

СИНХРОНИЗАЦИЯ ПОТОКОВ СВИСТОВЫХ ВОЛН И РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОНОВ ВРАЩЕНИЕМ МАГНИТОСФЕРЫ ЮПИТЕРА

П.А. Беспалов¹, О.Н. Савина²

¹ Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

² Национальный исследовательский университет - Высшая школа экономики, Нижний Новгород



Содержание:

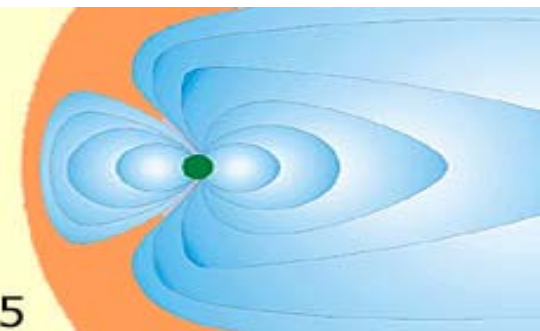
- *Естественная десятичасовая синхронизация процессов в электронных радиационных поясах Юпитера*
- *Осцилляции параметров радиационных поясов Юпитера*
- *Пространственное детектирование добротности магнитосферного резонатора*
- *Пространственно-временная динамика циклотронной неустойчивости радиационных поясов Юпитера*
- *Детали параметрической синхронизации*
- *Радиальная диффузия в электронных радиационных поясах Юпитера*
- *Заключение*

Десятая ежегодная конференция

Физика плазмы в Солнечной системе

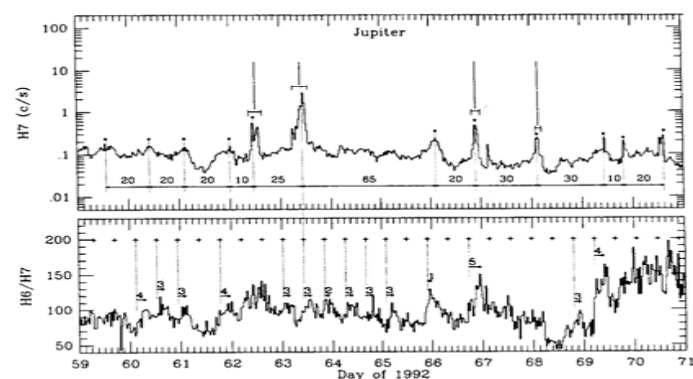
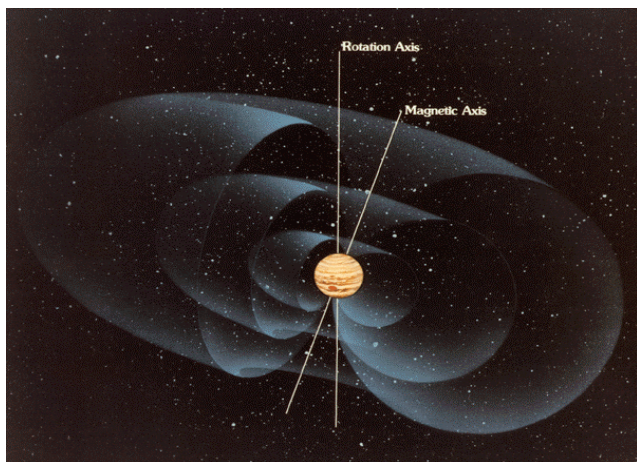
16-20 февраля 2015, ИКИ РАН

Научные программы Президиума РАН №22 и ОФН РАН №15



ЕСТЕСТВЕННАЯ ДЕСЯТИЧАСОВАЯ СИНХРОНИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ 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 обстоятельство представляется хорошим поводом для дальнейшего развития теории коллективных процессов в радиационных поясах Юпитера.

