

ГРАВИТАЦИОННОЕ ЛИНЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН В ХАОТИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ

Д.С. Лукьянцев

Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия
cmeofs1997@mail.ru

GRAVITATIONAL LENSING OF ELECTROMAGNETIC WAVES IN CHAOTIC SPACE PLASMA

D.S. Lukyantsev

Irkutsk State University, Irkutsk, Russia
cmeofs1997@mail.ru

Аннотация. На основе приближения геометрической оптики и метода возмущений исследован эффект линзирования электромагнитного излучения удаленного источника под воздействием гравитационного поля и случайных неоднородностей космической плазмы. Проведено математическое моделирование траекторных характеристик излучения в широком диапазоне рабочих частот для различных конфигураций гравитационного поля и параметров плазменных неоднородностей. По результатам моделирования сделана оценка условий статистического замыывания гравитационного линзирования вследствие рефракционного рассеяния излучения на неоднородностях космической плазмы.

Ключевые слова: космическая плазма, гравитационное поле, электромагнитные волны, моделирование, лучевая оптика.

Abstract. Using the geometrical optics approximation and the perturbation method, we studied the lensing effect of electromagnetic radiation of a remote space source affected by the gravity field and random inhomogeneities of space plasma. We performed mathematical modeling of trajectory characteristics of radiation over a wide range of operating frequencies for various configurations of the gravity field and parameters of plasma inhomogeneities. The results of mathematical modeling were used to assess conditions of statistical blurring of the gravity lensing due to refraction scattering of radiation on inhomogeneities of space plasma.

Keywords: space plasma, gravity field, electromagnetic waves, modeling, beam optics.

ВВЕДЕНИЕ

Как известно [Вескер, Келлерман, 1976], при интерпретации данных измерений электромагнитных сигналов удаленных космических источников необходимо учитывать влияние неоднородностей среды, через которую прошли эти сигналы.

На межзвездных расстояниях электромагнитные сигналы, проходящие вблизи массивных космических объектов, подвержены влиянию полей тяготения этих объектов. Из теории относительности следует [Волков и др., 1970; Plebanski, 1960], что распространение электромагнитных волн в поле тяготения можно рассматривать как задачу о волнах в евклидовом пространстве, если учесть что гравитационное поле изменяет определенным образом показатель преломления вакуума.

При этом случайные неоднородности космической плазмы маскируют эффекты поля тяготения и накладывают ограничения на длину электромагнитной волны для наблюдения гравитационной фокусировки. Поэтому линзовый эффект гравитационного поля при распространении волн в случайно-неоднородной среде реализуется только в определенном диапазоне электромагнитной шкалы колебаний.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ В ХАОТИЧЕСКОЙ КОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТОВ ГРАВИТАЦИИ

Для анализа влияния плазменных и гравитационных неоднородностей на траекторные характеристики сигналов удаленных космических источников использовалась система лучевых уравнений

$$\begin{aligned} \frac{dR}{d\varphi} &= R \cot \beta, \\ \frac{d\beta}{d\varphi} &= (1 + \sin^2 \beta \tan^2 \alpha) \left(\frac{1}{\tilde{n}} \frac{\partial \tilde{n}}{\partial \varphi} \cot \beta - \frac{R}{\tilde{n}} \frac{\partial \tilde{n}}{\partial R} - 1 \right), \\ \frac{d\delta}{d\varphi} &= \tan \alpha, \\ \frac{d\alpha}{d\varphi} &= (1 + \cot^2 \beta \cos^2 \alpha) \left(\frac{1}{\tilde{n}} \frac{\partial \tilde{n}}{\partial \delta} - \frac{1}{\tilde{n}} \frac{\partial \tilde{n}}{\partial \varphi} \tan \alpha \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где R, δ, φ — сферические координаты луча; α, β — углы рефракции луча соответственно в вертикальной и горизонтальной плоскостях; \tilde{n} — эффективный показатель преломления случайно-неоднородной среды в присутствии гравитационного поля

$$\tilde{n} = n_0 + \tilde{n}_1, \quad (2)$$

где n_0 характеризует показатель преломления вакуума в условиях воздействия гравитационного поля, \tilde{n}_1 описывает случайные неоднородности космической плазмы.

В присутствии нескольких гравитационных объектов для n_0 использовалась модель

$$\begin{aligned} n_0 &= 1 + \frac{R_g}{R} + \sum_{i=1}^N A_i \exp[-b1_i (\varphi - \varphi0_i)^2 - \\ &- b2_i (\delta - \delta0_i)^2 - b3_i (R - R0_i)^2], \end{aligned} \quad (3)$$

где R_g — гравитационный радиус объекта; N — количество дополнительных объектов; $A_i, \varphi0_i, \delta0_i, R0_i, b1_i, b2_i, b3_i$ — соответственно интенсивность, координаты и масштабы локализации неоднородности показателя преломления, возникающей вследствие воздействия i -го гравитационного объекта.

