

УДК 533.9

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЕРХНИХ СЛОЕВ АТМОСФЕР НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

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

NUMERICAL SIMULATIONS OF THE DYNAMICS OF THE UPPER ATMOSPHERE OF NEUTRON STARS

M.A. Garasev, E.V. Derishev, Vl.V. Kocharovsky

В работе представлены результаты численного моделирования переноса излучения и динамики плазмы в горячих сильнозамагниченных атмосферах нейтронных звезд. При этом детально учтено резонансное циклотронное рассеяние фотонов, включая и вызванное им перераспределение по частотам. В вычислениях предполагается, что атмосфера состоит из полностью ионизированной водородной или гелиевой плазмы. Результаты численных расчетов показывают, что для получения детального спектра излучения атмосферы нейтронной звезды необходимо учитывать как перераспределение частот фотонов при рассеянии, так и смену поляризации. Используя полученные решения уравнений переноса излучения, мы нашли диапазон параметров, при которых возможно возникновение истечения плазмы под действием давления излучения в циклотронной линии. При помощи моделирования методом частиц в ячейках проанализированы различные неустойчивости плазмы, которые возникают в таких атмосферах под действием силы давления излучения. В заключение мы проанализируем возможные наблюдательные проявления таких истечений.

We present the results of numerical modeling of radiative transfer and plasma dynamics in the hot and magnetized atmospheres of neutron stars. In detail we investigate the role of resonant cyclotron scattering of photons including effects of partial frequency redistribution. We assume that the atmosphere consists of fully ionized hydrogen or helium. We demonstrate that it is essential to take into account both frequency redistribution of photons during scattering and mode-exchange between the two polarizations in order to obtain the detailed cyclotron line profile and atmospheric structure. Using obtained solutions of radiative transfer equations we specify the range of parameters for which an outflow of plasma is possible under radiation pressure in the cyclotron line. Using PIC-simulations we analyze different plasma instabilities which appear in such atmospheres under the influence of radiation pressure force. The application of our results for observable neutron stars are discussed.

Введение

Проблема изучения переноса излучения и динамики плазмы в верхних слоях атмосфер нейтронных звезд предполагает исследования целого ряда физических явлений. Ее наиболее важной особенностью является наличие вблизи таких звезд экстремально сильных магнитных полей, которые могут достигать 10^{14} Гс, при типичных значениях порядка 10^{11} – 10^{13} Гс. В таких полях линия электронного циклотронного резонанса лежит вблизи максимума теплового излучения поверхности нейтронной звезды. При этом становится очень важным учет перераспределения резонансного излучения по частотам, характер которого в линии электронного циклотронного резонанса существенно отличается от хорошо известных механизмов в атомных и ионных линиях [Garasyov et al., 2011a]. Кроме того, сильные магнитные поля вызывают поляризацию вакуума – один из эффектов квантовой электродинамики, которая приводит к резкому изменению поляризации излучения при распространении вблизи фотосферы. Такой эффект становится важным уже для небольших энергий электронов и фотонов в области кэВ и даже эВ [Garasyov et al., 2011b]. Все эти эффекты должны быть правильно учтены при детальном моделировании переноса излучения и динамики плазмы в атмосферах нейтронных звезд. В данной работе представлены некоторые результаты такого моделирования. Изложение построено следующим образом: в начале рассмотрены особенности перераспределения излучения по частоте при резонансном рассеянии в сильно замагниченной плазме. Затем, представлен краткий обзор влияния поляризации вакуума на распространение нормальных волн вблизи фотосферы. Указаны области параметров атмосфер нейтронных звезд, где указанные эффекты особенно важны. Пока-

зано, что для широкого параметра атмосфер нейтронных звезд возможно формирование плазменных течений под действием силы давления излучения в циклотронной линии.

Перераспределение по частотам при рассеянии в циклотронной линии

Движение электронов в сильном магнитном поле является, по существу, одномерным, из-за этого перераспределение фотонов по частоте, вызванное нерелятивистским эффектом Доплера сильно подавлено по сравнению с аналогичным процессом в атомных и ионных линиях, где движение электронов трехмерно [Ventura et al., 1985]. В случае циклотронной линии, основным механизмом перераспределения является релятивистский эффект Доплера. Он отвечает за существование двух резонансных значений скорости электронов (вместо одной при нерелятивистском рассмотрении), которые приводят к перераспределению фотонов по частоте, напоминающему полеты Леви [Garasyov et al., 2011b].

