

МАГНИТОРЕЛЯТИВИСТСКАЯ МОДЕЛЬ ИМПУЛЬСА ПУЛЬСАРА

С.А.Каплан, В.Я.Эйдман

Импульсный характер излучения пульсаров обычно связывается – и это наиболее вероятное объяснение – с существованием определенной направленности диаграммы их излучения, которая может быть либо "карандашной", либо "ножевой". Поворот этой диаграммы в пространстве и определяет наблюдение излучения в виде отдельных импульсов. В предложенных до сих пор моделях направленность диаграммы излучения объясняется геометрическими факторами: отрыв облаков плазмы в плоскости экватора вращающейся с релятивистской скоростью части магнитосферы нейтронной звезды [1]; специальное распределение излучающих частиц в "удобных" частях магнитосферы [2] и т.д. До сих пор не удалось, однако, получить количественные оценки величины $\Delta\nu$ – расствора диаграммы направленности – на основе физических соображений. С другой стороны, хорошо известно, что направленность является непременным свойством излучения релятивистских объектов.

В связи с этим можно предложить следующую модель пульсара.

1. Допустим, что пульсар представляет собой нейтронную звезду с дипольным (или более сложным) магнитным полем, вращающуюся или

колеблющуюся так, чтобы области поверхности пульсара с магнитными полюсами двигались бы с релятивистскими скоростями. Мы не можем сейчас дать строгого обоснования такой модели, но некоторые качественные соображения в ее пользу можно привести.

Известно, что по крайней мере у части пульсаров имеются два периода. Обычно наибольший период связывают с вращением пульсара, а меньший — с его пульсациями. Скорость вращения пульсара, определяемая по наблюдаемому периоду $T = 3 \cdot 10^{-3} + 4$ сек и по задаваемому радиусу нейтронной звезды $a = 10^6$ см, заметно меньше скорости света. Но скорость движения поверхности пульсара в пульсациях неизвестна, и предположение о ее близости к скорости света, по крайней мере, при некоторых фазах не противоречит наблюдениям.

Возможна и другая модель. Например, сам пульсар может вращаться с релятивистской линейной скоростью на его экваторе и, кроме того, прецессировать с гораздо меньшей скоростью. В пользу этого варианта можно привести следующее соображение. Во-первых, если звезда типа Солнца (а тем более, быстровращающаяся звезда более раннего спектрального класса) коллапсирует с сохранением момента вращения к нейтронной звезде с размером, близким к гравитационному радиусу, то релятивизм вращения неизбежен. При этом нейтронная звезда оказывается несферической и появление прецессии из-за особых свойств гравитационного поля в общей теории относительности здесь вполне возможно. Разумеется, эту задачу следует рассмотреть более подробно, но отметим, что прецессия в поле вращающегося тела в общей теории относительности хорошо известна (см. [3, 4]). По аналогии с этими задачами можно ожидать и прецессию самого релятивистски вращающегося тела с угловой скоростью $\Omega \sim GM/c a^2$, где G — постоянная тяготения, M и a — масса и радиус тела, c — скорость света (особенно если учесть и возможную неоднородность вращения, аналогичную, например, наблюдаемому у Солнца экваториальному ускорению). Кстати, в рамках предположения о прецессионном движении легче объяснить скачки периода у пульсара Вэла.

2. Движущиеся с релятивистской скоростью полюса диполя с магнитным моментом m излучают длинноволновые электромагнитные поля. Подобное излучение можно рассчитывать по обычным формулам синхронного излучения с заменой величины электрического заряда q на величину магнитного заряда $\mu = m/2a$ (здесь $2a$ — расстояние между зарядами диполя $\pm \mu$), а также E на H и H на $-E$, где E и H — напряженности

электрического и магнитного полей длинноволнового излучения. Отсюда следует, что это излучение направлено; угол раствора диаграммы направленности определяется релятивизмом движения магнитных зарядов:

$\Delta \nu = 1/\gamma = \sqrt{1 - v^2/c^2}$ (v — линейная скорость полюсов). В модели вращения с прецессией эта диаграмма быстро поворачивается в плоскости экватора (как бы "заполняет" его) и более медленно — вокруг оси прецессии. В модели с релятивистскими пульсациями диаграмма направленности поворачивается только в экваториальной плоскости вращения. Поворот диаграммы направленности длинноволнового излучения пульсара образует его "видеоимпульс".