ОСЦИЛЛЯЦИИ ПАРАМЕТРОВ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЮПИТЕРА

Подставляя $N = N_0 + N_{\sim}$ и $\mathcal{E} = \mathcal{E}_0 + \mathcal{E}_{\sim}$ в уравнения балансного приближения для циклотронной неустойчивости электронных радиационных поясов, мы получаем в нулевом приближении параметры стационарного состояния

$$\delta\mathcal{E}_0 N_0 = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial N_0}{\partial L} \right) - \frac{N_0}{T}, \quad N_0 = \frac{\nu}{h}.$$

Для возмущений N_{\sim} и \mathcal{E}_{\sim} мы имеем

$$\frac{\partial^2 N_{\sim}}{\partial t^2} + 2\nu_{RB} \frac{\partial N_{\sim}}{\partial t} + \Omega_{RB}^2 N_{\sim} = L^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial^2 N_{\sim}}{\partial L \partial t} \right), \quad \frac{\partial \mathcal{E}_{\sim}}{\partial t} = h\mathcal{E}_0 N_{\sim},$$

$$\Omega_{RB}^2 = \delta h N_0 \mathcal{E}_0 = hL^2 \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{\nu}{h} \right) \right) - \frac{\nu}{T},$$

$$\nu_{RB} = \frac{1}{2} \left(\delta\mathcal{E}_0 + \frac{1}{T} \right) = \frac{hL^2}{2\nu} \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{D_{LL}}{L^2} \frac{\partial}{\partial L} \left(\frac{\nu}{h} \right) \right).$$

Это слабозатухающие осцилляции с частотой Ω_{RB} и декрементом затухания ν_{RB} .

Оценим величины Ω_{RB} и V_{RB} в электронных радиационных поясах.

Для декремента затухания свистовых волн мы можем написать

$$\nu = \frac{2|\ln R|}{T_g} = |\ln R| \frac{v_g}{l},$$

где согласно результатам (Barbosa and Coroniti, 1976a,b) мы можем считать $|\ln R| \approx 3$, $l \approx 2.76 LR_J$ для близкого к дипольному магнитного поля Юпитера, $R_J \approx 7 \times 10^4$ km и

$$v_g \approx \frac{2c\omega_{BL}}{\omega_{pL}\beta_*^{1/2}}$$

- средняя групповая скорость свистовых волн.

$$D_{LL} = DL^4.$$

Подставляя общепринятые оценки для параметров плазмы, мы находим, что резонансная частота системы не зависит от L и дается выражением

$$\Omega_{RB} = \Delta \left(\frac{cD|\ln R|}{R_J} \right)^{1/2} \sim (0.5-3)10^{-4} s^{-1}.$$

Этот диапазон частот, содержит угловую скорость вращения Юпитера $\Omega_J \approx 1.76 \times 10^{-4} s^{-1}$. Аналогично мы находим

$$V_{RB} \approx DL^2 \approx 10^{-10} L^2 s^{-1}.$$

Эти результаты служат важной предпосылкой возможности глобального резонанса в рассматриваемой системе.

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ДОБРОТНОСТИ МАГНИТОСФЕРНОГО РЕЗОНАТОРА

(Беспалов П.А., Савина О.Н., 2005)

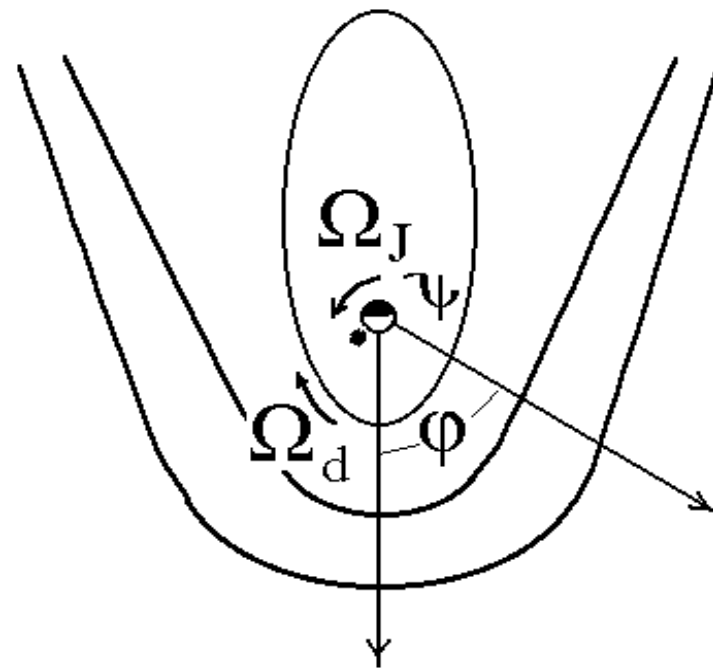
Усредненный декремент затухания свистовых волн в отдельной трубке можно записать в виде