Мы детально проанализированы этот процесс в случае полубесконечной атмосферы. Статистически, перераспределение фотонов по частоте в ядре циклотронной линии приводит к значительному увеличению (на несколько порядков) в вероятности выхода фотонов рожденных в глубине атмосферы при высоких оптических глубинах τ (рис. 1). Согласно результатам моделирования методом Монте-Карло, выходящее излучение может быть собрано с очень большого диапазона оптических глубин, охватывающего несколько порядков по величине. Это делает образование циклотронных особенностей в спектре сильно нелокальным, таким образом, что они содержат в себе информацию о структуре и состоянии глубоких слоев атмосферы.

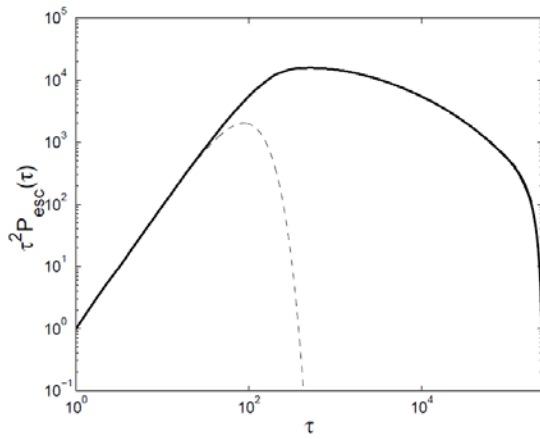


Рис. 1. Функция $\tau^2 P_{esc}$, где P_{esc} – вероятность выхода с оптической глубины τ для полубесконечной атмосферы с температурой 500 000 К. Сплошная линия – результат моделирования с учетом перераспределения по частотам из-за релятивистского эффекта Доплера, штриховая – без учета.

Поляризация вакуума

Другой важный эффект – это поляризация вакуума. Она отвечает за изменения дисперсионных свойств нормальных волн в намагниченной плазме. Пример влияния поляризации вакуума на показатели поглощения нормальных волн представлен на рис. 2.

Глубоко в атмосфере, где плотность плазмы большая, вклад дисперсии от электронов гораздо больше, чем вклад поляризации вакуума. В этом случае электрическое поле в необыкновенной нормальной волне вращается в том же направлении, что и электроны. В результате возникает сильный резонанс вблизи гирочастоты. В то же время поляризация обыкновенной волны почти ортогональна необыкновенной, вектор электрического поля в ней вращается в направлении противоположном направлению вращения электрона, соответственно циклотронный резонанс значительно подавлен.

С другой стороны, во внешних слоях атмосферы, где плотность плазмы достаточно низкая, поляризация нормальных волн определяется вакуумной компонентой. Обе нормальные волны при этом линейно поляризованы, и обе имеют сильный резонанс вблизи циклотронной частоты. Поляризация нормальных волн в переходной зоне между областью, где доминирует плазма и областью, где доминирует намагниченный вакуум устроена весьма нетривиально. В ней возможно существование точки, где поляризация обеих нормальных волн одинакова. Вблизи нее нарушается приближение геометрической оптики и для расчета переноса излучения необходимо учитывать эффекты линейного взаимодействия излучения [Железняков и др., 1983].

Влияние различных физических эффектов на перенос излучения

На рис. 3 на плоскости «магнитное поле – характеристическая температура» показана область параметров атмосферной плазмы, где различные физические эффекты определяют характер переноса излучения вблизи гирочастоты. В области I перераспределение излучения в ядре линии слабое. Это означает,

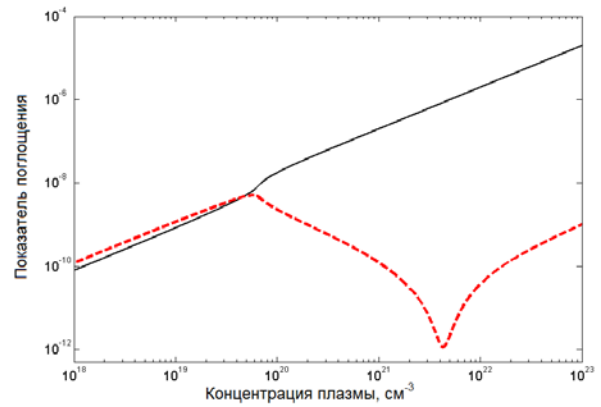


Рис. 2. Зависимость показателя поглощения обыкновенной волны (штриховая линия) и необыкновенной (сплошная) от плотности плазмы в зоне перехода от области, где поляризация нормальных волн определяется плазмой в область, где она определяется вакуумом.

