УДК: 537.867 DOI: 10.26907/rwp29.2025.569-572

ВЛИЯНИЕ РЕФРАКЦИОННЫХ ЭФФЕКТОВ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ЗВЕЗДНОЙ КОРОНЫ НА ТРАНСПОРТ РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ УДАЛЕННЫХ КОСМИЧЕСКИХ ИСТОЧНИКОВ

Д.С. Лукьянцев, Н.Т. Афанасьев, Е.И. Калашникова

Иркутский Государственный Университет, 664003, г. Иркутск, бул. Гагарина, 20
E-mail: cmeofs1997@mail.ru, spacemaklay@gmail.com, kkalashnikova27@gmail.com

Аннотация. Приведены результаты математического моделирования рефракционных характеристик радиоизлучения удаленных космических источников при распространении сквозь возмущенную звездную корону. Основу метода расчета составляет численное решение лучевых дифференциальных уравнений в форме Лагранжа-Эйлера в полярной системе координат. Диэлектрическая проницаемость короны представляется в виде суммы вкладов фоновой составляющей и плазменных неоднородностей. В качестве неоднородностей рассмотрен двухкомпонентный корональный выброс звездной массы (КВМ). Выявлены особенности транспорта излучения в метровом и декаметровом диапазонах. Показано, что для некоторых частот излучения возможно формирование волноводного механизма распространения в окрестности звездного КВМ.

Ключевые слова: звездная корона, плазменные неоднородности, радиоизлучение, удаленные космические источники, геометрическая оптика, математическое моделирование.

IMPACT OF REFRACTION EFFECTS OF INHOMOGENEITES OF STAR CORONA ON TRANSPORT OF RADIO RADIATION OF REMOTE SPACE SOURCES

D.S. Lukyantsev, N.T. Afanasiev, E.I. Kalashnikova

Abstract. Results of mathematical modeling of refraction characteristics of radio radiation of remote space sources at propagation through perturbed star corona are presented. Numerical solution is performed on based of light differential equations in form of Lagrange-Euler in polar coordinate system. Dielectric constant of corona is represented as sum of background component and plasma inhomogeneities. Two-component coronal ejection of star mass (CME) is considered as inhomogeneity. Features of transport of radiation in meter and decimeter ranges are exposed. Shown that for some frequencies of radiation waveguide mechanism of propagation in in the surroundings of star CME can forming.

Keywords: star corona, plasma inhomogeneities, radio radiation, remote space sources, geometrical optics, mathematical modeling.

Введение

Хорошо известно [1–4], что учет рефракции радиоизлучения удаленных космических источников имеет определяющее значение при интерпретации результатов астрофизических экспериментов. Измерения рефракционных характеристик принятого излучения позволяют исследовать механизмы генерации и статистику излучающих источников. Для корректной интерпретации наблюдений структуры принятого излучения необходимо принимать во внимание воздействие окружающей хаотической плазмы на процесс распространения. Также на пути переноса излучения могут встречаться звезды, окруженные регулярной плазменной оболочкой (звездной короной), превышающей по концентрации фоновую среду. В результате прохождения сквозь такую оболочку излучение испытывает сильную регулярную рефракцию, что может привести к искажению информации об источнике излучения. Дополнительные трудности при интерпретации данных наблюдений космических источников возникают при распространении излучения через возмущенную звездную корону, когда возможны корональные выбросы массы. В частности, это касается астрофизических экспериментов при изучении квазаров.

Цель работы заключается в исследовании методом математического моделирования особенностей рефракции радиоизлучения удаленных космических источников через звездную корону в присутствии локализованных плазменных возмущений.

