

(14.5.38) во внутренней области. Соответственно, излученные из этой области фотоны будут иметь более высокую энергию (т.е. будут «жестче»), чем при излучении диска как абсолютно черного тела. В самом деле, поскольку излучение черного тела термодинамически представляет собой наиболее эффективный механизм излучения, любой другой процесс излучения, создающий такой же поток, должен протекать при более высоких температурах.

В самых внутренних областях диска, которые в зависимости от параметров являются оптически тонкими (т.е.  $\tau^* < 1$  от  $z = 0$  до  $z = h$ ), излучение связано со свободно-свободными переходами и комптонизацией. Комптонизация — это механизм, посредством которого фотоны могут обмениваться энергией с электронами, когда энергия фотона испытывает доплеровский сдвиг второго порядка (т.е.  $v^2/c^2 \sim kT/m_e c^2$ ) вследствие томсоновского рассеяния<sup>1)</sup>. Эти области могут иметь температуры, несколько выше определяемых уравнением (14.5.59), вплоть до максимальных значений  $T_{\max} \leq 4 \cdot 10^8$  К для  $\alpha \sim 1$ ,  $M \sim 6 M_{\odot}$  и  $\dot{M}_{17} \geq 10$  [364].

Составной спектр излучения можно получить, если определить локальный поток и спектр для каждой области диска, а затем сложить вклады всех областей. Результаты таких подсчетов показаны на рис. 14.4 для случая аккреции на черную дыру с массой порядка солнечной. Этот рисунок наглядно иллюстрирует способность дисковой аккреции генерировать мощный поток мягкого рентгеновского излучения.

## 14.6. ДРУГИЕ МОДЕЛИ

Рассмотренная выше модель аккреционного диска в принципе представляет собой самое простое решение гидродинамических уравнений для тонкого аккреционного диска. Однако это решение вовсе не единственное. Более того, было показано<sup>2)</sup>, что внутренней области этого «стандартного» диска, где давление излучения преобладает над давлением газа, должна быть свойственна вековая неустойчивость, приводящая к дроблению на кольца. К тому же модель «стандартного» диска, предложенная для описания аккреции на черную дыру в тесной двойной системе, не позволяет объяснить

<sup>1)</sup> Краткое рассмотрение эффекта комптонизации приведено в разд. И.3 приложения И. Общее обсуждение см., например, в [318, 452, 493]. Обсуждение комптонизации мягких рентгеновских лучей, образовавшихся при свободно-свободных переходах, дано, например, в [194, 231]. Приложение к аккреционным дискам содержится в работах [522, 534]. Эффекты, зависящие от времени, рассмотрены в [363, 449].

<sup>2)</sup> В работах [1, 362] показано, что с учетом эффектов общей теории относительности все аккреционные диски — «стандартные» или любые другие, вблизи своих внутренних краев должны обладать тепловой и вековой динамической устойчивостью. Однако стабилизирующее влияние эффектов общей теории относительности не может простираться достаточно далеко во внутреннюю область, которая продолжается вплоть до радиуса  $r_{\text{in}} \gg r_s$ , где релятивистские эффекты уже не столь важны.

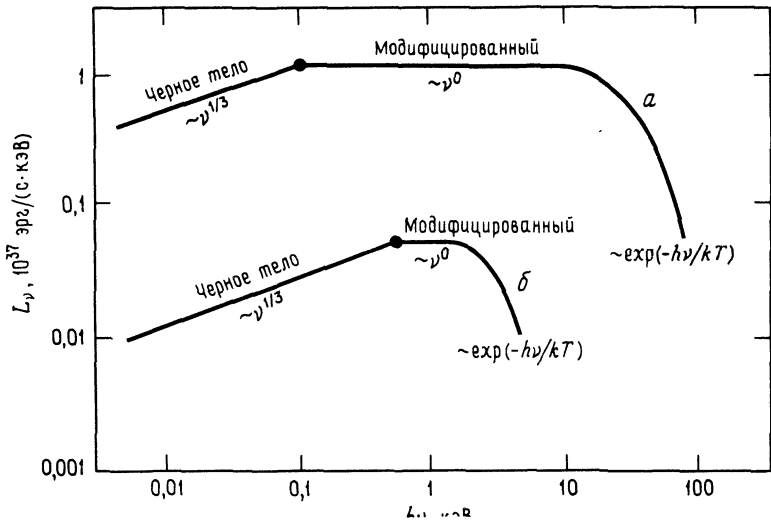
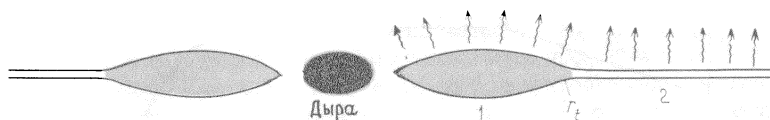