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

Коэффициент R зависит в первую очередь от состояния ионосферы. Вращающаяся вместе с планетой ионосфера Юпитера несимметрична. С учетом этого можно записать, что

$$2 | \ln R | = f_1(\varphi - \Omega_J t) .$$

Период группового распространения свистовых волн в магнитосферном резонаторе T_g является периодической функцией φ , так как он определяется структурой магнитосферы: степенью сплюснутости магнитосферы и концентрацией плазмы вдоль магнитной трубки. Оба эти показателя в основном зависят от местного времени, поэтому $T_g^{-1} = f_2(\varphi)$.



Таким образом, усредненный декремент затухания свистовых волн может быть представлен как

$$\nu(t, \varphi) = f_1(\varphi - \Omega_J t) f_2(\varphi).$$

Периодические функции можно записать в виде рядов Фурье

$$f_1(\varphi - \Omega_J t) = \sum_{k=0}^{\infty} \{a_{1k} \sin[k(\varphi - \Omega_J t)] + a_{2k} \cos[k(\varphi - \Omega_J t)]\}, \quad f_2(\varphi) = \sum_{k=0}^{\infty} [b_{1k} \sin(k\varphi) + b_{2k} \cos(k\varphi)].$$

Подставляя эти разложения в формулу для ν , мы получаем

$$\nu(t, \varphi) = \psi(t) + a_{20} f_2(\varphi) + \Phi(t, \varphi),$$

где
$$\psi(t) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{\infty} [(a_{1k} b_{1k} + a_{2k} b_{2k}) \cos(k\Omega_J t) + (a_{2k} b_{1k} - a_{1k} b_{2k}) \sin(k\Omega_J t)],$$

а функция $\Phi(t, \varphi)$ удовлетворяет условию
$$\int_0^{2\pi} \Phi(t, \varphi) d\varphi = 0.$$

Следовательно декремент затухания свистовых волн представим в виде суммы, содержащей: слагаемое, периодическое во времени с периодом вращения Юпитера T_J , не зависящее от азимутального угла; слагаемое, зависящее только от азимутального угла; слагаемое, зависящее от времени и азимутального угла, но в среднем по углу равное нулю.

Таким образом, тот факт, что усредненный декремент затухания свистовых волн, а следовательно и добротность магнитосферного резонатора плазменного мазера в радиационных поясах Юпитера, определяются произведением двух величин, по разному зависящих от времени и азимутального угла, приводит к появлению пространственного детектирования.

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННАЯ ДИНАМИКА ЦИКЛОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСОВ ЮПИТЕРА