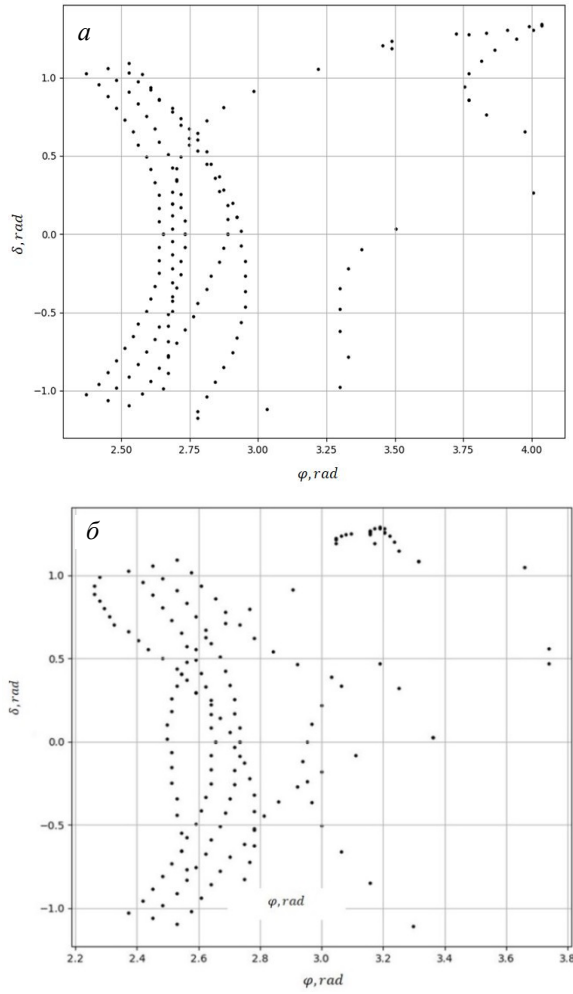


Рис. 1. Гравитационное линзирование в картинной плоскости наблюдателя при наличии двух (а) и трех (б) гравитационных объектов

Для оценки совместного влияния гравитационного поля и случайных неоднородностей плазмы на распространение электромагнитных волн система (1) была решена методом возмущений при $\tilde{n} \ll 1$. В результате была получена порождающая система уравнений (система (1) при $\tilde{n} = 0$), описывающая траектории лучей в гравитационном поле объектов без учета влияния случайных неоднородностей плазмы. Порождающая система была решена численно при различных параметрах показателя преломления (3). Результаты моделирования плотности точек прихода лучей на фиксированное расстояние $R=R_k$ отображались в картинной плоскости наблюдателя в координатах (δ, φ) . Параметры объектов $R_g=1$ cul, $A_1=0.5$, $R_{01}=10$ cul, $\delta_{01}=0.5$ рад, $\varphi_{01}=0.4$ рад, $A_2=0.5$, $R_{02}=10$ cul, $\delta_{02}=0.3$ рад, $\varphi_{02}=0.5$ рад, масштабы: $b_{11}=1.5$, $b_{21}=1.5$, $b_{31}=1.5$ 1/cul², $b_{12}=1.5$, $b_{22}=1.5$, $b_{32}=1.5$ 1/cul². Здесь cul — условная единица длины. Начальные условия: $R(\varphi=0)=50$ cul, $\delta(\varphi=0)=0$. Угол α находился в диапазоне $[-0.14, 0.14]$ рад с шагом 0.006 рад, а угол β принимал значения в диапазоне $[0.21, 0.3]$ рад с шагом 0.004 рад. В картинной плоскости на рис. 1 показаны рассчитанные точки прихода лучей в указанных секторах углов α, β для сложных гравитационных полей различной конфигурации. Отмечены также непосредственно конечные углы φ , при которых луч достигает расстояния

$R_k=50$ cul. Отсутствие заполнения по φ от 0 до 2 рад связано с невозможностью прохождения лучей сквозь гравитационные объекты. Нетрудно заметить, что в гравитационном поле объектов траекторная картина существенно искажается и возможно явление гравитационной фокусировки. Чем ближе электромагнитная волна распространяется к гравитационному объекту, тем сильнее эффект рефракции. Также этот факт отчетливо отмечается при сравнении рис. 1, а, б.

Для оценки влияния случайных неоднородностей космической плазмы на гравитационное линзирование на основе метода возмущений была получена система уравнений для расчета флуктуаций траекторных характеристик электромагнитных волн. С помощью этой системы были построены вторые статистические моменты лучевых траекторий. В частности, для расчета дисперсии отклонений δ в случае гауссовой корреляционной функции неоднородностей плазмы имеем систему уравнений

