ВЛИЯНИЕ КОЛЛЕКТИВНЫХ ПРОЦЕССОВ В СРЕДНЕЙ МАГНИТОСФЕРЕ ЮПИТЕРА НА ДИФФУЗИЮ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ПОПЕРЕК МАГНИТНЫХ ОБОЛОЧЕК

П.А. Беспалов[1], **О.Н. Савина**[2]

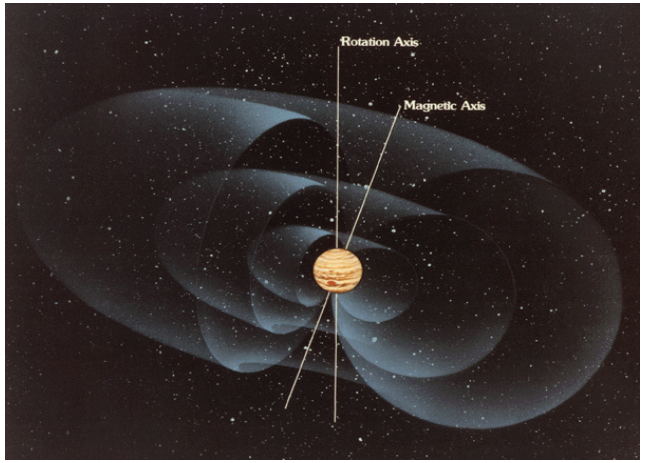
[1] *Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород*
[2] *Национальный исследовательский университет - Высшая школа экономики, Нижний Новгород*

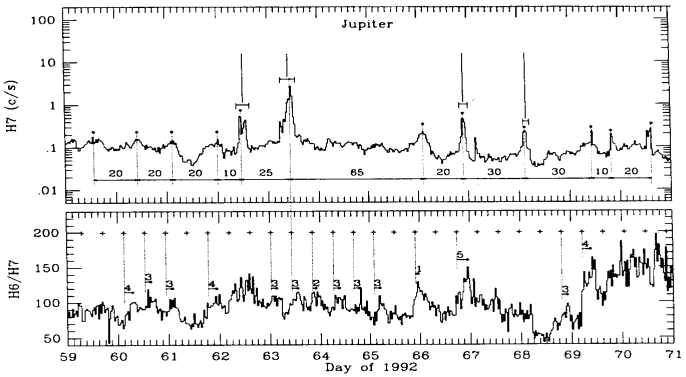
Содержание:

- ***Часовой эффект в электронных радиационных поясах Юпитера***
- ***Влияние резонансных воздействий на движение частиц***
- ***Осцилляции параметров радиационных поясов Юпитера***
- ***Величины ω_{rb} и ν_{RB} в электронных радиационных поясах Юпитера***
- ***Пространственное детектирование добротности магнитосферного резонатора***
- ***Пространственно-временная динамика циклотронной неустойчивости радиационных поясов Юпитера***
- ***Влияние потоков энергичных частиц на кольцевой ток***
- ***Вклад в коэффициент радиальной диффузии периодически изменяющихся потоков энергичных частиц***
- ***Коэффициент диффузии энергичных электронов поперек магнитных оболочек***
- ***Заключение***

