

УДК 550.386.37

О КОРРЕЛЯЦИИ ПРОТОННОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ АНИЗОТРОПИИ И ПРОДОЛЬНОГО ДАВЛЕНИЯ В ОКОЛОЗЕМНОЙ ПЛАЗМЕ

© 2010 г. Ф.З. Фейгин, Ю.Г. Хабазин

Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Одним из интересных проявлений ионно-циклотронной неустойчивости в магнитосфере и магнитослое Земли является экспериментально наблюдаемая обратная корреляция между протонной температурной анизотропией A_p и продольным давлением горячих протонов $\beta_{\parallel p}$. Аналитически показано, что эта корреляция обусловлена нелинейным взаимодействием электромагнитных ионно-циклотронных волн с анизотропными протонами.

Ключевые слова: магнитосфера, ионосфера, магнитослой, нелинейность.

Введение

Электромагнитные ионно-циклотронные (ЭМИЦ) волны – важный элемент околоземного плазменного пространства. Измерения на спутнике *AMPTE/CSE* показали, что эти волны наиболее часто появляются в магнитослое [Anderson, Fuselier, 1993; Anderson et al., 1994] и во внешней магнитосфере на $L \geq 7$ [Anderson, Erlandson, Zanetti, 1992]. В этих областях сжатие солнечным ветром приводит к увеличению продольного протонного давления $\beta_{\parallel p}$ и протонной анизотропии A_p : $\beta_{\parallel p} = 8\pi n_p T_{\parallel p} / B_0^2$, где n_p – плотность горячих протонов, символ p означает протоны, B_0 – напряженность магнитного поля; $A_p = \frac{T_{\perp}}{T_{\parallel}} - 1$. Символом \parallel обозначается направление вдоль фонового магнитного поля \mathbf{B}_0 , символом \perp – поперек него. В плазме с $T_{\perp} > T_{\parallel}$ на частотах ниже гирочастоты протонов могут развиваться два типа электромагнитной неустойчивости: зеркальная и ионно-циклотронная. Зеркальная неустойчивость была детально исследована в работах [Похотелов, Пилипенко, 1976; Pokhotelov et al., 2002, 2003; Фейгин и др., 2009]. Результаты работ [McKean, Winske, Gary, 1992] и [Gary, Winske, 1993] показывают, что ионно-циклотронные возмущения значительно сильнее рассеивают ионы, чем зеркальные моды. Поэтому далее мы рассматриваем только ЭМИЦ неустойчивости, теория которых и их геофизические приложения разработаны давно (см., например, [Сагдеев, Шафранов, 1960; Фейгин, Якименко, 1969; Гульельми, Троицкая, 1973; Гульельми, 1979; Cornwall, 1966; Kennel, Petschek, 1966;]). В своей работе мы воспользуемся результатами этих разработок. Естественно также ограничиться случаем возмущений, распространяющихся вдоль геомагнитного поля ($\mathbf{k} \parallel \mathbf{B}_0$), при котором рассматриваемые неустойчивости имеют максимальные инкременты (\mathbf{k} – волновой вектор возмущения) [Сагдеев, Шафранов, 1960].

Одним из интересных проявлений ионно-циклотронной неустойчивости в магнитосфере [Anderson et al., 1996] и магнитослое Земли [Anderson, Fuselier, 1993; Anderson et al., 1994] является экспериментально наблюдаемая обратная корреляция

между протонной температурной анизотропией A_p и продольным давлением горячих протонов $\beta_{\parallel p}$.

В работе [Gary et al., 1994] численным методом показано, что в рамках линейной циклотронной неустойчивости протонная анизотропия A_p связана с протонным параллельным давлением $\beta_{\parallel p}$ следующим выражением

$$A_p = S_p / \beta_{\parallel p}^\alpha, \quad (1)$$

где значение S_p , зависящее от максимальной величины инкремента, составляет порядка единицы, а $\alpha \cong 0.40$.