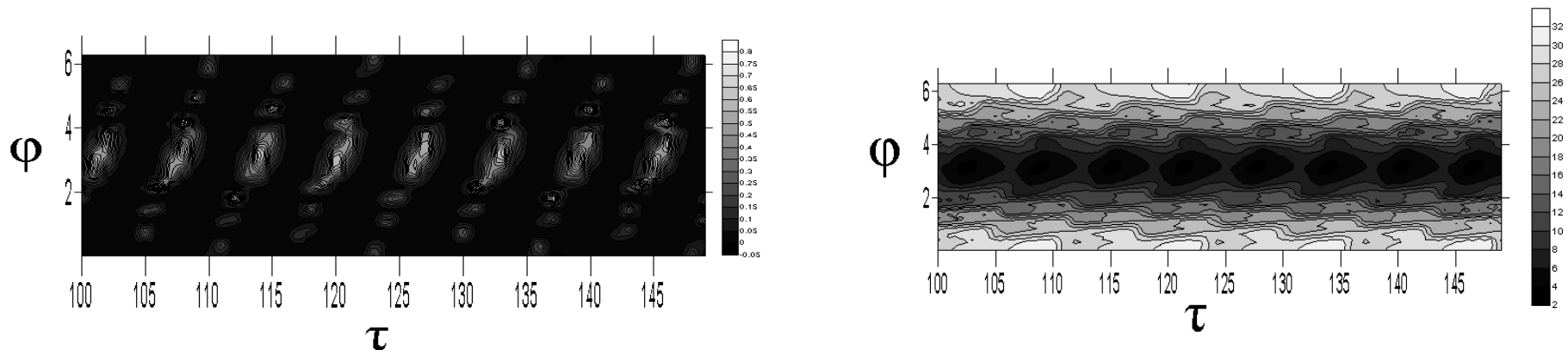
Запишем систему балансных уравнений во вращающейся вместе с фоновой плазмой системе отсчета

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

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

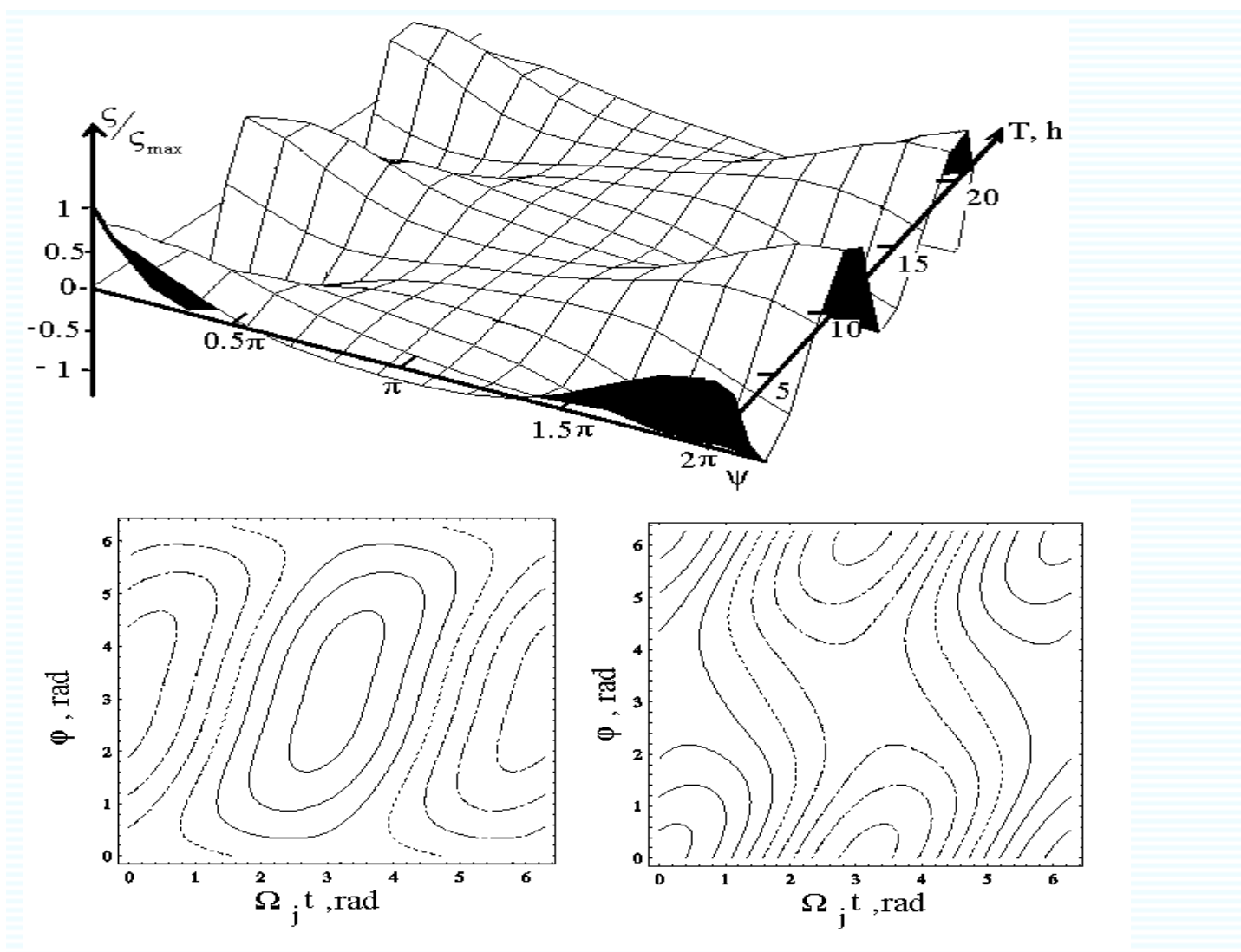
При модуляции декремента затухания даже в пространственно-временной ситуации естественно ожидать резонансного отклика системы в виде глубокой модуляции параметров радиационных поясов и уровня свистовых излучений, особенно когда $\Omega_{RB} \gg \nu_{RB}$. Модельные расчеты степени модуляции были выполнены в работе (Беспалов и Савина, 2005), где для выбранных модельных условий система уравнений была решена численно.