Аппарат численно-математического моделирования

Для численных расчетов рефракционных характеристик радиоизлучения при распространении через звездную корону в работе использовалась система лучевых дифференциальных уравнений в форме Лагранжа-Эйлера в полярной системе координат [5, 6]:

$$\frac{dR}{d\varphi} = R\,\mathrm{ctg}\beta, \quad \frac{d\beta}{d\varphi} = \frac{1}{2\varepsilon}\left(\frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi}\mathrm{ctg}\beta - R\frac{\partial\varepsilon}{\partial R}\right) - 1, \tag{1}$$

где R, φ – соответственно радиальная и угловая координаты луча; β – текущее значение угла рефракции; ε – диэлектрическая проницаемость корональной плазмы. В возмущенных условиях диэлектрическая проницаемость представлялась в виде суммы:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_1, \tag{2}$$

где ε_0 характеризует фоновую звездную корону; ε_1 описывает плазменные возмущения. В качестве плазменного возмущения рассматривается корональный выброс звездной массы (КВМ). Диэлектрическая проницаемость фоновой короны задавалась зависимостью [5]:

$$\varepsilon_0 = 1 - \left(\frac{f_{pl}}{f}\right)^2\left(\frac{R_m}{R}\right)^2, \tag{3}$$

где f – частота радиоизлучения; f_{pl} – значение плазменной частоты на уровне R_m. Для описания простейших структурных свойств двухкомпонентного КВМ использовалась функция:

$$\varepsilon_1 = \sum_{i=1}^{2}\mu_i \exp\left[-a_{Ri}(R - R_{Li})^2 - a_{\varphi i}(\varphi - \varphi_{Li})^2\right], \tag{4}$$

где $\mu_i, R_{Li}, \varphi_{Li}, a_{Ri}, a_{\varphi i}$ – соответственно интенсивность, координаты центра локализации и пространственные масштабы составных частей КВМ; параметры с индексом «1» описывают область обедненной электронной концентрации (*далее* – полость КВМ), а параметры с индексом «2» – область обогащенной электронной концентрации (*далее* – фронт КВМ).

Результаты моделирования и их обсуждение

Расчет рефракционных характеристик радиоизлучения при транспорте через возмущенную звездную корону проводился на основе системы (1) при следующих начальных условиях: $R(\varphi_n = 0) = R_n = 100\,cul$ (cul – условная единица длины); $\beta(\varphi_n = 0) = \beta_n$. Значения угла β_n варьировались в диапазоне $[0.063; 0.02]$. Радиус звезды $R_s = 1\,cul$. Параметры звездного КВМ составляли: $\mu_1 = \mu_1 = 1.5$, $R_{L1} = 6R_s$, $R_{L2} = 6.2R_s$, $\varphi_{L1} = \varphi_{L2} = 1.2$, $a_{R1} = 44.4R_s^{-2}$, $a_{R2} = 400R_s^{-2}$, $a_{\varphi 1} = a_{\varphi 2} = 2.6$. Расчет проводился до расстояния $R_k = 100\,cul$. Рабочие частоты радиоизлучения задавались в диапазоне $f \in [20; 75]\,МГц$, а плазменная частота на уровне $R_m = 5R_s$ составляла $f_{pl} = 20\,МГц$. Отметим, что значения интенсивностей для частей звездного КВМ рассчитывались для частоты $f = 25\,МГц$. Геометрия задачи приведена на рис. 1, а полученные результаты моделирования представлены на рис. 2, 3.

Как следует из рис. 2, присутствие КВМ на пути распространения радиоизлучения приводит к изменениям его рефракционных характеристик. В частности, на дистанционно-угловой характеристике (ДУХ) проявляется граница между способами распространения радиоизлучения с внешней и обратной сторонами неоднородности. Отражение радиоизлучения от обратной стороны звездного КВМ существенно влияет на дистанцию распространения. В этих условиях возможно заметное увеличение дистанции, что приведет к регистрации низкочастотного радиоизлучения при расположении источника излучения глубоко в залимбовой области. Также на рис. 2 следует отметить две кривых, соответствующих частотам радиоизлучения 25 и 30 *МГц*. В случае кривой 25 *МГц* наблюдается двухэтапное изменение дистанции распространения. Такой эффект появления поддиапазона углов между минимальным и максимальным изменениями дистанции распространения связан с прохождением луча вблизи границы КВМ. В случае частоты излучения 30 *МГц* можно заметить формирование «полосового» эффекта, связанного с квазипостоянством значения дистанции. Такое поведение ДУХ возникает вследствие конечных раз-

меров коронального возмущения. Для анализа особенности формирования ДУХ на частоте 30 *МГц* были построены траекторная картина и зависимости текущих углов рефракции излучения для различных начальных углов падения β_n (см. рис. 3).