При анализе данных AMPTE/CCE на $L \geq 7$ аналогичная эмпирическая связь (1) с $S_p < 1$ и α от 0.48 до 0.52 была обнаружена в дневном секторе магнитосферы [Anderson et al., 1996]. При исследованиях в подсолнечном магнитослое Земли [Anderson, Fuselier, 1993; Anderson et al., 1994] получены $S_p = 0.85$ и $\alpha = 0.48 \pm 0.03$.

Цель данной работы – получить выражение (1) аналитически, используя линейную теорию ЭМИЦ волн, распространяющихся параллельно фоновому магнитному полю.

Связь A_p и $(1/\beta_{\parallel p})$ через ионно-циклотронную неустойчивость

Хотя обратная корреляционная связь (1) является следствием нелинейного взаимодействия волн и частиц, ее можно получить аналитически из линейного дисперсионного уравнения. Воспользуемся известным выражением Сагдеева – Шафранова [1960] для инкремента ионно-циклотронной неустойчивости при би-Максвелловской функции распределения анизотропных протонов

$$\frac{\gamma}{\Omega_p} = \sqrt{\pi} N_p^{3/2} \frac{(1-x)^{5/2}}{\beta_{\parallel p}^{1/2} x (2-x)} \left[-(A_p + 1) + \frac{A_p}{x} \right] \exp \left[- \left(\frac{N_p (1-x)^3}{\beta_{\parallel p} x^2} \right) \right], \quad (2)$$

где $x = \omega / \Omega_p$ – нормированная частота возмущения; Ω_p – гирочастота протонов; $N_p = n_p / n_0$, n_p – концентрация горячих анизотропных протонов, n_0 – концентрация фоновой плазмы ($N_p \ll 1$).

Максимум инкремента достигается на частоте $x = x_m$, которая определяется из уравнения [Фейгин, Якименко, 1969; Gendrin et al., 1971]:

$$\frac{N_p}{\beta_{\parallel p}} = x^2 y / (1-x)^3, \quad y = 1 + \frac{x}{2+x} \left[\frac{1}{A_p - (A_p + 1)x} + \frac{x}{4-2x} \right]. \quad (3)$$

Упростив формулу (3) для $x = x_m \ll 1$ и подставив ее в выражение (2), получим

$$\left(\frac{\gamma_p}{\Omega_p} \right)_{\max} \approx (N_p \beta_{\parallel p})^{0.5} \left[A_p - (A_p + 1) \left(\frac{N_p}{\beta_{\parallel p}} \right)^{0.5} \right]. \quad (4)$$

При $\sqrt{N_p / \beta_{\parallel p}} \ll 1$ из (4) получаем

$$A_p \approx \left(\frac{2e}{\sqrt{\pi}} \frac{(\gamma_p / \Omega_p)_{\max}}{\sqrt{N_p}} + \sqrt{N_p} \right) / \beta_{\parallel p}^{0.5}, \quad (5)$$

(e обозначает основание натуральных логарифмов).

Выражение (5) близко по форме к выражению (1), хотя параметр $(\gamma_p / \Omega_p)_{\max}$ остается пока неопределенным; для существования выражения (5) необходимо, чтобы этот параметр в линейной стадии не был равен нулю. Нелинейная релаксация приводит к изменению функции распределения частиц и уменьшению параметра $(\gamma_p / \Omega_p)_{\max}$. В стадии насыщения, когда $(\gamma_p / \Omega_p)_{\max} = 0$, выражение (5) приводится к виду

$$A_p = \frac{S_p}{\beta_{\parallel p}^{0.5}}, \quad (6)$$

где

$$S_p = \sqrt{N_p}. \quad (7)$$

Используя, например, для $L > 7$ значение $N_p \approx 0.2$, получаем $S_p \approx 0.45$. Это значение можно увеличить, если учесть, что полное усиление ЭМИЦ волн при наличии их отражения от ионосферы определяется выражением [Demekhov, 2007]

$$\Gamma = 2\gamma - \delta_{\text{eff}} \geq 0, \quad (8)$$

где δ_{eff} – эффективный коэффициент затухания за счет ионосферы.

