

УДК 52-64, 524.354.6

**ПЕРЕНОС РЕЗОНАНСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАМАГНИЧЕННОЙ ПЛАЗМЕ
С УЧЕТОМ ДИФФУЗИИ ПО ЧАСТОТЕ**

М.А. Гарасев, Е.В. Деришев, В.В. Кочаровский

**RESONANT RADIATION TRANSFER IN A MAGNETIZED PLASMA
WITH FREQUENCY DIFFUSION EFFECTS**

M.A. Garasyov, E.V. Derishev, V.V. Kocharovsky

В сильных магнитных полях (10^{11} – 10^{14} Гс), характерных для нейтронных звезд, поляризация вакуума оказывает существенное влияние на распространение электромагнитных волн в магнитоактивной плазме. В частности, в линии циклотронного резонанса сила давления излучения может превосходить силу тяжести, что приводит к истечению вещества из атмосферы звезды. Для выяснения условий, при которых такое истечение возможно, необходим анализ уравнений переноса излучения совместно в двух нормальных модах. Кроме того, диффузия фотонов по частоте, связанная с конечной шириной резонансной линии, а также с релятивистскими эффектами, может приводить к существенной трансформации спектра.

В работе получены уравнения переноса электромагнитных волн в замагниченной плазме с учетом влияния поляризации вакуума и процессов диффузии излучения по частоте. Получены численные решения уравнений переноса в окрестности электронного циклотронного резонанса методом Фотриэ.

In strong magnetic fields (10^{11} – 10^{14} G) of neutron stars, vacuum polarization significantly modifies propagation of the electromagnetic waves in magnetized plasma. Particularly, the radiation pressure force within the cyclotron resonance line can exceed the gravity force and induce a matter outflow from the star's atmosphere. To find the conditions when such outflow is possible it is necessary to solve joint transfer equations for both normal modes. Besides, diffusion of photons in frequency due to finite width of the resonance line and due to relativistic effects can considerably modify the spectrum.

We derive the transfer equations for strongly magnetized plasma including the effects of vacuum polarization and frequency diffusion. Numerical solutions of transfer equations are obtained using Feautrier-type method.

Как известно [1] в сильных магнитных полях, сравнимых или превосходящих по величине $B_0 = 4.4 \cdot 10^{13}$ Гс, свойства вакуума подобны свойствам двоякопреломляющей среды (этот эффект называют поляризацией или намагничением вакуума). На поверхности нейтронных звезд магнитные поля могут достигать $\sim 10^{15}$ Гс, оказывая влияние на поляризацию и распространение электромагнитных волн в их атмосферах.

Дисперсионные свойства намагниченного вакуума описываются диэлектрической и магнитной проницаемостями [2]:

$$\epsilon_{ik}^{\text{vac}} = \delta_{ik} (1 - 2a) + 7a \frac{B_i B_k}{B^2},$$

$$\mu_{ik}^{-1(\text{vac})} = \delta_{ik} (1 - 2a) - 4a \frac{B_i B_k}{B^2},$$

$$a = \frac{1}{45\pi} \frac{e^2}{\hbar c} \left(\frac{B}{B_0} \right)^2.$$

Рассмотрим модельную задачу для изотермической плоскопараллельной атмосферы, состоящей из плазмы с температурой T . Распределение концентрации по высоте описывается барометрическим законом:

$$N = N_0 \exp\left(-\frac{z}{H}\right),$$

где

$$H = \frac{2kT}{m_p g} \approx 19 \left(\frac{kT}{1\text{кэВ}} \right) \left(\frac{10^{14} \text{см}/\text{с}^2}{g} \right) \text{см} -$$

приведенная высота атмосферы, m_p – масса протона, k – постоянная Больцмана, g – ускорение свободного падения. Магнитное поле считаем однородным и

направленным вдоль оси z параллельно градиенту концентрации.

Перенос интенсивности излучения в такой среде описывается системой уравнений следующего вида:

$$\cos \theta \frac{dI_i}{dz} = -(\sigma_i + \kappa_i) I_i + \sum_{j=1}^2 \int \sigma_{ji}(\theta', \omega' \rightarrow \theta, \omega) I_j(\theta', \omega', z) d\theta' d\omega' + \epsilon_i,$$

где $\sigma_{ij}(\theta, \omega \rightarrow \theta', \omega')$ – дифференциальное сечение рассеяния фотона моды i и частоты ω , распространяющегося под углом θ к магнитному полю, в фотон моды j с частотой ω' , углом распространения θ' , σ_i – полное сечение рассеяния фотона моды i , κ_i – коэффициент поглощения, ϵ_i – коэффициент излучения. Коэффициент излучения связан с коэффициентом поглощения соотношением Кирхгофа:

$$\epsilon_i = \kappa_i(B\omega, T),$$

$$B(\omega, T) = \frac{\hbar \omega^3}{4\pi^3 c^2} \frac{1}{\exp(\hbar\omega/kT) - 1},$$

где \hbar – постоянная Планка, c – скорость света. Вместо координаты z удобнее ввести переменную

$$\tau = \sqrt{\frac{\pi}{8}} \frac{4\pi e^2}{m_e \omega_B v_T} \int_z^\infty N(z') dz',$$

отсчитываемую от бесконечно удаленной точки вглубь атмосферы, где m_e – масса электрона, e – элементарный заряд, v_T – характерная тепловая скорость, ω_B – электронная гирочастота. Физически τ – это оптическая толщина для необыкновенной волны, рассчитанная в центре линии для излучения, распространяющегося вдоль магнитного поля.

