

## Торможение первичного пучка в пульсарном ветре

*Л.И. Арзамасский<sup>1</sup>, В.С. Бескин<sup>1,2</sup>, В.В. Прокофьев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>Физический институт им. П.Н.Лебедева РАН

Радиопульсары, как считается, являются наиболее эффективными ускорителями частиц в космосе. В самом деле, быстрое вращение нейтронной звезды, обладающей сильным магнитным полем, неизбежно приводит к генерации достаточно большой разности потенциалов на поверхности звезды. Падение потенциала и определяет энергетику радиопульсаров.

В соответствии с общепринятой точкой зрения, активность радиопульсаров связана с электронно-позитронной плазмой, генерирующейся около магнитных полюсов [1]. Многочисленные работы, посвященные этой теме [2,3,4,5,6,7,8] сформировали общую точку зрения, заключающуюся в том, что ускоряемая плазма состоит из первичного пучка с Лоренца-фактором  $\gamma_b \sim 10^8$  и плотностью  $n = n_{GJ}$ , где  $n_{GJ} = \Omega B / 2\pi c e$  - плотность Голдрайха-Джулиана, и вторичной электрон-позитронной плазмы.

Как правило, в теоретических работах, посвященных ускорению частиц, эффектами, связанными с первичным пучком пренебрегают, ввиду его малой плотности по сравнению с плотностью основной плазмы. В данной работе мы исследовали условия, при которых подобное пренебрежение возможно, а также оценили вклад пучка в ускорении частиц основной плазмы.

Очевидно, что внутри светового цилиндра  $r < R_{LC} = c/\Omega$  как первичная, так и вторичная плазма движутся вдоль магнитных силовых линий дипольного поля. С другой стороны, при достаточно больших расстояниях от нейтронной звезды  $r \gg R_{LC}$  теория предсказывает квази-радиальный отток релятивистской электронно-позитронной плазмы вдоль полоидального магнитного поля с дрейфовой скоростью. Уже из этих рассуждений становится ясно, что частицы первичной и вторичной плазмы, имеющие разные скорости на световом цилиндре, не могут двигаться с постоянной скоростью. В свою очередь, из-за малой плотности первичной плазмы, именно её торможение является основным эффектом, изученным нами в данной работе. Очевидно, что при торможении первичного пучка, вторичный пучок должен ускоряться, оценка этого ускорения также была нами получена.

Для количественного рассмотрения упомянутых выше эффектов мы использовали приближение трёхкомпонентной плазмы (для позитронов и электронов основного пучка, а также для частиц первичной плазмы). В рамках этого приближения был найден закон замедления пучка первичной плазмы, а также установлен критерий, при котором этим замедлением можно пренебречь. В качестве нулевого приближения нами было взято бессилое решение [9], на которое накладывалось малое возмущение, соответствующее ненулевой массе движущихся частиц. Подобно работе [10], были получены линеаризованные уравнения на возмущения, но теперь, в отличие от рассмотренного в этой работе случая, нами учитывались частицы основного пучка, обладающие гораздо большими энергиями. Было показано, что в этом случае частицы основного пучка начнут тормозиться за счёт силы Лоренца. Нами был исследован характер этого торможения, найден критерий, при котором этим торможением можно пренебречь, а также сделана оценка ускорения основного пучка первичным в случае, когда торможением пренебречь нельзя.

Таким образом, мы показали, что для большинства радиопульсаров энергия первичного пучка не изменяется за пределами светового цилиндра. Двигаясь быстрее, чем истекающая вторичная плазма, первичный пучок неизбежно будет пересекать токовые слои, предсказанные современной теорией пульсарного ветра. Только для самых энергичных пульсаров, таких как Crab и Vela, пучок будет эффективно замедляться на масштабе нескольких световых цилиндров. Только в этом случае истекающую плазму можно исследовать в приближении одножидкостной магнитной гидродинамики.

### Литература

1. *Smith I.A., Michael F.C. Thacker P. D., MNRAS 2001 V. 322. P. 209.*
2. *Гуревич А.В., Истомин Я. Н. ЖЭТФ. 1985. Т. 89. С. 3.*
3. *Истомин Я.Н., Собьянин Д. Н. ЖЭТФ. 2009. Т. 136. С. 458.*
4. *Arons J. ApJ. 1981. V. 248. P. 1099.*
5. *Daugherty J.K., Harding A. K. ApJ. 1983. V. 273. P. 761.*
6. *Ruderman M.A., Sutherland P. G. ApJ. 1975. V. 196. P. 51.*
7. *Sturrock P.A. ApJ.V. 1971. 164. P. 529.*
8. *Timokhin A.N., Arons J. MNRAS. 2013. V. 429. P. 20.*
9. *Michel F.C, ApJ. 1974. V. 187. P. 585.*
10. *Beskin. V.S., Rafikov R.R. MNRAS. 2000 V. 313. P. 433.*