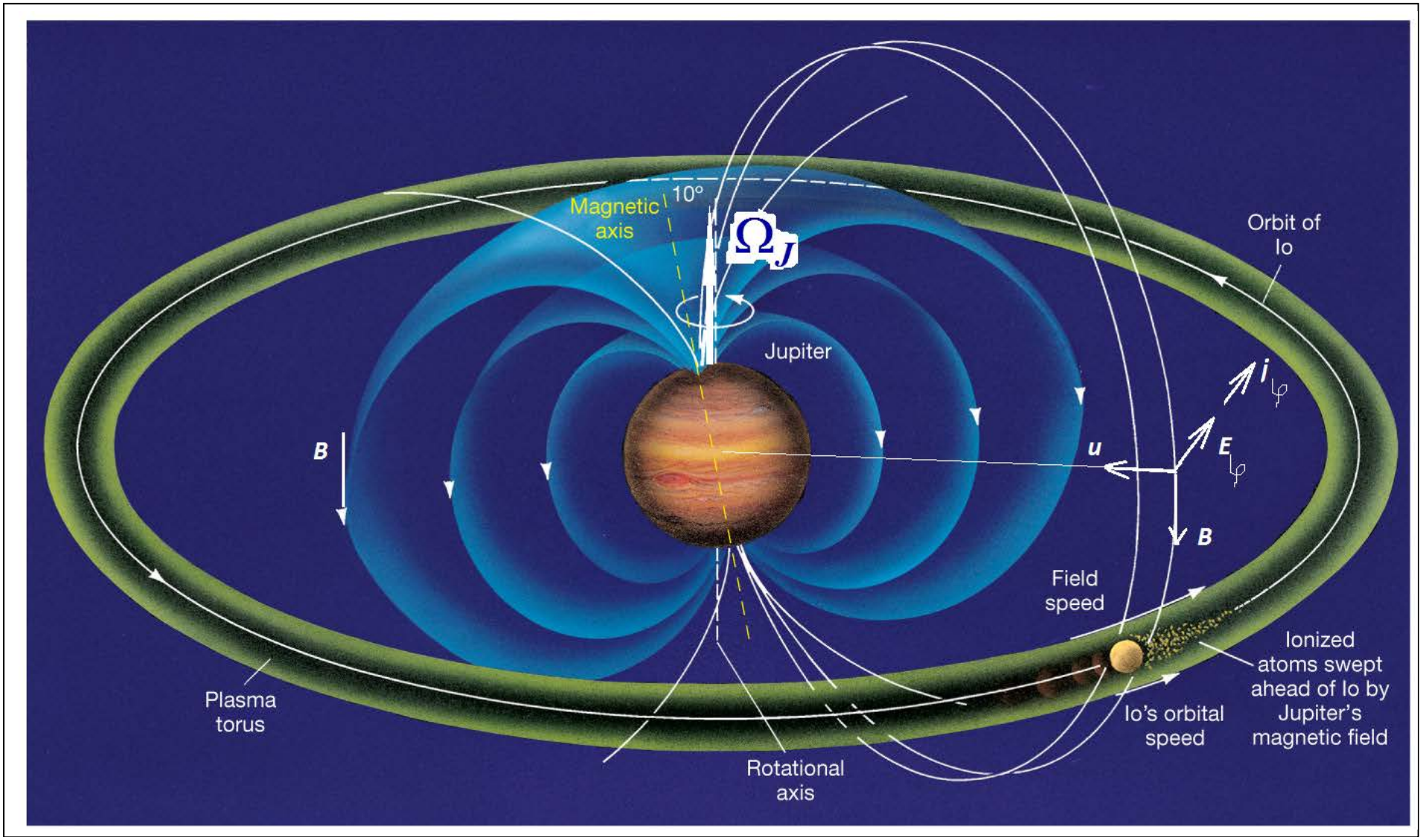
ЧАСОВОЙ ЭФФЕКТ В ЭЛЕКТРОННЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ЮПИТЕРА

Часовой эффект для потоков релятивистских электронов (1-10 MeV) магнитосфере Юпитера (**clock** event) был открыт по данным с космического аппарата Pioneer 10 (Simpson and McKibben, 1976).





Одновременные эксперименты на космических аппаратах Cassini-Huygens и Galileo на фланге и в магнитосфере Юпитера (Kaiser et al., 2004). Эти эксперименты убедительно доказали синхронность десятичасовой модуляции свистовых излучений в разных секторах магнитосферы. Это интересное обстоятельство представляется хорошим поводом для развития теории коллективных процессов в радиационных поясах Юпитера.



Низко энергичные частицы образуются при ионизации вещества, поступающего в магнитосферу в результате вулканической активности на спутнике Ио. Накопление частиц в плазменном торе спутника Ио и его внешней окрестности создает радиальные градиенты концентрации. В результате переноса низко энергичных частиц на периферию магнитосферы устанавливается радиальное распределение, близкое к порогу перестановочной неустойчивости.

ВЛИЯНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ДВИЖЕНИЕ ЧАСТИЦ

Эволюция функции распределения из-за внешних воздействий. Уравнение Фоккера-Планка

$$f = f(t, J_1, J_2, L), \qquad J_1 = \pi c p_\perp^2 / (eB), \; J_2 = \oint p_{||}\, dz$$

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \sum_{i=1}^{2} \frac{\partial}{\partial J_i}\left(\left\langle \frac{dJ_i}{dt} \right\rangle f \right) = \sum_{i=1}^{2}\sum_{j=1}^{2} \frac{\partial}{\partial J_i}\left(D_{ij} \frac{\partial f}{\partial J_j} \right) + L^2 \frac{\partial}{\partial L}\left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial f}{\partial L} \right)$$

усреднение по периодам процессов с учетом $\Omega_d \ll \Omega_b \; и \; \Omega_B$

Обозначения

D_{ij} - коэффициенты диффузии по первому и второму адиабатическим инвариантам;

D_{LL} - коэффициент диффузии поперек магнитных оболочек

ОСЦИЛЛЯЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЮПИТЕРА

Уравнение для малых осцилляций в отдельной трубке магнитного поля

Самосогласованная система релятивистских квазилинейных уравнений плазменного магнитосферного мазера (Bespalov, Trakhtengerts, 1986)

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\delta\varepsilon N + I; \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \varepsilon\left[hN - \nu_{eff}\left(\varepsilon\right)\right]$$

В стационарном состоянии

$$\delta\varepsilon_0 N_0 = L^2 \frac{\partial}{\partial L}\left(\frac{D_{LL}}{L^2}\frac{\partial N_0}{\partial L}\right) - \frac{N_0}{T}; \qquad N_0 = \frac{\nu}{h}$$

Для возмущений $N_\sim$ и $\varepsilon_\sim$ вблизи стационара

$$\frac{\partial^2 N_\sim}{\partial t^2} + 2\nu_{RB}\frac{\partial N_\sim}{\partial t} + \Omega_{RB}^2 N_\sim = L^2 \frac{\partial}{\partial L}\left(\frac{D_{LL}}{L^2}\frac{\partial^2 N_\sim}{\partial L \partial t}\right),$$

$$\frac{\partial \varepsilon_\sim}{\partial t} = h\varepsilon_0 N_\sim$$

Временные характеристики чередования стадий накопления энергичных электронов и их высыпания в ионосферу во время импульсов свистового электромагнитного излучения, возбуждающихся при превышении порога циклотронной неустойчивости:

$$\Omega_{RB}^2 = \delta h N_0 \varepsilon_0 = hL^2 \frac{\partial}{\partial L}\left(\frac{D_{LL}}{L^2}\frac{\partial}{\partial L}\left(\frac{\nu}{h}\right)\right) - \frac{\nu}{T}$$

$$\nu_{RB} = \frac{1}{2}\left(\delta\varepsilon_0 + \frac{1}{T}\right) = \frac{hL^2}{2\nu}\frac{\partial}{\partial L}\left(\frac{D_{LL}}{L^2}\frac{\partial}{\partial L}\left(\frac{\nu}{h}\right)\right)$$

Обозначения

N — содержание энергичных электронов в трубке магнитного поля,

ε(t,L) —плотность энергии свистовых волн,

T - время жизни частиц без учета волн,

δε — скорость убывания содержания энергичных частиц из-за обусловленной свистовыми волнами диффузии в конус потерь.

$\delta = h\sigma l/\langle W\rangle$

σ — пробочное отношение,

l — длина магнитной ловушки,

$\langle W\rangle$ *— средняя кинетическая энергия энергичных электронов.*

I - мощность источников частиц в трубке магнитного поля

hN соответствует инкременту циклотронной неустойчивости свистовых волн,

$\nu_{eff}(\varepsilon)$ — эффективный декремент затухания свистовых волн, учитывающий возможное изменение питч-углового распределения

ВЕЛИЧИНЫ Ω_{RB} И ν_{RB} В ЭЛЕКТРОННЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ЮПИТЕРА

Из экспериментов:

$$D_{LL} = D_J L^{\Delta} \qquad \Delta \simeq 4,\ D_J \simeq 10^{-10}\ c^{-1},$$

Для частиц в электронных радиационных поясах Юпитера эффективность радиальной диффузии практически не зависит от их энергии