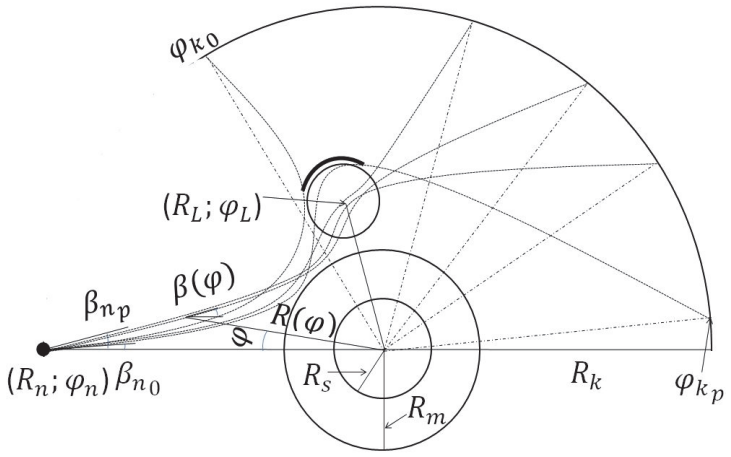

Рис. 1. Геометрия задачи. (R_n, φ_n) – координаты источника радиоизлучения относительно центра звезды; R_k – конечная радиальная координата распространения излучения; $[\varphi_{k0}, \varphi_{kp}]$ – угловые координаты луча, достигшего R_k; R_s – радиус звезды; $R_m = 5R_s$; (R_L, φ_L) – координаты локализации плазменного возмущения, где полужирная дуга – фронт КВМ, а а ниже расположенная окружность – полость КВМ; $[\beta_{n0}, \beta_{np}]$ – диапазон начальных углов падения

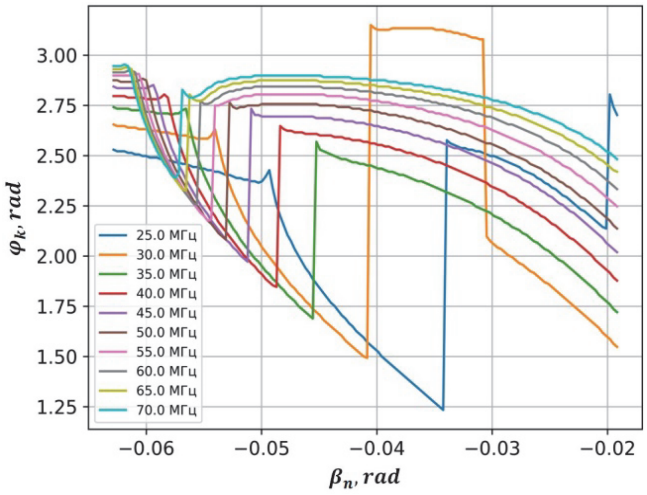

Рис. 2. Дистанционно-угловая характеристика радиоизлучения при распространении в звездной короне в присутствии КВМ

Результаты моделирования показали (рис. 3), что отражение радиоизлучения от фронта КВМ проявляется в виде резкого изменении траектории (рис. 3*а*) и значительных вариациях угла рефракции (рис. 3*б*). Значительное увеличение дистанции распространения возникает при $\beta_n = -0.0405$. Отслеживая изменения угла рефракции, можно отметить несколько этапов. Вначале происходит взаимодействие излучения с фронтом КВМ с последующим его проникновением в полость КВМ и выходом за пределы этой полости ($\varphi \in [0.7; 0.9]$). После точки поворота ($\varphi \approx 1.2$) луч вновь взаимодействует с полостью ($\varphi \in [1.4; 1.55]$), отражается от фронта КВМ ($\varphi \approx 1.6$) и окончательно выходит за пределы полости ($\varphi \approx 1.65$).Такое поведение траектории луча характеризует волноводный механизм распространения. В случае кривой для $\beta_n = -0.0305$ заметное уменьшение дистанции связано с эффектом прохождения луча сквозь фронт КВМ.