Рис. 14.4. Схема спектра излучаемой энергии для двух моделей диска вокруг черной дыры по расчетам Шакуры и Сюняева [522] без учета релятивистских поправок и захвата излучения дырой. В обеих моделях предполагается, что дыра не вращается и внутренний край диска расположен при  $r_1 = 6M$ . Модель *a* соответствует  $\alpha \sim 10^{-3}$ ,  $M = M_\odot$ ,  $\dot{M} = 10^{-8} M_\odot/\text{год}$ ,  $L = L_{\text{Edd}} \approx 10^{38}$  эрг/с; модель *б* соответствует  $\alpha \sim 10^{-2} \div 1$  (спектр нечувствителен к величине  $\alpha$ ),  $M = M_\odot$ ,  $\dot{M} = 10^{-6} M_\odot/\text{год}$ ,  $L \approx 10^{36}$  эрг/с. Часть спектра, отмеченная как *черное тело*, в основном излучается внешней холодной областью, где рассеяние электронами не существенно. Часть спектра, обозначенная термином *модифицированный*, излучается средней и внутренней областями, где рассеяние на электронах является основным источником непрозрачности. Температура экспоненциального «хвоста» — это поверхностная температура самой внутренней области [422].

жесткое рентгеновское излучение ( $\sim 100$  кэВ), наблюдаемое от Суг X-1 (см. разд. 13.5 и рис. 13.9).

Торн и Прайс впервые предположили [570], что внутренняя часть аккреционного диска оптически тонкая и находится при высокой температуре ( $\sim 10^9$  К). Такое предположение в отличие от «стандартной» модели диска с оптически толстой и низкотемпературной внутренней областью позволяет объяснить природу наблюдаемой жесткой составляющей в спектре Суг X-1 вблизи 100 кэВ. По мнению Торна и Прайса, вековая неустойчивость внутренней области стандартного «холодного диска» может «раздуть» эту оптически толстую область, где преобладает давление излучения, преобразуя ее в более горячую оптически тонкую область, где давление определяется газом (рис. 14.5). Согласованная модель «горячего диска» с такими свойствами была построена в работе [534]. Когда ее применили к Суг X-1, модель совершенно естественно дала требуемую температуру теп-



**Рис. 14.5.** Строение области «горячего» аккреционного диска, испускающей рентгеновские лучи. Оптически тонкая область (1) испускает комптонизированные фотоны (высокие энергии), оптически толстая область (2) — тепловые фотоны (низкие энергии). Типичные размеры: радиус черной дыры  $\sim 12$  км, радиус «утоньшения»  $r_t \sim 30 - 300$  км, радиус всей области, излучающей рентген,  $\sim 300$  км [570].

лового излучения  $10^9$  К. В этой «двухтемпературной» модели электроны находятся при температуре  $10^9$  К во всей внутренней области, а температура ионов в 3—300 раз выше. Жесткий рентгеновский спектр для энергий выше  $\sim 8$  кэВ создается комптонизацией мягких рентгеновских фотонов, излучаемых в оптически толстых частях диска; спектральная кривая имеет степенной характер в диапазоне от 8 до  $\sim 500$  кэВ, а выше она экспоненциально падает. Показатель степени зависит от безразмерного параметра комптонизации

$$y \equiv \frac{4kT_e}{m_e c^2} \tau_{es}^2, \quad (14.6.1)$$

имеющего обычно значение  $y \approx 1$  во всей внутренней области. В этом случае интенсивность определяется выражением (см. приложение И, разд. И.3)

$$I_\nu \propto x^{m+3} \exp(-x), \quad (14.6.2)$$

$$m = -\frac{3}{2} - \left( \frac{9}{4} + \frac{4}{y} \right)^{1/2}, \quad (14.6.3)$$

так что в типичных случаях интенсивность излучения от диска пропорциональна  $I_\nu \sim x^{-1} \exp(-x)$ . Этот результат вполне выдерживает сравнение с наблюдаемым жестким спектром Суг Х-1 (сравните с разд. 13.5 и рис. 13.9 и И.1). Однако данные наблюдений спектра при энергиях выше  $\sim 200$  кэВ еще остаются неясными. Отсутствие «завала» спектра при высоких энергиях вплоть до  $\geq 100$  кэВ указывает на то, что электронная температура области, излучающей жесткий рентген, составляет более  $10^9$  К, но

проведенные до настоящего времени наблюдения позволяют это значение рассматривать в качестве нижнего предела<sup>1)</sup>.