Собственная частота системы (Беспалов, 1996)

$$\Omega_{RB} \approx \Delta \left(\frac{c D_J \left| \ln R \right|}{R_J} \right)^{1/2}$$

где R - коэффициент отражения свистовых волн от ионосферы . Значение параметров для оценки Ω_{RB}

$R_J = 7 \times 10^4\ km,\ \Delta \simeq 4,\ D_J \simeq 10^{-10}\ c^{-1},\ \left| \ln R \right| \approx 3,$ (Barbosa and Coroniti, 1976a,b)

Расчеты показывают

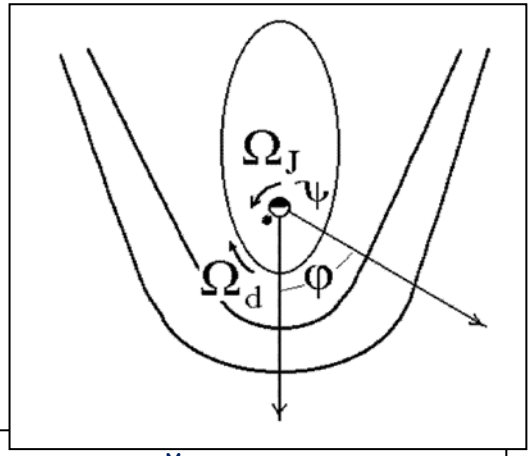
$$\Omega_{RB} \sim (0.5 - 3) 10^{-4}\ c^{-1} \quad \Longleftrightarrow \quad \Omega_J \simeq 1{,}76 \cdot 10^{-4}\ c^{-1}$$

$$\nu_{RB} \approx D L^2 \approx 10^{-10} L^2\ \ c^{-1}$$

Для электронных радиационных поясов Юпитера характерны высокодобротные релаксационные колебания, отвечающие модуляции с периодом порядка десяти часов потоков частиц и электромагнитных волн свистового диапазона в отдельных трубках магнитного поля.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ДОБРОТНОСТИ МАГНИТОСФЕРНОГО РЕЗОНАТОРА

Выберем инерциальную систему отсчета, связанную с отошедшей ударной волной.



Усредненный декремент затухания свистовых волн в отдельной трубке

$$\nu(t,\varphi) = 2 \mid \ln R \mid T_g^{-1}$$

$$T_g^{-1} = f_2(\varphi) = \sum_{k=0}^{\infty}[b_{1k}\sin(k\varphi) + b_{2k}\cos(k\varphi)]$$

$$2 \mid \ln R \mid = f_1(\varphi - \Omega_J t) = \sum_{k=0}^{\infty}\{a_{1k}\sin[k(\varphi - \Omega_J t)] + a_{2k}\cos[k(\varphi - \Omega_J t)]\}$$

Из-за несимметричности вращающейся вместе с планетой ионосферы f_1 и f_2 - периодические функции

$$\nu(t,\varphi) = 2 \mid \ln R \mid T_g^{-1} = f_1(\varphi - \Omega_J t) f_2(\varphi) = \nu(t,\varphi) = \psi(t) + a_{20} f_2(\varphi) + \Phi(t,\varphi)$$

периодическая во времени функция с периодом вращения Юпитера T_J, не зависящая от азимутального угла

$$\psi(t) = \frac{1}{2}\sum_{k=1}^{\infty}[(a_{1k}b_{1k} + a_{2k}b_{2k})\cos(k\Omega_J t + \alpha_k)$$

зависящая только от азимутального угла функция

функция в среднем по углу равная нулю $\int_0^{2\pi} \Phi(t,\varphi) d\varphi = 0$

