

АСТРОНОМИЯ

УДК 523.24:550.384

ЗАВИСИМОСТЬ ЧАСТОТЫ ИНВЕРСИЙ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ОТ ПОЛОЖЕНИЯ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ В ГАЛАКТИКЕ

К. В. Семенков
(ГАИШ)

Исследовался вопрос о выявлении связи между положением Солнца в Галактике и геодинамическими явлениями. Решена задача о движении Солнца в Галактике без учета влияния спиральных рукавов и рассчитана орбита Солнца для конкретного вида потенциала Галактики. Проведен фурье-анализ зависимости частоты инверсий магнитного поля Земли от времени. Показано, что во время выхода Солнца из рукава частота инверсий магнитного поля Земли увеличивалась; геомагнитная активность возрастала, когда Солнце либо пересекало плоскость Галактики, либо находилось на минимальном удалении от ее центра.

Введение

Данная статья посвящена решению весьма интересной задачи — временной зависимости глобальных геодинамических явлений от положения Земли в Галактике. В частности, исследователи геологического и геомагнитного прошлого Земли заметили, что в геодинамической активности Земли проявляется некоторая периодичность, соответствующая движению Солнечной системы относительно центра и плоскости Галактики.

1. Из исследований остаточной намагниченности пород известно, что магнитное поле Земли неоднократно меняло свою полярность. Обращения происходят нерегулярно, но в среднем интервал между ними составляет 200 тыс. лет, а само обращение длится 10—25 тыс. лет. Вообще же интервалы между инверсиями могут колебаться в пределах от 30 тыс. до 30 млн лет (например, 235—290 млн лет назад поле на протяжении почти 60 млн лет имело обратную полярность). Во время инверсии напряженность поля уменьшается в 5—7 раз [1, 2].

В общей картине инверсий выделяются некоторые закономерности, которые можно увидеть из графика нормированного фурье-спектра отношения количества интервалов с прямой полярностью к количеству интервалов с обратной полярностью [3]. Отношение вычислялось по интервалам длительностью в 15 млн лет. В работе [3] выделены две основные гармоники с периодом в 260—340 и 70—90 млн лет.

2. Сходные периоды прослеживаются и в геологической истории Земли. Выделяют период в 215 млн лет, состоящий из четырех циклов продолжительностью в 30, 50, 85 и 50 млн лет. В ходе первого цикла происходит глобальное похолодание, общее поднятие материков, увеличивается сейсмическая и вулканическая активность. В третьем цикле — глобальное потепление, столкновения литосферных плит, колебательные движения на устойчивых блоках земной коры. Второй и четвертый циклы промежуточные [4].

Авторы указанных выше работ не нашли внутренних, земных источников такой периодичности, но предположили, что она связана с движением Солнца в Галактике, так как период обращения Солнца вокруг центра Галактики 240 млн лет, а период колебаний в направлении, перпендикулярном диску, 80 млн лет.

Целью работы является проверка и уточнение отмеченных закономерностей в свете современных данных о строении Галактики.

Положение Солнца в Галактике

Наша Галактика относится к спиральным галактикам. Ее масса $M_G = 4 \cdot 10^{44}$ г. В Галактике обычно выделяют три компонента: диск, балдж и гало. Балдж — центральное утолщение размером 1 кпк. Диск — самая массивная компонента, его масса $M_D \approx 0,9 M_G$. Толщина диска в окрестности Солнца 0,5 кпк, радиус диска 20 кпк. В диске существуют два спиральных рукава, которые вращаются как твердое тело с угловой скоростью $\Omega_p = 25$ км/с-кпк. Диффузное вещество (пыль, газ) концентрируется главным образом в рукавах. Диск быстро вращается вокруг центра Галактики. Солнце находится в диске Галактики на расстоянии 8,2 кпк от ее центра и отстоит от плоскости Галактики на 25 пк. Круговая скорость центроида окосолнечных звезд $v_0 = 220$ км/с. Скорость Солнца относительно центроида $\mathbf{v} = \{v_x, v_y, v_z\} = \{10, 10, 6\}$ км/с [5].

Чтобы прояснить вопрос о влиянии Галактики на земные процессы, надо рассчитать орбиту Солнца в Галактике. Будем делать это в несколько этапов. Сначала рассчитаем орбиту в регулярном поле, т. е. без учета влияния рукавов и различных неоднородностей. Потом учтем влияние рукавов, а далее попытаемся учесть влияние близких массивных объектов, возможные колебания ядра Галактики и другие эффекты.