По мере усиления волн в результате квазилинейной релаксации функция распределения изменяется и происходит перекачка энергии из поперечной в продольную. При отсутствии затухания через время $\Delta t = t_s$ (t_s – время насыщения) $T_{\perp} \rightarrow T_{\parallel}$, а $\gamma_{\max} \rightarrow 0$ [Feuigin, Kurchashov, 1975]. Но это состояние не достигается, так как усиление прекращается при уменьшении γ_{\max} до величины $\gamma_{\max} = \delta_{\text{eff}} / 2$. При этом $\Gamma = 0$. Таким образом, заменив левую часть уравнения (4) на $\gamma_{\max} = \delta_{\text{eff}} / 2$, мы находим связь между A_p и $\beta_{\parallel p}$ через значение δ_{eff} , которое определяется параметрами ионосферы. В результате S_p в магнитосфере Земли определяется как

$$S_p = \left(\frac{2e^1}{\sqrt{\pi}} \frac{|\left(\delta_{\text{eff}} / 2\Omega_p\right)|}{\sqrt{N_p}} + \sqrt{N_p} \right). \quad (9)$$

При $N_p = 0.2$ и $\delta_{\text{eff}} \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ c}^{-1}$ [Тверской, 1968] $S_p \approx 0.6$, что не противоречит наблюдениям этого параметра в магнитосфере Земли [Anderson et al., 1996].

Заключение

В работе показано, что форма наблюдаемой обратной корреляции между протонной температурной анизотропией и параллельным протонным давлением может быть объяснена нелинейными процессами и получена непосредственно из выражения для инкремента циклотронной неустойчивости. Учет поглощения, обусловленного диссипативными потерями, может также соответствовать численным значениям в наблюдательных данных.

Благодарности

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (гранты № 08-05-00-617, 10-05-00376), программы Президиума РАН № 7, 9, 16 (часть 3) и МНТЦ (грант № 3520).