Декремент затухания имеет периодическую зависимость во времени с периодом T_J

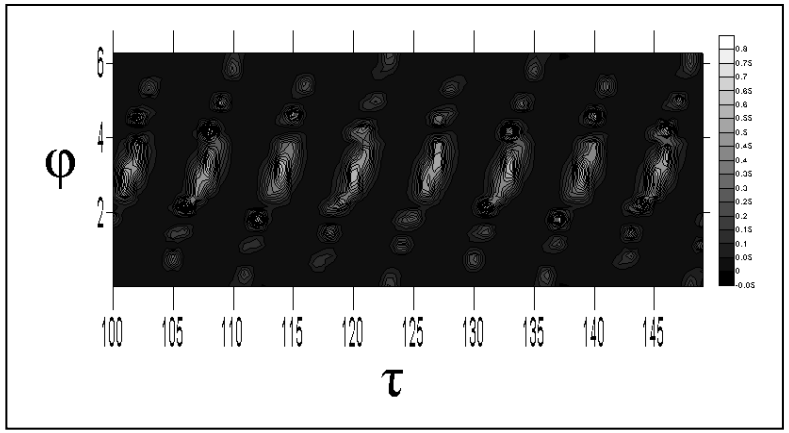
ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ЦИКЛОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЮПИТЕРА

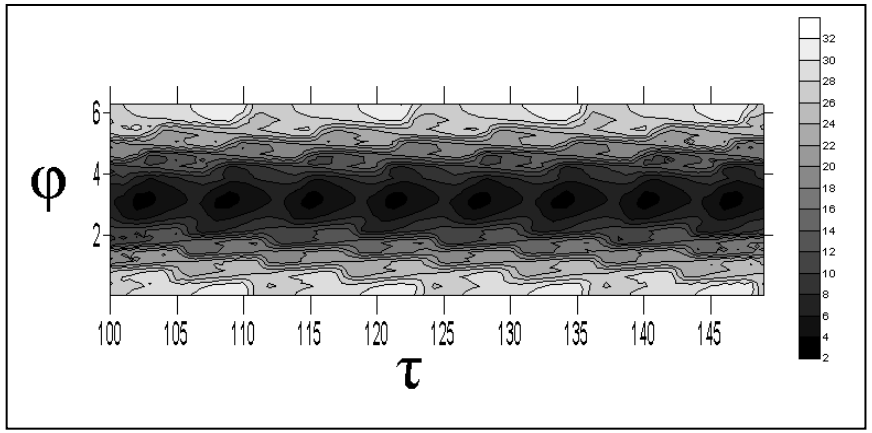
Балансные уравнения во вращающейся вместе с фоновой плазмой системе отсчета

$$\frac{\partial N}{\partial t} = -\delta(\varphi)\varepsilon N + J, \qquad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = h(\varphi)\varepsilon N - \nu(t,\varphi)\varepsilon + a.$$

Здесь J и a - мощности сторонних источников частиц и волн.