Движение Солнца в регулярном поле Галактики

Задачу будем решать в цилиндрической системе координат (r, θ, z) . Предположим, что потенциал Галактики не зависит от θ и симметричен относительно плоскости Галактики: $U = U(r, z)$.

Уравнения Лагранжа запишутся тогда следующим образом:

$$\ddot{r} - r\dot{\theta}^2 = \frac{\partial U}{\partial r},$$

$$\frac{d}{dt} (r^2 \dot{\theta}) = \frac{\partial U}{\partial \theta} = 0, \quad (1)$$

$$\ddot{z} = \frac{\partial U}{\partial z}.$$

Будем искать решение системы в виде почти круговой орбиты в линейном приближении. Мы можем это сделать, так как $|\mathbf{v}|/v_0 \ll 1$.

В качестве нулевого приближения возьмем круговую орбиту:

$$\begin{aligned} r &= r_0, \\ \theta &= \omega(t - t_0), \\ z &\equiv 0, \end{aligned} \quad (2)$$

где ω — угловая скорость движения Солнца по круговой орбите, что соответствует периоду обращения $T = 230 - 240$ млн лет. Подставляя (2) в (1), получим

$$-r_0\omega^2 = \left(\frac{\partial U}{\partial r}\right)_0,$$

$$r_0^2\omega = L,$$

$$\left(\frac{\partial U}{\partial z}\right)_0 \equiv 0,$$

(3)

где производные вычисляются в точке $(r_0, \theta, 0)$, $L = \text{const}$ — проекция момента импульса Солнца на ось Z , $(\partial U/\partial z)_0 \equiv 0$ в силу симметрии потенциала. Дадим координатам и угловой скорости малые возмущения: $r = r_0 + \tilde{r}$; $\theta = \omega t + \tilde{\theta}$; $z = \tilde{z}$. Разложим производные потенциала в ряд Тейлора в окрестности круговой орбиты с линейной точностью относительно $\tilde{r}, \tilde{\theta}, \tilde{z}$. Тогда система (1) преобразуется к виду

$$\ddot{\tilde{r}} - \omega^2 \tilde{r} - \omega^2 \tilde{r} - 2r_0\omega \dot{\tilde{\theta}} = \left(\frac{\partial U}{\partial r}\right)_0 + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}\right)_0 \tilde{r},$$

$$r_0^2 \dot{\omega} + 2r_0\omega \dot{\tilde{r}} + r_0^2 \dot{\tilde{\omega}} = L,$$

$$\ddot{\tilde{z}} = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_0 \tilde{z}.$$

Учитывая (3), получим

$$\ddot{\tilde{r}} - \omega^2 \tilde{r} - \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}\right)_0 \tilde{r} - 2r_0\omega \dot{\tilde{\theta}} = 0,$$

$$2r_0\omega \dot{\tilde{r}} + r_0^2 \dot{\tilde{\omega}} = 0,$$

$$\ddot{\tilde{z}} = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_0 \tilde{z}.$$

Подставляя второе уравнение системы в первое, получим окончательную систему для возмущений $\tilde{r}, \tilde{\omega}, \tilde{z}$:

$$\ddot{\tilde{r}} + \left(3\omega^2 - \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}\right)_0\right) \tilde{r} = 0,$$

$$\dot{\tilde{\omega}} = -2 \frac{\tilde{r}}{r_0} \omega,$$

$$\ddot{\tilde{z}} = \left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_0 \tilde{z},$$

где, согласно (3), $\omega^2 = -\frac{1}{r_0} \left(\frac{\partial U}{\partial r}\right)_0$.

Решение этой системы можно записать в следующем виде:

$$r = r_0 + a \cos(\kappa_1 t + \Phi_1),$$

$$\theta = \omega t - \frac{2\omega a}{r_0 \kappa_1} \sin(\kappa_1 t + \Phi_1),$$

(4)

$$z = b \cos(\kappa_3 t + \Phi_3),$$

где $\kappa_1^2 = -\left[\frac{3}{r_0} \left(\frac{\partial U}{\partial r}\right)_0 + \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2}\right)_0\right]$, $\kappa_3^2 = -\left(\frac{\partial^2 U}{\partial z^2}\right)_0$. Величины a, b, Φ_1, Φ_3 определяются из начальных условий.

