

Поэтому частицы будут вырваны с поверхности и образуют плазменную область вокруг звезды — *магнитосферу*. Таким образом, *вакуумное решение для области, окружающей вращающуюся нейтронную звезду, является неустойчивым*.

Внутри светового цилиндра плазма будет вращаться синхронно со звездой благодаря сильному магнитному полю. Магнитосфера действует как продолжение полностью проводящей внутренней области, так что условие $\mathbf{E} \cdot \mathbf{V} = 0$ и уравнения (10.7.7), (10.7.15) и (10.7.16) остаются справедливыми. Область, где магнитные силовые линии выходят за пределы светового цилиндра («открытая магнитосфера»), содержит частицы, которые непрерывно теряются звездой, и удовлетворяет условию $\mathbf{E} \cdot \mathbf{V} \neq 0$ (см. рис. 10.6).

10.8. МЕХАНИЗМЫ ИЗЛУЧЕНИЯ ПУЛЬСАРОВ

Подлинный механизм, посредством которого пульсар преобразует энергию вращения нейтронной звезды в наблюдаемые *импульсы*, понят недостаточно. Было предложено много теоретических моделей, но ни одну из них нельзя считать убедительной¹⁾. В то же время характеристики радиоизлучения от разных пульсаров кажутся универсальными и, по-видимому, ко всем пульсарам приложима единая основная модель.

С другой стороны, наблюдаемая в радиоимпульсах энергия — это лишь небольшая часть²⁾ диссипируемой энергии вращения, так что незнание истинных процессов импульсного излучения может и не мешать решению вопроса об общей энергетике излучающих нейтронных звезд.

Каковы же фундаментальные наблюдательные требования к механизму импульсного излучения? Вот некоторые из них:

1. Излучение должно испускаться в виде сравнительно узкого пучка, ориентация которого относительно нейтронной звезды фиксирована. Пучок должен иметь размер по долготе не более 10° с точки зрения удаленного наблюдателя, и такая ширина должна сохраняться в диапазоне нескольких порядков значений частоты. Более того, форма пучка и долгота должны оставаться стабильными в течение многих периодов вращения.

2. Механизм излучения должен создавать довольно широкополосное излучение как на радио-, так и на оптических частотах. Ширина полосы радиоимпульсов составляет не менее 100 МГц.

3. Процесс излучения должен обеспечивать наблюдаемые светимости и яркостные температуры в радио-, оптическом и рентгеновском диапазонах.

4. Излучение на радиоволнах должно проявлять сильную линейную поляризацию, которая почти не зависит от частоты и стабильна в течение длительных промежутков времени.

¹⁾ Обзор и критику некоторых из моделей см. в [380, 404, 492, 540].

²⁾ Эта доля не превышает 10^{-9} для пульсара в Крабовидной туманности и 10^{-2} для некоторых старых пульсаров.

Яркостная температура T_b излучающей области определяется соотношением

$$I_\nu \equiv B_\nu(T_b), \quad (10.8.1)$$

где I_ν — удельная интенсивность [эрг/(с · см² · Гц · стерад)], а B_ν — функция Планка (см. приложение И). Для $h\nu \ll kT_b$ имеем хорошо известный закон Рэлея—Джинса:

$$I_\nu = \frac{2\nu^2}{c^2} kT_b \quad (h\nu \ll kT_b). \quad (10.8.2)$$

Радиосветимости пульсаров в предположении конусообразной формы пучков и разумных значений расстояний лежат в диапазоне $10^{25} - 10^{28}$ эрг/с. Если предположить, что размер излучающей площади источника по порядку величины составляет $\sim (ct)^2 \sim 10^{15}$ см², где $t \leq 10^{-3}$ с — типичная длительность импульса, получим

$$\begin{aligned} I_\nu &\sim 10^4 - 10^7 \text{ эрг/(с} \cdot \text{см}^2 \cdot \text{Гц} \cdot \text{стерад)}; \\ T_b &\sim 10^{23} - 10^{26} \text{ К}; \\ kT_b &\sim 10^{17} - 10^{22} \text{ эВ}. \end{aligned} \quad (10.8.3)$$

Для некогерентного излучения из термодинамики следует, что $kT_b \leq E_p$, где E_p — энергия частицы. (Это просто переформулировка того факта, что черное тело является наиболее эффективным излучателем.) Однако энергии частиц, следующие из (10.8.3), абсурдно велики. Если бы даже частицы таких высоких энергий и существовали, они излучали бы значительную часть своей энергии на очень высоких частотах, а не в радиодиапазоне. Мы приходим к заключению, что требуется *когерентный* механизм излучения, где полная интенсивность в $\sim N^2$ раз превышает интенсивность излучения отдельной частицы (N — полное число частиц, излучающих когерентно).

Такая когерентность не требуется для наблюдаемого рентгеновского или оптического импульсного излучения.

Упражнение 10.7. Покажите, что яркостная температура рентгеновского излучения пульсара в Крабовидной туманности (светимость 10^{35} эрг/с) равна $\sim 10^{11}$ К, и докажете, что для частиц в магнитосфере приемлемое значение энергии составляет $E_p \sim 10$ МэВ.

В большинстве моделей излучение сконцентрировано в конусообразный пучок, который вращается синхронно с нейтронной звездой. В моделях с «полярной шапкой» конус излучения направлен по оси магнитного диполя звезды и лежит внутри синхронно вращающейся магнитосферы. В моделях «светового цилиндра» ось конуса направлена по касательной к световому цилиндру и перпендикулярна оси вращения звезды; в этом случае излучение возникает вблизи R_c . Были предложены и другие модели с расположением излучающей области за пределами светового цилиндра. Поскольку соответствующие теоретические проблемы еще далеко не разрешены, мы не будем обсуждать эти модели более подробно.