Результаты расчетов модуляции энергии свистовых излучений и содержания частиц



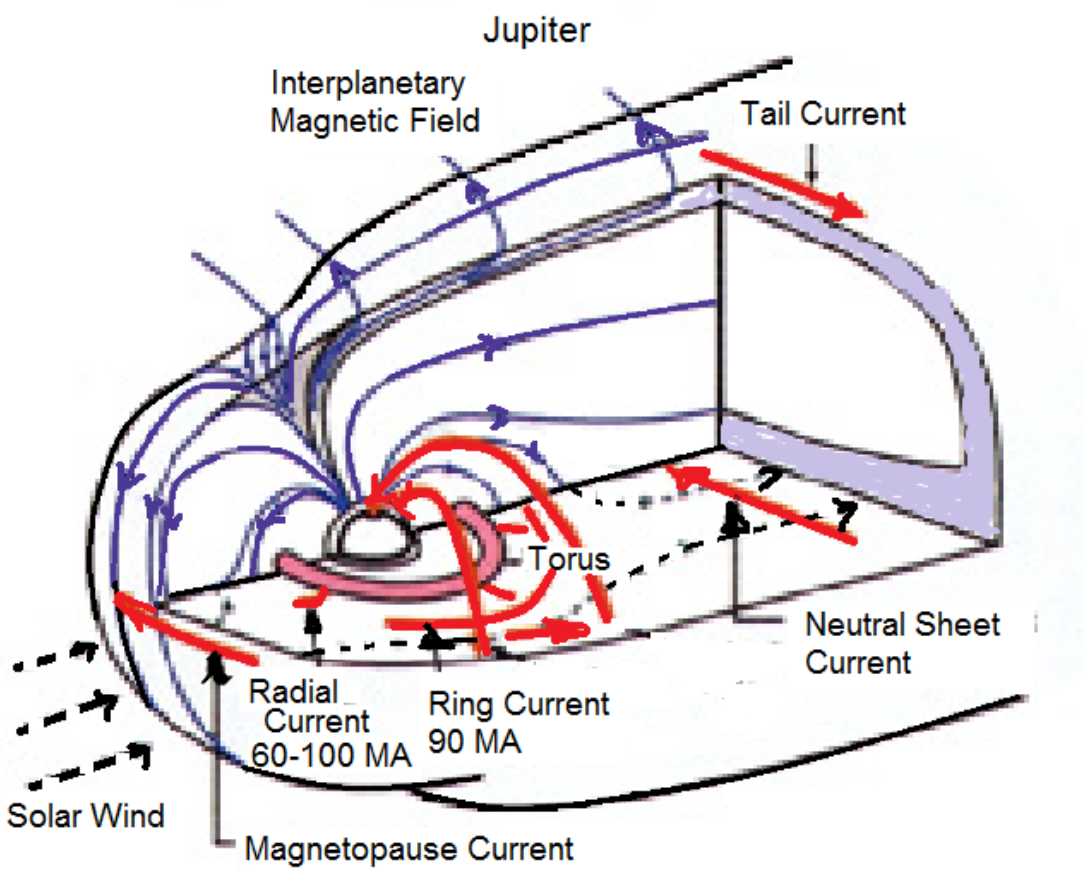


Зависимость плотности энергии свистовых излучений ε и содержания частиц от азимутального угла φ и безразмерного времени $\tau = \Omega_J t \tau$

Расчеты показали, что колебательный процесс на разных долготах происходит с разной эффективностью. Однако максимумы интенсивности свистовых излучений достигаются во всей магнитосфере довольно синхронно.

ВЛИЯНИЕ ПОТОКОВ ЭНЕГИЧНЫХ ЧАСТИЦ НА КОЛЬЦЕВОЙ ТОК

Кольцевой ток в магнитосфере Юпитера



Плотность кольцевого тока j_φ вблизи экваториальной плоскости

$$j_\varphi = \frac{c}{4\pi}\left(\frac{\partial B_r}{\partial z} - \frac{\partial B_z}{\partial r}\right)$$

(Khurana, K.K., 2001)

ВЛИЯНИЕ ПОТОКОВ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ НА ПЛОТНОСТЬ КОЛЬЦЕВОГО ТОКА

Уравнение ионизационного баланса

$$\frac{dn}{dt} = I_{\text{ext}} + \eta S - \alpha n^2$$

I_{ext} - сторонний источник ионизации, S - плотность потока энергичных электронов, η - характеризует эффективность ионизации, α - коэффициент рекомбинации

Переменная составляющая в плотности кольцевого тока

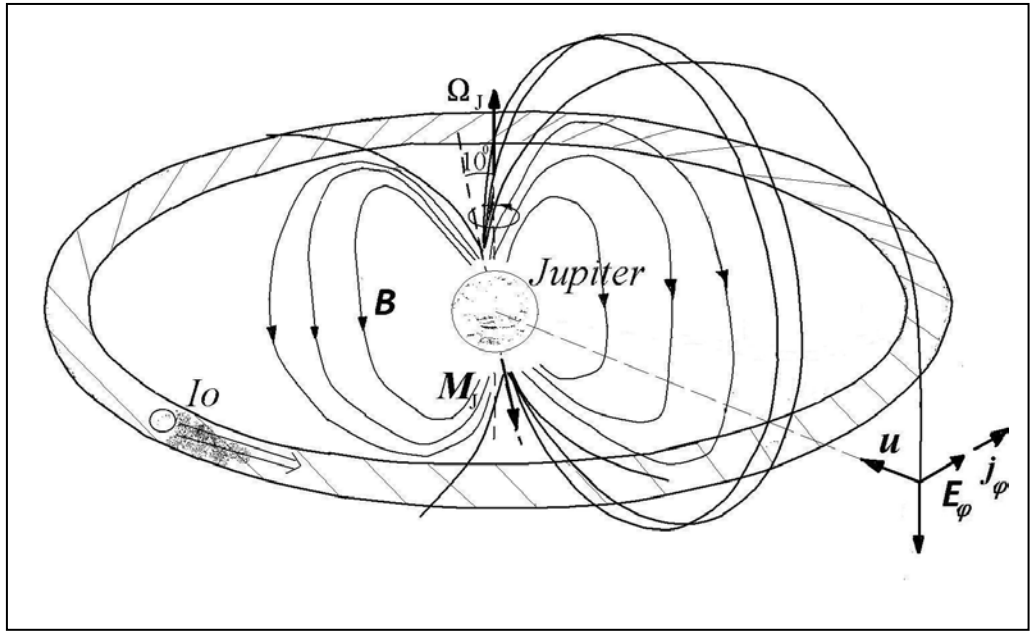
$$j_\varphi = \frac{j_\circ}{L^{3+\kappa}} H(L - L_\circ)\cos(\Omega_J t)$$