Уравнения переноса решаются с граничными условиями

$$I_i(\tau = 0, \omega, \cos \theta < 0) = 0,$$

$$I_i(\tau \rightarrow \infty, \omega, \cos \theta > 0) = B(\omega, T) / 2.$$

Первое граничное условие означает отсутствие потока излучения сверху на атмосферу, второе граничное условие соответствует стремлению интенсивности излучения к чернотельной в глубине атмосферы.

Условие резонансного взаимодействия фотона с электроном в магнитном поле имеют вид

$$\frac{\hbar \omega}{mc^2} + \sqrt{1 + \left(\frac{P}{mc}\right)^2} = \sqrt{1 + 2 \frac{\hbar \omega_B}{mc^2} + \left(\frac{P}{mc} + \frac{\hbar \omega}{mc^2} \cos \theta\right)^2},$$

где ω – частота фотона, \hbar – постоянная Планка, c – скорость света, θ – угол между направлением распространения фотона и внешним магнитным полем, P – импульс электрона. Как видно, фотон находится в резонансе с двумя группами электронов, различающимися импульсом. Данный факт приводит к возможности ухода излучения из линии в результате резонансного рассеяния фотона на «быстром» электроне, который движется со скоростью, превышающей характерную для данной среды тепловую скорость. Как показывают оценки, именно этот эффект определяет скорость ухода излучения из линии электронного циклотронного резонанса.

Сечение рассеяния находится путем усреднения по функции распределения электронов по скоростям $f(\beta)$ сечения σ_{β}^i , описывающего вероятность рассеяния

фотона моды i , частоты ω и угла распространения θ , на электроне, имеющем скорость β :

$$\sigma = \int_{-1}^1 f(\beta) \sigma_{\beta}^i d\beta.$$

Коэффициент поглощения равен [3]:

$$\kappa_i = 4\pi C(\omega, T) \frac{e^4 N}{m_e^2 c^3} \left(\frac{m_e c^2}{2\hbar \omega_B}\right)^{3/2} \frac{\sigma_i}{\gamma},$$

для $\left(\frac{\hbar \omega_B}{kT}\right) \geq 1$ $C(\omega, T) \approx 0.4$.

Здесь $\gamma = 2e^2 \omega_B^2 / 3m_e c^3$ – коэффициент радиационного затухания.

Численное решение системы уравнений переноса в окрестности электронного циклотронного резонанса получено методом Фотрие, схема которого описана, например, в [4]. Наибольший интерес представляет расчет отношения силы давления излучения к силе тяжести, результат которого представлен на рис. 1.

Благодаря тому, что в верхних слоях атмосферы коэффициенты поглощения нормальных волн существенно изменяются под действием поляризации вакуума, происходит увеличение силы давления излучения. При некоторых значениях температуры и магнитного поля атмосферы сила давления излучения превышает силу тяжести. При этом атмосфера становится неустойчивой, и в ней могут существовать плазменные течения. График кривой, ограничивающей эту область, представлен на рис. 2.

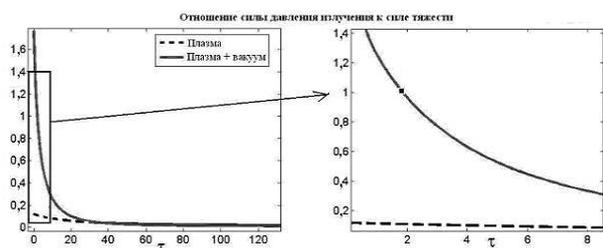


Рис. 1. Отношение силы давления излучения к силе тяжести в атмосфере. Штриховая линия – решение, полученное без учета поляризации вакуума, сплошная – с учетом. Температура атмосферы 1кэВ, магнитное поле $8.5 \cdot 10^{11}$ Гс.

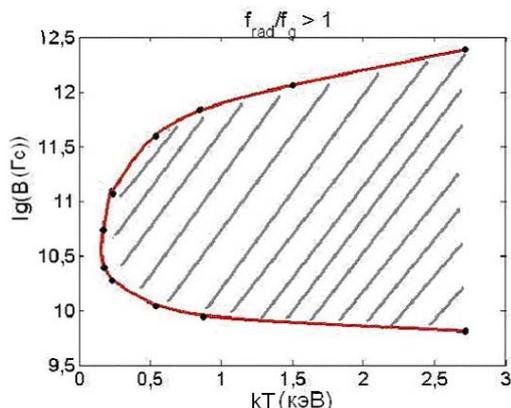


Рис. 2. Диаграмма $\lg(B(\text{Гс})) - \lg(kT(\text{эВ}))$, справа от кривой располагается область истечения атмосферной плазмы под действием силы давления излучения в линии электронного циклотронного резонанса для нейтронной звезды с массой 1.4 массы Солнца и радиусом 15 км.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Железняков В.В. Излучение в астрофизической плазме. Москва: Янус-К, 1997. С. 73–80.
2. Берестецкий В.Б., Лифшиц Е.М., Пигаевский Л.П. Квантовая электродинамика. Москва: Физматлит, 2001. 720 с.
3. Nagel W., Ventura J. // *Asyron. & Astrophys.* 1983. V. 118, P. 66.
4. Mihalas D., Mihalas B.W. *Foundations of radiation hydrodynamics.* NY: Oxford University Press, 1984.

Институт Прикладной Физики РАН, Нижний Новгород.