

"ПИОНЕР 10" И СПЕКТР ДЕЦИМЕТРОВОГО
РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ЮПИТЕРА

А. Г. Соловьев, А. Д. Кузьмин

УДК 523.038:523.45:523.164

Произведен расчет спектра синхротронного радиоизлучения радиационного пояса Юпитера на основе данных "Пионера 10". Из сравнения расчетного и экспериментального спектров получена оценка плотности тепловой плазмы в излучающей области магнитосферы Юпитера $n \sim 5 \cdot 10^4$ эл/см³.

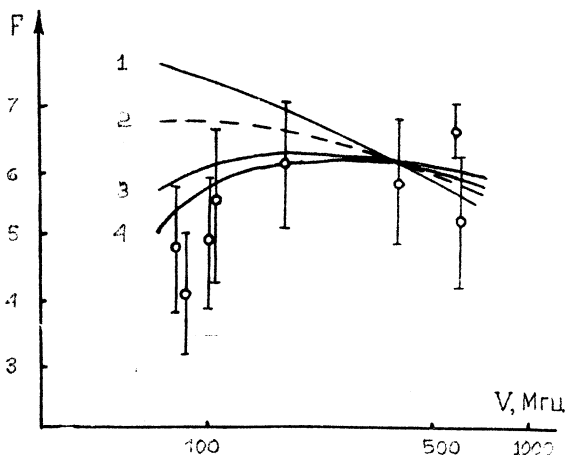
До последнего времени вся информация о магнитном поле Юпитера, о физических характеристиках его радиационного пояса, о строении магнитосферы получалась только на основе исследования радиоизлучения планеты. Экспериментально определялись временная, пространственная и спектральная зависимости, поляризация. Затем путем сопоставления экспериментальных и расчетных данных для выбранных моделей делались заключения о физических условиях в этих областях магнитосферы. После полета космического аппарата "Пионер 10" появились прямые экспериментальные данные о строении магнитосферы Юпитера, что позволило конкретизировать расчеты радиоизлучения планеты.

Целью настоящей работы является сопоставление измеренного спектра радиоизлучения Юпитера с расчетным, который получен на основе измерений "Пионера 10". Расчет проведен при следующих параметрах и предположениях.

- 1) Радиоизлучение Юпитера представляет собой синхротронное излучение релятивистских электронов, захваченных магнитным полем Юпитера.
- 2) Магнитное поле планеты дипольное с величиной дипольного момента $M = 4R_J^3 / I$. R_J - радиус Юпитера.
- 3) Угол между осью магнитного диполя и осью вращения планеты 10° .
- 4) Излучающая область расположена между силовыми линиями,

пересекающими плоскость магнитного экватора на расстояниях соответственно $1,5R_J$ и $6R_J$.

5) Излучают электроны с энергиями $2 \text{ Мэв} < E < 60 \text{ Мэв}$.



Р и с.1. Расчетные спектры радиоизлучения Юпитера и экспериментальные данные

6) Плотность электронов в плоскости магнитного экватора определяется следующей функцией энергий, экваториального расстояния R_e и питч-угла $\alpha/2$:

$$N(E, R_e, \alpha) = \frac{1,67 \cdot 10^{-5} R_e}{0,054 + 0,27/R_e + 0,1/R_e^2} \sin^p(R) \alpha \left(1 + \frac{R_e^{3/2}}{100} E \right)^{-3}, \quad (1)$$

удовлетворяющей с погрешностью 30% данным "Пионера 10" на расстояниях $3R_J < R_e < 5R_J$. Эта функция экстраполировалась до расстояний $1,5R_J$ и $6R_J$.

Учитывалось поглощение в атмосфере электронов, достигающих ее при своем движении вдоль магнитной силовой линии, и затенение части излучающей области диском планеты.

Расчитанный спектр излучения представлен на рис.1 (кривая I). На этом же рисунке показан экспериментальный спектр радиоизлучения Юпитера, построенный по известным к настоящему времени данным. Из рисунка видно, что величина рассчитанной плотности потока

растет с уменьшением частоты, в то время как эксперимент показывает уменьшение потока с уменьшением частоты. В настоящее время известно несколько причин, которые могут привести к подобному низкочастотному "завалу" в спектре источника синхротронного излучения. Это:

- 1) Обрыв в энергетическом спектре излучающих электронов или, во всяком случае, достаточно резкое уменьшение их плотности с уменьшением энергии;
- 2) реабсорбция синхротронного излучения в источнике;
- 3) поглощение в плазме, находящейся между источником и наблюдателем;
- 4) отличие показателя преломления среды, в которой излучают релятивистские электроны, от единицы.

Расчет спектра основывался на экспериментальных данных об энергетическом спектре плотности электронов в радиационном поясе Юпитера (рассчитывался поток излучения от реально существующих электронов), поэтому низкочастотный "завал" нельзя объяснить обрывом в энергетическом спектре излучающих частиц.