3. Электроны окружающей пульсар плазмы, попадая в область диаграммы направленности этого длинноволнового излучения, ускоряются до ультррелятивистских энергий, причем они движутся преимущественно вдоль мгновенной оси диаграммы направленности. Выходя из конуса длинноволнового излучения, эти электроны быстро тормозятся в остаточном внешнем магнитном поле, давая синхротронное и комптоновское излучение. При этом происходит трансформация длинноволнового излучения релятивистских магнитных полюсов в высокочастотное электромагнитное (в том числе рентгеновское и гамма) излучение, т. е. "заполнение" видеоимпульса.

Теперь рассмотрим количественные соотношения. Релятивизм движения магнитных полюсов при любых предположениях об их характере определяется отношением наблюдаемой длительности импульса Δt и периодом их повторения T . Согласно общим свойствам излучение релятивистских зарядов (в том числе и магнитных полюсов) $\Delta t/T = 1/2\gamma^3$. Отсюда наблюдаемый импульсный характер излучения пульсаров можно объяснить очень слабым релятивизмом магнитных полюсов: $\gamma \approx 2 + 3$.

Предположим, что длинноволновое излучение магнитного полюса μ , конвертируясь в высокочастотное излучение, обеспечивает всю светимость пульсара L во всех диапазонах. Тогда электрическое и магнитное поля этого излучения в волновой зоне на расстоянии R от источника:

$$E = H = \frac{2\pi\mu}{\lambda R} = \frac{\gamma}{R} \left(6 \frac{L}{c}\right)^{1/2}, \quad (1)$$

где λ — длина волны. Для вращающегося с релятивистской скоростью пульсара $\lambda = \pi a/\gamma^3$. У реальных пульсаров $\lambda = 10^4 - 10^5$ см. Полагая $L = 10^{38}$ эрг/сек, получаем из (1): $\mu = 10^{19}$ CGSE, т. е. если магнитное поле на поверхности пульсара $H_0 = 10^{12}$ эс, то размер полю-

са $\sqrt{\mu/H_0} \approx 3 \cdot 10^3$ см. Величины электрического и магнитного полей в волновой зоне при $R \approx 10^8$ см порядка 10^6 CGSE (гаусс). Если пренебречь поляризацией среды вокруг пульсара, то электрическое и магнитное поля длинноволнового излучения скрещены и равны по величине. В этом случае они ускоряют заряды до энергии порядка $E = (mc^2 \mathcal{E}_0^2)^{1/2}$, где $\mathcal{E}_0 = e \lambda E = 10^9$ эрг (см. [3, 5], где тоже рассматривалось ускорение зарядов длинноволновым излучением магнитного дипольного момента пульсара, но без учета релятивизма). Таким образом, электроны ускоряются, по крайней мере, до энергии порядка 10^5 Мэв. Необходимая для заполнения видеоимпульса концентрация этих электронов определяется по очевидной формуле $n = L \lambda \gamma^2 / c \mathcal{E} R^3 \approx 10^9$ см⁻³.

Поляризация среды (дипольный момент объема), созданная длинноволновым излучением, не может превысить величины $P = n e \lambda \approx 10^4$ CGSE, т. е. на два порядка меньше величины самого поля. Следовательно, длинноволновое излучение может распространяться на большие расстояния. С другой стороны, учет поляризации нарушает равенство E и H (увеличивая электрическое поле), что способствует ускорению частиц до больших энергий. Кроме того здесь возможно дополнительное сжатие диаграммы направленности длинноволнового излучения за счет явления самофокусировки в релятивистской плазме. Авторы предполагают рассмотреть в деталях предложенную схему в другой работе.

Выражаем искреннюю благодарность за стимулирующие дискуссии А.А.Андронову, А.В.Гапонову, А.Г.Литваку, С.Б.Пикельнеру, В.И.Слышу, Е.В.Суворову и Ю.В.Чугунову.

Поступила в редакцию

23 июня 1969 г.

После переработки

11 августа 1969 г.

Литература

- [1] T.Gold. Nature, 218, 731, 1968; 221, 25, 1969.
- [2] В.Л.Гинзбург, В.В.Железняков, В.В.Зайцев. УФН, 98, №2, 1969.
- [3] Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теория поля, Изд. Наука, 1967.
- [4] Я.Б.Зельдович, И.Д.Новиков, Релятивистская астрофизика, Изд. Наука, 1967
- [5] J.Gunn, J.Ostriker, Nature, 221, 454, 1969