Были предложены и другие модели «горячего диска», способные объяснить жесткое рентгеновское излучение. Некоторые из таких моделей основаны на наблюдениях Суг X-1; другие на наблюдениях жестких рентгеновских (обычно степенных) спектров квазаров и ядер активных галактик. Модель, впервые предложенная в работах [67, 358, 429], предполагает существование горячей короны, в центре которой находится оптически толстый аккреционный диск. Высокая температура короны создается акустическими и альвеновскими волнами, а также диссипацией магнитных полей в верхней атмосфере диска. Жесткое рентгеновское излучение испускается короной, где происходит комптонизация мягких фотонов горячими тепловыми электронами<sup>2)</sup>.

Еще один класс самосогласованных моделей «горячего диска» был предложен в работах [450, 471]. Там предполагалось, что диск, оптически тонкий как для излучения, так и для поглощения, удерживается давлением газа и что в нем преобладает охлаждение тормозным излучением. При подходящих параметрах модели ( $\dot{M}_{17} \leq 0,1 M/M_{\odot}$ ) спектр имеет «тормозную» форму, т.е.  $dL/dE \propto e^{-x}$ , причем температура излучения  $\leq 10$  кэВ. Таким образом, модель не позволяет получить степенной профиль для энергий выше 10 кэВ. Как двухтемпературная модель, так и оптически тонкая модель с тормозным излучением не исключают возникновения тепловых неустойчивостей, которые ведут к образованию конденсаций [468]. Однако даже в этом случае диск может быть устойчивым в смысле среднего по времени, хотя и испытывать большие флуктуации [523].

**Упражнение 14.30.** а) Решите взаимосвязанные уравнения строения диска для оптически тонкой модели с тормозным излучением. Предположите, что  $P \approx P_R$ ,  $\alpha \approx 1$  и  $\Lambda = \Lambda_{\text{ff}} = 1,43 \cdot 10^{-27} (\rho/m_p)^2 T^{3/2} g_{\text{ff}} [g_{\text{ff}} \sim 1$ ; см. уравнение (И.46)]. Покажите, что [450]

$$T = (1,1 \times 10^8 \text{ К}) \left( \frac{\dot{M}_{17}}{M_3} \right)^{1/2} R^{-3/4} g_R^{1/2},$$

$$\rho = (2,7 \times 10^{-8}) \left( \frac{\dot{M}_{17}}{M_3} \right)^{1/4} M_3^{-1} R^{-15/8} g_R^{1/4} \text{ г/см}^3,$$

$$\tau_{\text{es}} = (0,24) \left( \frac{\dot{M}_{17}}{M_3} \right)^{1/2} R^{-3/4} g_R^{1/2},$$

$$\frac{h}{r} = (1,5 \times 10^{-2}) \left( \frac{\dot{M}_{17}}{M_3} \right)^{1/4} R^{1/8} g_R^{1/4},$$

<sup>1)</sup> Обзор данных, касающихся наблюдения жесткого рентгена от Суг X-1 и строения модели комптонизации, см., например, в [357].

<sup>2)</sup> Сравнение оптически тонкой двухтемпературной модели и модели диска с короной см. в [359].

где

$$R \equiv \frac{r}{10GM/c^2}, \quad g_R \equiv \frac{1 - (R_I/R)^{1/2}}{1 - R_I^{1/2}},$$

$$M_3 \equiv \frac{M}{10^3 M_\odot}, \quad \dot{M}_{17} = \frac{\dot{M}}{10^{17} \text{ г/с}}.$$

Заметим, что строение диска зависит от  $\dot{M}_{17}$  и  $M_3$  только через отношение  $\dot{M}_{17}/M_3 \sim L/(10^{-4}L_{\text{Edd}})$ , где  $L$  — полная светимость диска, а  $L_{\text{Edd}}$  — предельная эддингтоновская светимость черной дыры [см. уравнение (13.7.6)].

б) Сравните температуру излучения оптически тонкого диска с тормозным излучением и «стандартного» аккреционного диска при значении радиуса, соответствующем максимальному потоку ( $R \sim 1$ ). Представьте полученные результаты в виде графика зависимости от  $M(1 \leq M/M_\odot \leq 10^9)$  для  $L/L_{\text{Edd}} = 0,1$ . Прокомментируйте применимость этих двух моделей диска к мягкому рентгеновскому излучению от галактических черных дыр в двойных системах ( $M \sim M_\odot$ ) и от сверхмассивных черных дыр в плотных ядрах галактик и квазарах ( $M/M_\odot \sim 10^8$ )<sup>1)</sup>.

<sup>1)</sup> Детальное обсуждение спектров излучения от аккреционных дисков различного типа, образующихся вокруг массивных черных дыр, см. в [177].