Движение относительно круговой орбиты

Согласно (4), вдоль оси Z происходят гармонические колебания. Для определения проекции возмущенной орбиты на плоскость Галактики перейдем в систему координат с центром на круговой орбите, вращающуюся вокруг центра Галактики с угловой скоростью ω .

В этой системе

$$r = a \cos(\kappa_1 t + \varphi_1),$$

$$\tilde{\theta} = -\frac{2\omega a}{r_0 \kappa_1} \sin(\kappa_1 t + \varphi_1), \quad (5)$$

где $\tilde{\theta} = \theta - \omega t$. Отсюда следует $\frac{\tilde{r}^2}{a^2} + \frac{\tilde{\theta}^2}{(2a\omega/r_0\kappa_1)^2} = 1$. Значит, в плоскости Галактики возмущенное движение происходит по эллипсу. Для этого эллипса исторически принято название эпицикл.

Численные результаты

Для расчета была взята модель Галактики из работы [6]. Потенциал записывается в виде $U(r, z) = \Phi_0 \varphi(\xi)$, где Φ_0 — потенциал в центре Галактики;

$$\varphi(\xi) = \frac{\alpha}{\beta + \omega(\xi)} \quad (6)$$

— безразмерный потенциал; $\xi(\rho, \zeta, \gamma, \varepsilon)$ — уравнение эквипотенциали; $\alpha, \beta, \gamma, \varepsilon$ — параметры конкретной Галактики; $\omega(\xi) = \sqrt{1 + \kappa\xi^2}$; $\rho = r/R_0$; $\zeta = z/R_0$; R_0 — масштабный параметр. Уравнение эквипотенциали можно записать в виде

$$\xi^2 = (\rho - \varepsilon)^2 + (1 - \gamma)\rho^2 - 1, \quad (7)$$

где $\rho^2 = \gamma(1 - \varepsilon^2)\rho^2 + (1 + q)^2$, $q^2 = \gamma\varepsilon^2\rho^2 + \zeta^2 + \varepsilon^2$. Используя параметры нашей Галактики $\gamma = 0$; $\kappa = 1$; $\alpha = 2$; $\beta = 1$; $\varepsilon = 0,1$ [7], получим $\xi^2 = (1 + \sqrt{\zeta^2 + \varepsilon^2 - \varepsilon^2})^2 + \rho^2 - 1$, $\varphi = 2/(1 + \sqrt{1 + \xi^2})$. Очевидно, что

$$\frac{\partial U}{\partial r} = \frac{\Phi_0}{R_0} \frac{\partial \varphi}{\partial \rho}; \quad \frac{\partial U}{\partial z} = \frac{\Phi_0}{R_0} \frac{\partial \varphi}{\partial \zeta}; \quad \frac{\partial^2 U}{\partial r^2} = \frac{\Phi_0}{R_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \rho^2}; \quad \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = \frac{\Phi_0}{R_0^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial \zeta^2}.$$

Пусть $\xi_0 \equiv \xi(\rho_0, 0)$, где $\rho_0 = r_0/R_0$. Тогда $\xi = \rho_0$ — точка на круговой орбите. Дифференцируя (6) и (7) и подставляя $\xi = \xi_0$, $\rho = \rho_0$, $\varphi_0 = \varphi(\xi_0)$, $\zeta = 0$, получим

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \xi}\right)_0 &= -\frac{1}{2} \frac{\varphi_0^2 \rho_0}{\sqrt{1 + \rho_0^2}}, \\ \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2}\right)_0 &= \frac{1}{2} \left[\varphi_0^2 \left(\varphi_0 \frac{\rho_0}{\sqrt{1 + \rho_0^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 + \rho_0^2}} \right) \right], \\ \left(\frac{\partial \xi}{\partial \rho}\right)_0 &= 1; \quad \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial \rho^2}\right)_0 = \left(\frac{\partial \xi}{\partial \zeta}\right)_0 = 0; \quad \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial \zeta^2}\right)_0 = \frac{1}{\varepsilon \rho_0}. \end{aligned} \quad (8)$$

Теперь найдем Φ_0 и R_0 . При этом будем исходить из следующих соображений:

1) при $\sqrt{r^2 + z^2} \rightarrow \infty$ потенциал становится ньютоновым;

2) вращение вокруг центра Галактики с угловой скоростью ω определяется производной $(\partial U/\partial r)_0$.

