

Этот важнейший факт прямо подтверждается наблюдениями — полная светимость синхротронного излучения электронов Крабовидной туманности  $\sim 10^{38}$  эрг/с в точности соответствует оценке темпа потерь энергии вращения центральной нейтронной звезды — пульсара:  $dE_r/dt = -4\pi^2 I \dot{P}/P^3$  при наблюдаемых значениях периода  $P = 0.033$  с и  $\dot{P} \sim 10^{-13}$  с/с. Аналогичная ситуация наблюдается и в других молодых остатках сверхновых.

Неустойчивости в плазменном потоке частиц внутри или вблизи светового цилиндра, движущихся вдоль открытых силовых линий с релятивистскими скоростями, рождают радиоволны в узконаправленном пучке. Именно это нетепловое радиоизлучение и наблюдается от пульсаров. Доля энергии, уносимая радиоизлучением, крайне мала (около  $10^{-4}$ – $10^{-6}$  от полных потерь вращательной энергии нейтронной звезды).

Современные представления о физике магнитосфер пульсаров и механизмах радиоизлучения изложены в учебном пособии В. С. Бескина «Осесимметричные стационарные течения в астрофизике». (Физматлит, 2006).

## 10.4. Рентгеновские пульсары

При наличии очень сильного магнитного поля нейтронной звезды ( $10^{12}$ – $10^{14}$  Гс) в тесной двойной системе возможен такой тип аккреции на НЗ, при котором газ нормальной звезды, замороженный в поле, падает вдоль линий индукции в область магнитных полюсов НЗ. Избыток момента импульса при этом передается звезде через магнитное поле. Скорости падения на поверхность НЗ порядка сотен тысяч км/с, и на небольшие области поверхности НЗ (сотни квадратных метров) обрушивается колоссальный поток вещества и энергии (порядка 100 кг/с на квадратный сантиметр). Температура плазмы в области падения при этом может достигать  $10^9$ – $10^{10}$  К. Выделяющаяся энергия излучается в форме жестких квантов, и на поверхности НЗ в районе магнитных полюсов образуются два горячих «рентгеновских» пятна. Сильное магнитное поле делает излучение этих пятен неизотропным. Поскольку магнитная ось в общем случае не совпадает с осью вращения, за время одного оборота НЗ вокруг оси далекий наблюдатель будет регистрировать один или два импульса рентгеновского излучения.

Такие импульсные рентгеновские источники получили название рентгеновские пульсары. Наблюдаемые периоды следования максимумов яркости рентгеновских пульсаров лежат в очень широких пределах — от нескольких мс до десятка минут. На месте рентгеновских источников в оптическом диапазоне всегда наблюдается нормальная звезда, как правило, также переменная, причем механизм переменности необычен: он связан с интенсивным прогревом одной стороны звезды ее горячим спутником. Оптическая звезда может быть как массивной молодой ОВ-звездой, так и старой звездой умеренной массы галактического гало. Если в своем орбитальном движении НЗ заходит за диск звезды, рентгеновские импульсы прекращаются до тех пор, пока НЗ вновь не выйдет из затмения. Продолжительность этой фазы, как и доплеровское изменение частоты импульсов при орбитальном движении НЗ, дают дополнительную информацию об орбитах звезд ТДС и их массах.

Светимость рентгеновских пульсаров составляет  $10^{35} - 10^{39}$  эрг/с, так что наиболее мощные из них могут наблюдаться даже в соседних галактиках. Обычные пульсары, о которых шла речь выше (радиопульсары) также излучают рентгеновские импульсы (пульсар в Крабовидной туманности), но значительно более слабые, причем механизм их формирования совсем иной. Если радиопульсары излучают за счет энергии вращения НЗ, и поэтому медленно тормозят свое вращение (период со временем возрастает), то рентгеновские пульсары излучают энергию аккрецирующего потока, т. е. светят за счет гравитационной энергии падающего вещества. Передача момента импульса звезде приводит в этом случае к ускорению вращения, то есть к медленному сокращению периода между импульсами, что действительно наблюдается.

## 10.5. Черные дыры

Черные дыры (ЧД) звездной массы могут образоваться либо при аккреционно-индуцированном коллапсе нейтронных звезд в двойных системах, либо при коллапсе ядер массивных ( $> 20-40 M_{\odot}$ ) одиночных звезд. Процесс их образования плохо изучен, даже на качественном уровне. До сих пор не ясно, сопровождается ли образование черной дыры сбросом оболочки (т. е. явлением сверхновой звезды). Полное число ЧД в Галактике может составлять несколько процентов от числа нейтронных звезд и достигать миллиона.