 15.4, которые содержат более подробное обсуждение и дополнительные ссылки на литературу.

существуют сильные магнитные поля с напряженностью  $B \leq 10^7 - 10^8$  Гс. Источники типа DQ Her вспыхивают как новые звезды, и у них проявляются когерентные пульсации малой амплитуды (с периодом 71 с для DQ Her). Данные оптических наблюдений четко свидетельствуют о существовании крупных аккреционных дисков вокруг таких белых карликов. Это говорит о том, что магнитные поля в системах типа DQ Her слабее предполагаемых у AM Her. (Сильное магнитное поле может разрушить диск и привести к радиальному течению вещества на звезду.) Источники типа SS Cyg (в том числе такие, как U Gem и AK Per) — это катаклизматические переменные, для которых характерны частые вспышки, как и у объектов типа AM Her, но в то же время оптические наблюдения доказывают существование у них аккреционного диска.

2) Многие из отождествленных двойных рентгеновских систем с малой массой, подобные Cyg X-2 и Sco X-1, а также некоторые источники центральной галактической подсистемы (см. гл. 13) могут также оказаться *немагнитными* белыми карликами с умеренной светимостью.

Аккреция на белые карлики в некоторых отношениях отличается от аккреции на нейтронные звезды. Если падающий газ имеет типичный для космических условий химический состав (например, 70% водорода по массе, 25% гелия и несколько процентов более тяжелых элементов), то в результате ядерных реакций под поверхностью звезды выделяется приблизительно 8 МэВ ядерной энергии на нуклон. После усреднения во времени эта избыточная энергия в случае аккреции белыми карликами будет превышать гравитационную потенциальную энергию, выделяющуюся при падении газа. Однако ядерная энергия может выделяться во взрывных вспышках, так что большую часть времени преобладает квазистационарный гравитационный механизм выделения энергии.

Далее отметим, что температура оптически толстой фотосферы белых карликов, испускающей чернотельное излучение, не достаточно высока для создания заметной светимости в рентгеновском диапазоне. Согласно соотношению (15.3.2), при  $R_6 \approx 500$  имеем  $T_{bb} \approx 44$  эВ, так что в излучении фотосферы преобладает жесткий ультрафиолет.

Однако похоже, что аккреция на белый карлик приводит к образованию стоячей волны над поверхностью звезды. В отличие от аккреции на нейтронную звезду в данном случае *одни лишь* кулоновские столкновения способны приводить к образованию тонкого фронта ударной волны над поверхностью [ $\lambda_c/R \ll 1$ , согласно уравнению (15.3.8)]. Как следует из (15.3.9), электронная температура за фронтом ударной волны может достигать значений  $T_{ff} \leq 100$  кэВ. Таким образом, область, расположенная за ударной волной над фотосферой, может испускать рентгеновские лучи, образованные в результате тормозного излучения из оптически тонкого слоя [6, 190, 279, 307]. Кроме того, если присутствует магнитное поле, в этой области появится также циклотронное излучение.

В соответствии с детальными расчетами Лэмба и Мастерса [328] приблизительно половина потока тормозного излучения испускается от поверхности наружу в жестком рентгеновском диапазоне (10—100 кэВ). Прибли-

зительно половина потока высоких гармоник циклотронного излучения также испускается наружу, на этот раз в ультрафиолетовом диапазоне. Остальное тормозное и циклотронное излучение испускается внутрь и либо отражается от поверхности, либо поглощается ею. Результирующий поток термализованного чернотельного излучения с поверхности испускается в ультрафиолетовой или ближней рентгеновской области, причем  $L_{bb} \approx L_{cyc} + L_{brem}$ , где  $L_{bb}$ ,  $L_{cyc}$  и  $L_{brem}$  — чернотельная, циклотронная и тормозная светимости соответственно. Лэмб и Мастерс предсказывают, что магнитные белые карлики могут оказаться очень мощными ультрафиолетовыми ( $\leq 10$  эВ) источниками и что ультрафиолетовый поток может сильно превосходить рентгеновский поток.

Спектры излучения, возникающего при аккреции на немагнитные или слабо намагниченные вырожденные белые карлики, отличаются от спектров карликов с сильными магнитными полями отсутствием ультрафиолетового циклотронного излучения (т.е.  $L_{cyc} \ll L_{brem}$  для  $B \ll 10^6$  Гс [321]). Если полная светимость превосходит максимальное значение  $L_{max} = 10^{36}$  эрг/с ( $\ll L_{Edd}$ ), холодное падающее вещество над ударной волной оказывается достаточно непрозрачным, чтобы рассеивать большую часть рентгеновского излучения и понижать энергию фотонов (посредством комптон-эффекта). В результате для немагнитных карликов должна существовать заметная корреляция между рентгеновской спектральной температурой и светимостью.

Интересно, что наблюдения источника Суг X-2 с рентгеновского спутника «Коперник» показывают подобную зависимость светимости от спектра. Если теория верна, наблюдения [85] свидетельствуют, что Суг X-2 — это аккрецирующий вырожденный карлик с массой  $\sim 0,4 M_{\odot}$ , расположенный от Солнца на расстоянии  $250 \pm 50$  пс. В работе [325] выдвинуто также предположение, что многие до сих пор не отождествленные источники центральной галактической подсистемы (см. гл. 13) с малой светимостью — это вероятные кандидаты на отождествление с аккрецирующими немагнитными белыми карликами, поскольку у них также проявляется ожидаемая корреляция между рентгеновской спектральной температурой и светимостью. Действительно, подсчитано, что полное число таких объектов в Галактике может быть порядка  $10^4$ . Интересно сравнить это число с ожидаемым количеством аккрецирующих магнитных карликов ( $\sim 10^6$ ), а также сильных ( $L \geq 10^{36}$  эрг/с) рентгеновских источников — аккрецирующих нейтронных звезд (около 100).