Коэффициент поглощения, обусловленный реабсорбцией синхротронного излучения, дается выражением /3/

$$\mu_p(\bar{f}) = -\frac{c^2}{8\pi f^2} \int_{E_1}^{E_2} E^2 \frac{\partial}{\partial E} \left[\frac{N(E, \bar{f})}{E^2} \right] q(E, f, \bar{f}) dE, \quad (2)$$

где f - частота, H - напряженность магнитного поля,

$$q(E, f, \bar{f}) = \frac{\sqrt{3} e^3 H \sin \alpha}{mc^2} \frac{f}{f_c} \int_{f/f_c}^{\infty} K_{5/3}(x) dx;$$

$$f_c = \frac{3eH \sin \alpha}{4\pi mc} \left(\frac{E}{mc^2} \right)^2,$$

где $K_{5/3}(x)$ - функция Макдональда. Оптическая толщина радиацион-

ного пояса $\tau_p = \int_{R_1}^{R_2} \mu_p(\bar{f}) dr$. При подстановке значений $n(\bar{f})$, $N(E, \bar{f})$, характерных для радиационного пояса Юпитера, это дает $\tau_p \sim 10^{-9}$

на частоте $f = 100$ МГц, т.е. среда оптически тонкая, и реабсорбцию можно не учитывать.

Интенсивность излучения уменьшается в $\exp(\mu_T(f)\Delta L)$ раз после прохождения пути ΔL в тепловой плазме, где

$$\mu_T(f) = 10^{-2} \frac{N_T}{T^{3/2} f^2} \left[17,7 + \ln \left(\frac{T^{3/2}}{f} \right) \right] \quad (3)$$

- коэффициент поглощения тепловой плазмы с плотностью N_T и температурой T . Для объяснения низкочастотного "завала" поглощением в такой плазме требуется, чтобы на луче зрения было $\sim 1,2 \times 10^{15}$ частиц, или средняя плотность плазмы на протяжении $70R_J$ была $2,5 \cdot 10^4$ эл/см³. В работе /1/ произведена оценка плотности плазмы во внешней части магнитосферы Юпитера, на основе данных "Пионера 10" о конфигурации магнитного поля в этой области, и получено $N_T \sim 1 - 10$ эл/см³. Т.е. и поглощение во внешней части магнитосферы не может объяснить низкочастотного "завала" в спектре.

Присутствие плазмы в самой излучающей области изменяет показатель преломления среды, что влияет на характеристики излучения. Ограничение на величину плотности тепловой плазмы N_p в излучающей области накладывает существование линейной поляризации излучения с длиной волны 31 см. Для того, чтобы наблюдалась такая поляризация, необходимо выполнение условия /4/

$$\frac{4,7 \cdot 10^4}{f^2} \int N_p N_{||} dR < 1,$$

где $N_{||}$ - компонента магнитного поля параллельная лучу зрения, интеграл берется вдоль луча зрения.

Для $f = 10^9$ МГц это дает $N_p < 2,1 \cdot 10^4$ эл/см³, если плазма занимает всю излучающую область $1,5R_J < R_e < 6R_J$ и $N_p < 10^5$ эл/см³, если плазма занимает внешнюю часть излучающей области $3R_J < R_e < 6R_J$.

Результаты расчета спектра излучения с учетом присутствия плазмы в излучающей области приведены на рис.1. Кривая 2 соответствует модели, в которой плазма с плотностью $N_p = 2 \cdot 10^4$ эл/см³ заполняет всю излучающую область, кривые 3 и 4 соответствуют случаям, когда плазма с плотностью $N_p = 5 \cdot 10^4$ эл/см³ и $N_p = 8 \cdot 10^4$ эл/см³ заполняет только внешнюю часть излучающей области. Из рисун-

ка видно, что кривые 3 и 4 согласуются с экспериментальной зависимостью в области низких частот.

Таким образом, из сопоставления экспериментального спектра дециметрового радиоизлучения Юпитера и спектра, рассчитанного на основе данных "Пионера 10", следует заключение о возможном присутствии холодной плазмы с $N_p \sim 5 \cdot 10^4$ эд/см³ в магнитосфере Юпитера на расстояниях $3R_J < R_e < 6R_J$.

Поступила в редакцию
5 августа 1975 г.

Л и т е р а т у р а

1. E. I. Smith et al. J. Geophys. Res., 79, 3501 (1974).
2. C. E. McIlwain, R. W. Fillius. J. Geophys. Res., 80, 1341 (1975).
3. В. Л. Гинзбург, С. И. Сыроватский. УФН, 87, 65 (1965).
4. В. В. Железняков. Радиоизлучение Солнца и планет. "Наука", М., 1964 г.