κ - численный коэффициент, который при оптимальных условиях удовлетворяет условию $|\kappa| < 1$, $j_\circ$ - плотность тока на внутреннем крае кольцевого тока при $L = L_\circ$, H - функция Хэвисайда, Ω_J - угловая скорость суточного вращения Юпитера.

ВКЛАД В КОЭФФИЦИЕНТ РАДИАЛЬНОЙ ДИФФУЗИИ ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ПОТОКОВ ЭНЕРГИЧНЫХ ЧАСТИЦ

Возмущение магнитного и электрического полей периодически изменяющимися потоками энергичных частиц и радиальный дрейф электронов в средней магнитосфере Юпитера

Согласно уравнениям Максвелла имеются изменения магнитного и электрического полей.



Продольная компонента магнитного поля:

$$B_{z\sim} = \frac{4\pi R_J j_\circ}{(2+\kappa)cL^{2+\kappa}}\cos(\Omega_J t)$$

Азимутальное индукционное электрическое поле:

$$E_{\varphi\sim} = \frac{4\pi R_J^2 \Omega_J j_\circ}{\kappa(2+\kappa)c^2 L^{1+\kappa}}\sin(\Omega_J t)$$

Скорость радиального дрейфа электронов в радиационных поясах в скрещенных электрических и магнитных полях

$$u_r = c\frac{E_{\varphi\sim}}{B_L} = \frac{4\pi R_J^2 \Omega_J j_\circ L^{2-\kappa}}{\kappa(2+\kappa)cB_J}\sin(\Omega_J t)$$

$B_L = B_J L^{-3}$ - магнитное поле в вершине магнитной оболочки на удалении LR_J от центра планеты, B_J - магнитное поле на магнитном экваторе на поверхности планеты

КОЭФФИЦИЕНТ ДИФФУЗИИ ЭНЕРГИЧНЫХ ЭЛЕТРОНОВ ПОПЕРЕК МАГНИТНЫХ ОБОЛОЧЕК

Средний квадрат смещения частиц поперек магнитных оболочек за время $\Delta t = T_J / 2$ в азимутально неоднородной магнитосфере

$$\left\langle (\Delta L)^2 \right\rangle = \left\langle \left(\frac{1}{R_J}\int u_r dt\right)^2 \right\rangle = \frac{L^{4-2\kappa}}{2}\left[\frac{4\pi R_J j_\circ}{\kappa(2+\kappa)\ cB_J}\right]^2.$$

$$D_{LL} = \frac{\left\langle (\Delta L)^2 \right\rangle}{2\Delta t} = \frac{L^{4-2\kappa}}{2T_J}\left[\frac{4\pi R_J j_\circ}{\kappa(2+\kappa)cB_J}\right]^2 \approx \frac{1}{T_J}\left(\frac{I_\circ}{\kappa c B_J R_J}\right)^2 L^4$$

Если принять $j_\circ = I_\circ / R_j^2$, $I_\circ$ - амплитуда переменной составляющей кольцевого тока, $T_J = 3.6 \cdot 10^4$ с, $B_J = 4.2$ Гс, $R_J = 7.1 \cdot 10^9$ см $\kappa \simeq 0.1$

$$D_{LL} \simeq 10^{-10}\ L^4 \text{ с}^{-1}$$

Значение модельного коэффициента радиальной диффузии находятся в хорошем соответствии с известными для магнитосферы Юпитера экспериментальными данными

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Для электронных радиационных поясов Юпитера характерны высокодобротные релаксационные колебания, отвечающие модуляции с периодом порядка десяти часов потоков частиц и электромагнитных волн свистового диапазона в отдельных трубках магнитного поля.