Получим

$$U = \frac{2\Phi_0}{1 + \sqrt{\rho^2 + (1 + \sqrt{\xi^2 + \varepsilon^2 - \varepsilon})^2}} \xrightarrow[\xi \rightarrow \infty]{\rho \rightarrow \infty} \frac{2\Phi_0}{\sqrt{\rho^2 + \xi^2}} = \frac{2\Phi_0 R_0}{\sqrt{r^2 + z^2}} = \frac{GM}{\sqrt{r^2 + z^2}}, \quad (9)$$

где G — гравитационная постоянная, M — масса Галактики;

$$\omega = \frac{v_0^2}{r_0} = - \left(\frac{\partial U}{\partial r} \right)_0 = - \frac{\Phi_0}{R_0} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \rho} \right)_0 = \frac{4\Phi_0 \rho_0}{2R_0 \sqrt{1 + \rho_0^2} (1 + \sqrt{1 + \rho_0^2})^2}. \quad (10)$$

Выразим Φ_0 из (8) и подставим в (9):

$$\Phi_0 = \frac{GM}{2R_0} \frac{v_0^2}{GM} = \frac{r_0}{R_0^2} \frac{\rho_0}{\sqrt{1 + \rho_0^2} (1 + \sqrt{1 + \rho_0^2})^2}, \quad (11)$$

$$\frac{v_0^2 r_0}{GM} = \frac{\rho_0^3}{\sqrt{1 + \rho_0^2} (1 + \sqrt{1 + \rho_0^2})^2}. \quad (12)$$

Введем новые переменные: $A \equiv \sqrt{1 + \rho_0^2}$, $D \equiv v_0^2 r_0 / GM$. Тогда, подставляя D в (8) и учитывая, что $r_0/R_0 = \rho_0$, получим

$$2\Phi_0 = \frac{GM}{R_0}, \quad (D^2 + 1)A^3 - (D^2 + 3)A^2 + 3A - 1 = 0, \quad (13)$$

Подставляя известные из наблюдений значения $G = 6,67 \cdot 10^{-8}$ дин·см²/г²; $v_0 = 220$ км/с; $r_0 = 8,2$ кпк; $M = 4 \cdot 10^{44}$ г, определим, что $D = 0,225$. Решая второе уравнение, находим $A = 3,02$. Зная A и D , легко определить, что $\Phi_0 = 1,45 \cdot 10^{15}$ см²/с²; $R_0 = 2,9$ кпк; $\rho_0 = 2,85$. Подставляя полученные значения в (8), найдем

$$\begin{aligned} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \right)_0 &= -0,017, \\ \left(\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} \right)_0 &= 0,053, \\ \left(\frac{\partial \xi}{\partial \rho} \right)_0 &= 1; \quad \left(\frac{\partial^2 \xi}{\partial \xi^2} \right)_0 = \frac{1}{\varepsilon \rho_0} = 3,509. \end{aligned} \quad (14)$$

Подставляя (14) в (4), получим $\kappa_1 = 1,1 \cdot 10^{-15}$ с⁻¹, $\kappa_3 = 2,7 \cdot 10^{-15}$ с⁻¹, что приводит к $T_1 = 180$ млн лет, $T_3 = 75$ млн лет, где T_1 — период обращения по эллипсиду, T_3 — период колебаний вдоль оси Z .

Эти величины согласуются с результатами изучения кинематики звезд, что естественно, поскольку любая модель Галактики должна соответствовать наблюдениям в окрестности Солнца.

Найдем амплитуды и фазы колебаний Солнца относительно круговой орбиты, принимая за $t=0$ наше время.

1. Движение по z -координате (относительно плоскости Галактики)
Используя полученные из наблюдений данные [5]: $z(0)=25$ пк; $\dot{z}(0)=6$ км/с, получим из (4):

$$z(0) = b \cos \varphi_3, \quad \text{tg } \varphi_3 = -\frac{\dot{z}(0)}{\kappa_3 z(0)},$$

$$\dot{z}(0) = -\kappa_3 b \sin \varphi_3, \quad \frac{z(0)}{\cos \varphi_3} = b.$$

Отсюда $b=69$ пк, $\varphi_3=-1,2$ рад, что соответствует $\Delta T=-14$ млн лет. Следовательно (см. (4)), Солнце пересекало плоскость Галактики 4, 41, 78, 115, ... млн лет назад; находилось на максимальном удалении от плоскости Галактики 23, 60, 97, 134, ... млн лет назад.