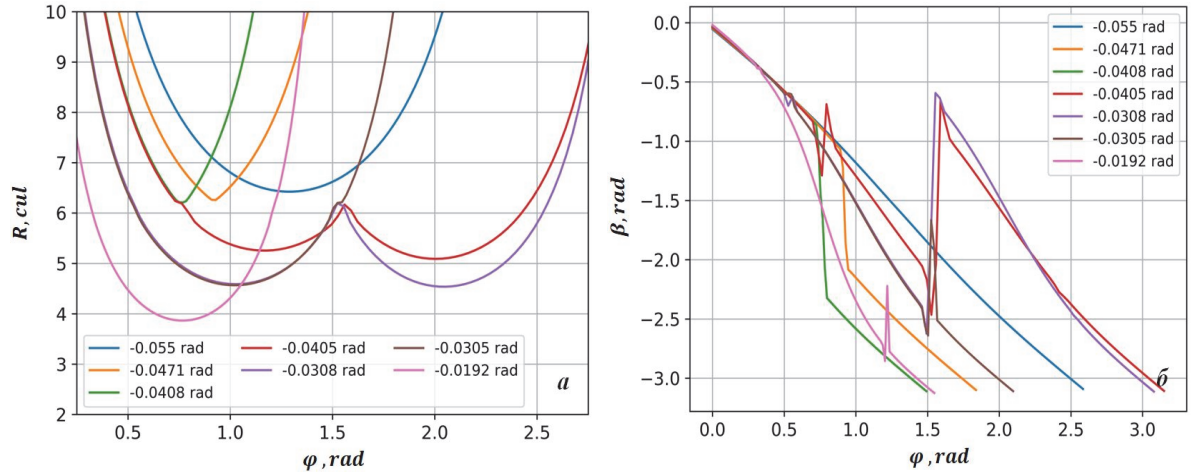

Рис. 3. Траекторная картина (***а***) и углы рефракции (***б***) радиоизлучения на частоте $f = 30\ МГц$ при различных углах падения на возмущенную звездную корону.

Заключение

На основе лучевых дифференциальных уравнений в форме Лагранжа-Эйлера выполнено математическое моделирование рефракционных характеристик радиоизлучения при распространении через возмущенную звездную корону. Диэлектрическая проницаемость короны представлена в виде суммы вкладов фоновой среды и локализованных плазменных неоднородностей типа КВМ. Корональные неоднородности рассматривались в виде двухкомпонентной модели, описывающей простейшие структурные свойства КВМ. Показано, что в возмущенной звездной короне возможна существенная регулярная рефракция радиоизлучения. Выявлены условия формирования в окрестностях КВМ волноводного механизма распространения радиоизлучения, позволяющие регистрировать излучение при расположении источника глубоко в залимбовой области. В определенных случаях возможно прохождение радиоизлучения через фронт КВМ, что приводит к существенному сокращению дистанции распространения. Выявленные эффекты важно учитывать при интерпретации данных современных наземных и орбитальных обсерваторий для решения задач астрофизики.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проекты FZZE-2023-0004, FZZE-2024-0005) при финансовой поддержке научно-исследовательского института прикладной физики (тема 091–24–111).

Список литературы

1. Астрономия: век XXI / Ред.-сост. В.Г. Сурдин. – 3-е изд., испр. и доп. – Фрязино: Век 2, 2019. – 608 с.
2. Многоканальная астрономия / Ред.-сост. А.М. Черепащук. – Фрязино: Век 2, 2019. – 528 с.
3. Сурдин В.Г. Звезды / ред.-сост. В.Г. Сурдин. – Изд. 4-е, испр. и доп. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2023. – 436 с.
4. Korhonen H. and et al. Hunting for stellar coronal mass ejections // International Astronomical Union. – 2017. – V. 12. – P. 198–203.
5. Лукьянцев Д.С., Афанасьев Н.Т., Танаев А.Б., Чудаев С.О. Численно-аналитическое моделирование рефракции низкочастотных солнечных радиовсплесков в возмущенной короне // Математическая физика и компьютерное моделирование. – 2023. – № 4. – С. 43–54.
6. Kravtsov Yu. A., Orlov Yu. I. Geometrical Optics of Inhomogeneous Medium. – Berlin: Springer-Verlag, 1990. – P. 312.