- Вращение несимметричной магнитосферы обеспечивает пространственное детектирование добротности магнитосферного резонатора.

- Колебательные процессы в отдельных трубках магнитного поля синхронизованы синфазной составляющей добротности магнитосферного резонатора.

- Эффект глобального резонанса важен для понимания особенностей радиальной диффузии частиц в магнитосфере Юпитера.

- Временная модуляция потоков энергичных электронов при глобальном резонансе модулирует кольцевой ток вне плазменного тора спутника Ио и обеспечивает импульсы азимутальной компоненты электрического поля в средней магнитосфере.

- Получено выражение для модельного коэффициента радиальной диффузии, обусловленной случайных переносом энергичных электронов поперек магнитных оболочек, связанным с электрическими импульсами.

- Функциональный вид и величина модельного коэффициента радиальной диффузии находятся в хорошем соответствии с известными для магнитосферы Юпитера экспериментальными данными

Работа П.А. Беспалова выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект № 20-12-00268).

ЛИТЕРАТУРА

1. Bespalov P. A., Davydenko S. S., Cowley S.W.H., Nichols J.D. Interchange instability of the plasma disk in Jupiter’s middle magnetosphere and its relation to the radial plasma density distribution// Ann. Geophys. 2006. V. 24. № 7. P. 2043–2055.
2. Беспалов П.А. Глобальный резонанс радиационных поясов Юпитера// Письма в астрономический журнал. 1985. Т.11. № 1. С. 72-77.
3. Bespalov P.A. Self-consistent model of clock event in outer Jovian electron radiation belts// Planetary and Space Science. 1996. V. 44. № 6. P. 565-568.
4. Bespalov P.A., Savina O.N., Cowley S.W.H. Synchronized oscillations in whistler wave intensity and energetic electron fluxes in Jupiter's middle magnetosphere// J. Geophys. Res. 2005. V. 110. A09209. Doi:10:1029/2005JA011147.

5.Беспалов П.А., Савина О.Н. Глобальная синхронизация колебаний уровня свистовых излучений вблизи Юпитера как следствие пространственного детектирования добротности магнитосферного мазера// Письма в ЖЭТФ. 2005. Т.81. № 4. С. 186-191.

6. Беспалов П.А. Некоторые особенности коллективных процессов в магнитосфере быстровращающегося Юпитера/ Плазменная гелиогеофизики под редакцией Л.М. Зеленого и И.С. Веселовского. М.: Физматлит. 2008. Т. 2. С. 74-82.

УСЛОВИЯ ДВИЖЕНИЯ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ С ЭНЕРГИЯМИ 1- 5 МЭВ В МАГНИТОСФЕРЕ

$\Omega_B = eB/(\gamma mc) \approx \Omega_{B\circ} L^{-3}$	Релятивистская гирочастота
$\Omega_b \simeq \Omega_B (r_B / a) \approx (c / 2R_J) L^{-1}$	Баунс-частота осцилляций между зеркальными точками
$\Omega_d \simeq \Omega_B (r_B / a)^2 \approx (c^2 / 4R_J^2 \Omega_{B\circ}) L$	Угловая скорость дрейфа электронов по азимуту в неоднородном изогнутом магнитном поле

e - величина заряда электрона, B - магнитное поле, γ -релятивистский гамма-фактор, m - масса покоя электрона, c скорость света, $r_B = V_\perp / \Omega_B$ - гирорадиус электрона, $V_\perp$ - перпендикулярная магнитному полю компонента скорости электрона, $a \simeq 2R_J L$ - масштаб неоднородности магнитного поля, R_J - радиус Юпитера, L - параметр магнитной оболочки. Для частиц электронных радиационных поясов эффективность диффузии не зависит от энергии частиц.

- ***Условия движения релятивистских электронов с энергиями 1- 5 МэВ в магнитосфере***