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_\delta^2}{d\varphi} &= \frac{\mu}{4} \sqrt{\frac{\pi}{Q}} \left(\frac{DP^2}{Q} + 16 \left(D - \frac{K}{Q} \right) (\varphi J_1 - J_2) \right), \\ \frac{dJ_1}{d\varphi} &= P^2, \\ \frac{dJ_2}{d\varphi} &= \varphi P^2, \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} P &= \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha_0} + \cot^2 \beta_0 \right), \\ D &= \left(\left(\frac{\tan \alpha_0}{a_\varphi} \right)^2 + \frac{1}{a_\delta^2} \right), K = \left(\frac{1}{a_\varphi^2} - \frac{1}{a_\delta^2} \right) \tan^2 \alpha_0, \\ Q &= \left(\frac{1}{a_\varphi^2} + \left(\frac{\tan \alpha_0}{a_\delta} \right)^2 + \left(\frac{R \cot \beta_0}{a_R} \right)^2 \right), \\ \mu, \alpha_\varphi, \alpha_\delta, \alpha_R & \end{aligned}$$

интенсивность и масштабы случайных плазменных неоднородностей, характеристики $\alpha_0, \beta_0, R_0, \delta_0$ определяются путем численного интегрирования системы (1) при $\tilde{n}_i = 0$.

Решая систему уравнений (4) совместно с порождающей системой (система (1) при $\tilde{n}_i = 0$), можно оценить влияние случайных неоднородностей плазмы на гравитационное линзирование. Результаты расчетов флуктуаций плотности точек прихода лучей в картинной плоскости наблюдателя для различных диапазонов длин волн приведены на рис. 2. При тех же параметрах модели (3), что и на рис. 1, б, здесь представлены рассчитанные средние точки прихода лучей в указанных секторах углов α, β в координатах (δ, φ) . Вертикальные линии показывают среднеквадратичные отклонения рассчитанных точек прихода в картинной плоскости, вызванные плазменными случайными неоднородностями. Параметры плазменных неоднородностей $\mu_a=10^{-7}$ (для высоких частот), $\mu_b=10^{-6}$ (для низких частот), $\alpha_\varphi=10^{-3}$, $\alpha_\delta=10^{-3}$, $\alpha_R=10^{-3}$ cul.

Можно заметить, что в картинной плоскости наблюдателя возникает статистическое замыывание эффекта

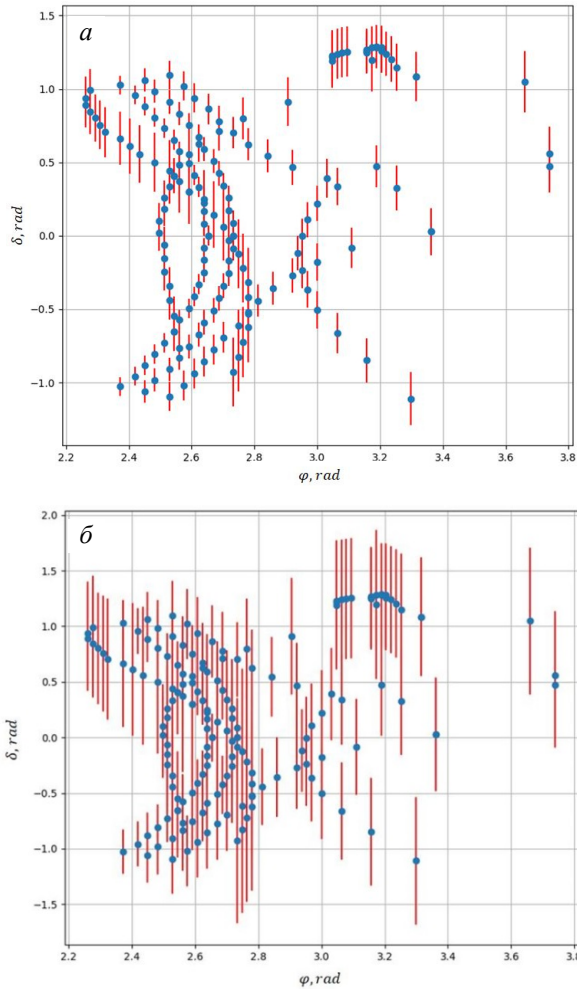


Рис. 2. Статистическое замывание гравитационного линзирования в картинной плоскости наблюдателя для высокочастотного (а) и низкочастотного (б) диапазонов длин волн

гравитационной фокусировки. Также отметим, что на низких частотах флуктуации боковых отклонений лучей существенно больше, чем для высоких частот.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнено математическое моделирование траекторных характеристик электромагнитного излучения в сложном гравитационном поле, порожденном несколькими космическими объектами. Показаны условия возникновения эффекта гравитационного линзирования лучевых траекторий в картинной плоскости наблюдателя. Сделаны расчеты среднеквадратичных значений боковых отклонений лучей под воздействием случайных неоднородностей космической плазмы. В широком диапазоне рабочих частот излучения приведены примеры статистического замывания эффекта гравитационного линзирования вследствие рассеяния лучей на неоднородностях космической плазмы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Волков А.М., Измestьев А.А., Скроцкий Г.В. *ЖЭТФ*. 1970. Т. 59, № 10. С. 1254.
Галактическая и внегалактическая радиоастрономия. Ред. Верскер Г.Л., Келлерман К.И. М.: Мир, 1976. 617 с.
 Plebanski I. *Electromagnetic waves in gravitational fields*. *Phys. Rev.* 1960. Vol. 118, no. 5. P. 1396.