Литература

- Гульельми А.В., Троицкая В.А. Геомагнитные пульсации и диагностика магнитосферы. М.: Наука, 1973. 208 с.
- Гульельми А.В. МГД волны в околоземной плазме. М.: Наука, 1979. 139 с.
- Похотелов О.А., В.А.Пилипенко. К теории дрейфово-зеркальной неустойчивости магнитосферной плазмы // Геомагнетизм и аэронавигация. 1976. Т. 16. С.504–510.
- Садгеев Р.З., Шафранов В.Д. О неустойчивости плазмы с анизотропным распределением скоростей в магнитном поле // ЖЭТФ. 1960. Т. 39. С.181–184.
- Тверской Б.А. Динамика радиационных поясов Земли. М.: Наука, 1968. 223 с.
- Фейгин Ф.З., Якименко В.Л. Механизм генерации и развитие “жемчужин” при циклотронной неустойчивости внешней протонной зоны // Геомагнетизм и аэронавигация. 1969. Т. 9. С.700–705.
- Фейгин Ф.З., Хабазин Ю.Г., Симаненко В.А., Кондратьев А.А. Линейная теория медленной дрейфово-зеркальной кинетической неустойчивости при конечной электронной температуре // Геомагнетизм и аэронавигация. 2009. Т. 49. С.34–45.
- Anderson, B.J., Erlandson R.E., Zanetti L.J. A statistical study of Pc 1-2 magnetic pulsations in the equatorial magnetosphere: Equatorial occurrence distribution // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P.3075.
- Anderson B.J., Fuselier S.A. Magnetic pulsations from 0.1 to 4 Hz and associated plasma properties in the Earth’s subsolar magnetosheath and plasma depletion layer // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P.1461.
- Anderson B.J., Fuselier S.A., Gary S.P., Denton R.E. Magnetic spectral signatures in the Earth’s magnetosheath and plasma depletion layer // J. Geophys. Res. 1994. V. 99. P.5877.
- Anderson B.J., Denton R.E., Ho G., Hamilton D.S., Fuselier S.A., Strangeway R.J. Observational test of local proton cyclotron instability in the Earth’s magnetosphere // J. Geophys. Res. 1996. V. 101. P.21527–21543.
- Cornwall J.M. Micropulsations and the outer radiation zone // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. P.2185–2199.
- Demekhov A.G. Recent progress in understanding Pc1 pearl formation // J. Atmosph. Sol.-Terr. Phys. 2007. V. 69. P.1609–1622.
- Feygin F.Z., Kurchashov Yu.P. A Quasilinear Dynamics of Pc1 Geomagnetic Pulsations (Pearls) // J. Geomag. Geoelectr. 1975. V. 26. P.539–548.
- Gary S.P., Winske D. Simulations of ion cyclotron anisotropy instabilities in the terrestrial magnetosheath // J. Geophys. Res. 1993. V. 98. P.9171.
- Gary S.P., McKean M.E., Winske D., Anderson B.J., Denton R.E., Fuselier S.A. The proton cyclotron instability and anisotropy / β inverse correlations // J. Geophys. Res. 1994. V. 99, N. A4. P.5903–5914.
- Gendrin R., Lacourly S., Roux A., Solomon J., Feygin F.Z., Gokhberg M.B., Troitskaya V.A., Yaki-menko V.L. Wave packet propagation in an amplifying medium and its application to the dispersion characteristics and to the generation mechanism of Pc1 events // Planet. Space Sci. 1971. V. 19. P.165–194.
- Kennel C.F., Petschek H.E. Limit on stably trapped particle fluxes // J. Geophys. Res. 1966. V. 71. P.1–28.
- McKean M.E., Winske D., Gary S.P. Mirror and ion cyclotron anisotropy instabilities in the magnetosheath // J. Geophys. Res. 1992. V. 97. P.19421.
- Pokhotelov O.A., Treumann R.A., Sagdeev R.Z., Balikhin M.A., Onishchenko O.G., Pavlenko V.P., Sandberg I. Linear theory of the mirror instability in non-Maxwellian space plasmas // J. Geophys. Res. 2002. V. 107 (A10). P.1312. doi: 10.1029/2001 JA009125.
- Pokhotelov O.A., Sandberg I., Sagdeev R.Z., Treumann R.A., Onishchenko O.G., Balikhin M.A., Pavlenko V.P. Slow mirror instability in finite electron-temperature plasma: Hydrodynamic and kinetic drift mirror instabilities // J. Geophys. Res. 2003. V. 108 (A3). P.1098. doi: 10.1029/2002 JA009651.

Сведения об авторах

ФЕЙГИН Феликс Зеликович – доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 254-88-05. E-mail: feygin@ifz.ru

ХАБАЗИН Юрий Григорьевич – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123995, ГСП-5, Москва, Д-242, ул. Большая Грузинская, д. 10. Тел.: 254-42-90.

ON THE CORRELATION OF PROTON TEMPERATURE ANISOTROPY AND PARALLEL PRESSURE IN THE NEAR-EARTH SPACE PLASMA

F.Z. Feygin, Yu.G. Khabazin

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. One of the interesting manifestations of the ion cyclotron instability in the Earth's magnetosphere and magnetosheath is an inverse correlation between the proton anisotropy A_p and the parallel proton pressure $\beta_{\parallel p}$. It has been demonstrated analytically that these correlations are due to wave-particle scattering by electromagnetic ion cyclotron anisotropy instability.

Keywords: magnetosphere, ionosphere, magnetosheath, nonlinearity.



Решением Президиума Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации (ВАК) № 6/6 от 19.02.2010 г. журнал “**Геофизические исследования**” включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий (список ВАК).