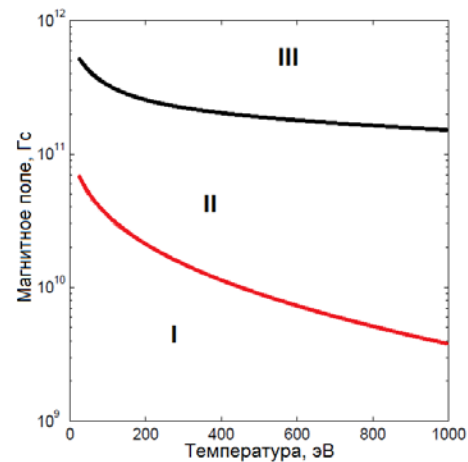


Рис. 3. Области влияния различных физических эффектов на перенос излучения вблизи циклотронных частот, рассчитанные для нейтронной звезды с массой $M=1.4$ массы Солнца и радиусом $R=12$ км.

что основная часть выходящего излучения выходит из атмосферы за счет обыкновенной диффузии без каких-либо существенных изменений в частоте. Перенос излучения в этом случае может рассматриваться в приближении квазикогерентного рассеяния. В области II, напротив, перераспределение излучения в ядре линии становится сильным и основная масса фотонов выходит из атмосферы за счет перераспределения в крылья линии. В таком случае следует использовать более сложные уравнения переноса, учитывающие перераспределение частоты при рассеянии. В области III эффекты поляризации вакуума становятся важными. В этом случае переход между областью, где поляризации нормальных волн определяется плазмой и областью где она определяется вакуумом располагается на оптической глубине большей единицы, заставляя использовать более сложные уравнения переноса излучения, которые могут иметь дело с неадиабатическим поведением нормальных волн. В этой области, благодаря тому, что в верхних слоях атмосферы коэффициент поглощения обыкновенной волны существенно увеличивается под действием поляризации вакуума, происхо-

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

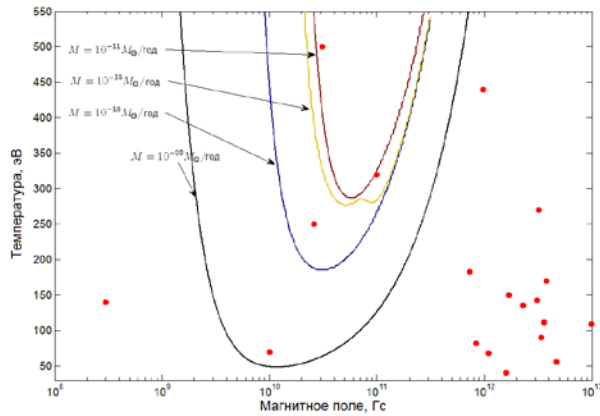


Рис. 4. Линии постоянного темпа потери массы из-за силы давления циклотронного излучения с массой $M=1.4$ массы Солнца и радиусом $R=12$ км. Точками показаны наблюдаемые магнитные поля и температуры фотосфер одиночных нейтронных звезд.

дит увеличение силы давления излучения в циклотронной линии. При этом атмосфера может становится неустойчивой, и в ней могут возникать плазменные истечения типа ветра. Область параметров, где такая неустойчивость возможна, представлена на рис. 4. Различные линии соответствуют оценкам темпы потери массы возможного в таких атмосферах. В зону сильного истечения попадает ряд наблюдаемых объектов, относимых к классу молодых нейтронных звезд в остатках сверхновых.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 14-02-00766).

Железняков В.В., Кочаровский В.В., Кочаровский Вл.В. Линейное взаимодействие электромагнитных волн в неоднородных слабоанизотропных средах // Успехи физ. наук. 1983. Т. 141. С. 257–310.

Garasyov M., Derishev E., Kocharovsky V., Kocharovsky Vl. Spectral redistribution of gyroresonant photons in magnetized atmospheres of isolated compact stars // Astron. Astrophys. 2011. V. 531, L14.

Garasyov M.A., Derishev E.V., Kocharovsky Vl.V. Statistics of the frequency redistribution for gyroresonance radiation in the atmospheres of compact stars // Astron. Lett. V. 37, iss. 10. P. 699–706.

Ventura J., Soffel M., Herold H., Ruder H. Radiative transfer in the accretion column of X-ray pulsars Effects from the hot SPOT // Astron. Astrophys. 1985. V. 144. P. 479–484.

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород, Россия