2. Движение по r и φ (по эпициклу)

Используя полученные из наблюдений данные: $\dot{r}(0)=-10$ км/с, $r_0\dot{\theta}=10$ км/с, получим из (4):

$$\dot{r}(0) = -\kappa_1 a \sin \varphi_1, \quad \text{tg } \varphi_1 = -\frac{2\dot{r}(0)\omega}{\dot{\theta}(0)\kappa_1 r_0},$$

$$r_0\dot{\theta}(0) = 2a\omega \cos \varphi_1, \quad a = -\frac{\dot{r}(0)}{\kappa_1 \sin \varphi_1}.$$

Величина $\varphi_1=2,1$. Значит, $a=360$ пк, $2\omega a/\kappa_1=550$ пк. Значение $\varphi_1=2,1$ рад соответствует $\Delta T=60$ млн лет. Следовательно (см. (4)), Солнце находилось на максимальном удалении от центра Галактики 60, 240, 420, 600, ... млн лет назад; на минимальном — 150, 330, 510, 690, ... млн лет назад.

Теперь определим, когда Солнце пересекало спиральные рукава. Будем моделировать их логарифмической спиралью: $r_j=A_j e^{-\alpha\theta}$, где $j=1, 2$ — номер рукава, $A_1=6,1$ кпк, $A_2=10,3$ кпк, $\alpha \equiv \text{tg } i = \text{tg } 9,6^\circ$ [8]. Рукава вращаются как твердое тело вокруг центра Галактики с угловой скоростью $\Omega_p \approx 24$ км/(с·кпк). Время пересечения Солнцем рукавов определим из системы уравнений: $r_{\text{arm}}=r_{\text{sun}}$, $\theta_{\text{arm}}=\theta_{\text{sun}}$.

В системе отсчета, вращающейся вместе с рукавом,

$$Ae^{-\alpha\theta} = r_0 + a \cos(\kappa_1 t + \varphi_1),$$

$$\theta = (\omega - \Omega_p)t - \frac{2\omega a}{r_0} \sin(\kappa_1 t + \varphi_1),$$

$$A \exp \left[-\alpha \left\{ (\omega - \Omega_p)t - \frac{2\omega a}{r_0} \sin(\kappa_1 t + \varphi_1) \right\} \right] = r_0 + a \cos(\kappa_1 t + \varphi_1).$$

Решая это уравнение для первого рукава, получим 3 корня:

$$t_1 = -540 \text{ млн лет,}$$

$$t_2 = -600 \text{ млн лет,}$$

$$t_3 = -680 \text{ млн лет.}$$

Чтобы уточнить полученные моменты времени, надо учесть гравитационное поле рукавов.

Связь с палеомагнетизмом

Получив некоторые сведения об орбите Солнца, попытаемся выявить связь между его движением в плоскости Галактики и геомагнитными явлениями. В работе [9] приведен график (рис. 1) зависимости

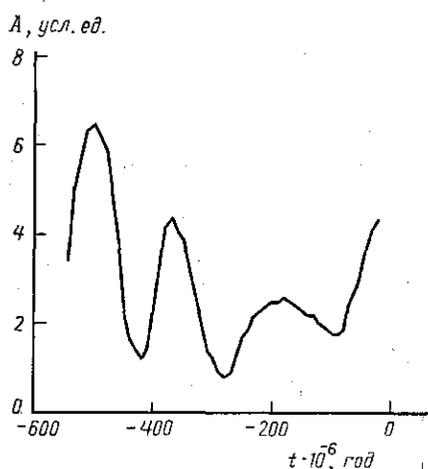


Рис. 1. График зависимости доли состояний со смешанной полярностью от времени. Ноль временной шкалы соответствует настоящему времени

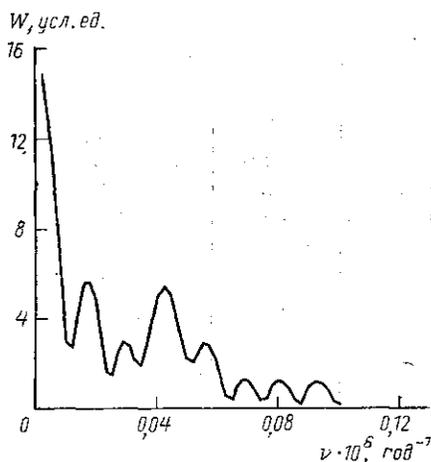


Рис. 2. Амплитуда фурье-образа зависимости на рис. 1

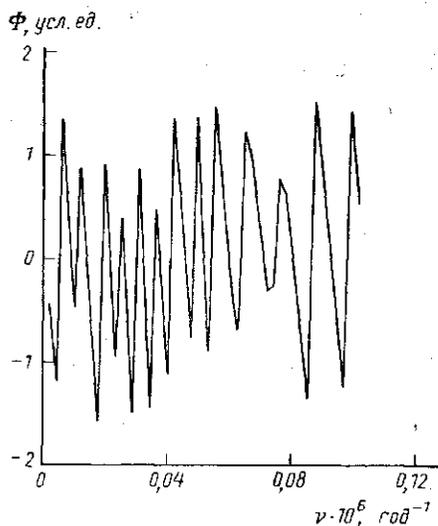


Рис. 3. Фаза фурье-образа зависимости на рис. 1

сти доли состояний со смешанной полярностью от времени. Авторами [9] он интерпретируется как зависимость скорости обращений от времени. Значительное увеличение скорости обращений примерно 500 млн лет назад, возможно, связано с выходом Солнца из рукава.

Для отыскания более тонких эффектов нами был проведен фурье-анализ этой зависимости (рис. 2 и 3). Его результаты (амплитуды и фазы максимумов) представлены в таблице. Здесь приведены: ν — частота, соответствующая максимуму амплитуды, $\Phi(\nu)$ — фаза максимума, $T(\nu)$ — период гармоника с частотой ν , $W(\nu)$ — амплитуда этой гармоника.

Период в 230 млн лет соответствует периоду обращения Солнца вокруг центра Галактики. Гармоника с периодом в 79 млн лет, соответствующая периоду колебаний

вдоль оси Z , принимала экстремальные значения, когда Солнце пересекало плоскость Галактики. Гармоника с периодом в 150 млн лет, соответствующая периоду движения по эллипсу, была близка к своему максимуму, когда Солнце находилось на минимальном расстоянии от центра Галактики, и к минимуму — на наибольшем.

Все расчеты носят оценочный характер. Однако нам известно, что ошибки исходных данных (сведений о строении Галактики, палеомагнитных данных) составляют 10—20%, значит, и точность полученных здесь результатов примерно того же порядка.

Основные выводы

При сопоставлении палеомагнитных данных с результатами расчета орбиты Солнца в Галактике выявлены следующие соответствия. Во время выхода Солнца из спирального рукава Галактики частота инверсий геомагнитного поля увеличивалась. Частота инверсий магнитного поля Земли увеличивалась, когда Солнце либо пересекало плоскость Галактики, либо находилось на наименьшем расстоянии от ее центра.

Для уточнения найденных закономерностей и выяснения их причин нужны дальнейшие исследования.

В заключение автор выражает благодарность научному руководителю д-ру физ.-мат. наук Н. А. Чуйковой. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 94-05-16784.

ЛИТЕРАТУРА

1. Джекобс Дж. Земное ядро. М., 1979.
2. Стейси Ф. Физика Земли. М., 1972.
3. Grainger I. K., Grainger P. L., Plaut M. G. // Nature. 1969. 223. P. 283.
4. Ясаманов Н. А. // ДАН. 1993. 328, № 3. С. 373.
5. Куликовский П. Г. Звездная астрономия. М., 1985.
6. Кутузов С. А., Осипков Л. П. // Астрон. журн. 1980. 57, № 1. С. 28.
7. Бархатова К. А., Кутузов С. А., Осипков Л. П. // Астрон. цирк. АН СССР. 1981. № 1135. С. 1.
8. Марочник Л. С., Сучков А. А. Галактика. М., 1984.
9. McElhinny M. W. // Science. 1971. 172. P. 157.

Поступила в редакцию
21.06.95

ВЕСТН. МОСК. УН-ТА. СЕР. 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 1996. № 3

УДК 524.78

ПОЛЯРИЗАЦИЯ РЕЛИКТОВОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

М. В. Сажин, В. В. Шульга

(ГАИШ)

Рассматривается образование поляризации реликтового излучения при наблюдении стандартной рекомбинации. Вычислен уровень поляризации при наблюдении антеннами с различными размерами диаграмм направленности в диапазоне углов от 3 до 15°. Образование поляризации рассчитывалось в моделях с различными видами спектров (для показателя спектра $n=1$ и 1,5) и различными видами возмущений. Рассматривались скалярные возмущения и гравитационные волны по отдельности. Вычислена степень поляризации реликтового излучения.