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



ДЕТАЛИ ПАРАМЕТРИЧЕСКОЙ СИНХРОНИЗАЦИИ

(Bespalov, Savina, Cowley, 2005)



РАДИАЛЬНАЯ ДИФФУЗИЯ В ЭЛЕКТРОННЫХ РАДИАЦИОННЫХ ПОЯСАХ ЮПИТЕРА

Довольно естественным представляется вопрос о причине глобального резонанса в магнитосфере Юпитера (Vespalov, 1996, 2012). Это может быть как уникальное совпадение, так и проявление более глубокой самосогласованности системы. Ответ на этот вопрос может дать более подробное рассмотрение факторов, ответственных за глобальный резонанс. Прежде всего, это касается функциональной зависимости и величины коэффициента радиальной диффузии энергичных электронов.

По нашему мнению, квазипериодические осцилляции потоков частиц в электронных радиационных поясах Юпитера могут быть важным фактором, определяющим радиальную диффузию частиц в магнитосфере. Дело в том, что потоки энергичных частиц меняют параметры плазменного тора спутника Ио и ионосферы. При этом происходит периодическое изменение степени ионизации и температуры плазмы. Например, концентрация плазмы n определяется уравнением ионизационного баланса

$$\frac{dn}{dt} = I + \eta S - \alpha n^2,$$

в котором I - сторонний источник ионизации, S - плотность потока энергичных электронов, α - коэффициент рекомбинации.

В результате должны возникать значительные вариации давления фоновой плазмы P и токов в плазменном торе спутника Ио и в ионосфере Юпитера. Диамагнитные вариации будут обеспечивать импульсы азимутальной компоненты электрического поля в средней магнитосфере Юпитера.

Действительно, в соответствии с уравнением Максвелла в интегральной форме мы имеем следующую оценку для азимутального электрического поля

$$E = -\frac{1}{rc} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^r B_{\sim} r dr = \frac{1}{2rc} \frac{\partial}{\partial t} \int_{r_1}^{r_2} B \frac{8\pi P_{\sim}}{B^2} r dr =$$

$$= \frac{BR_J^2}{2cr} \frac{\partial \beta_{\sim}}{\partial t} \approx \frac{BR_J^2 \beta_{\sim}}{2cr T_J} \sim L^{-1}$$

где $\beta = 8P/B^2$.

Коэффициент радиальной диффузии энергичных электронов имеет следующее общее выражение (Cornwall, 1968)

$$D_{LL} = \left(\frac{cE_{max}}{R_J B_L} \right)^2 \frac{T}{4 + (\Omega_d T)^2},$$

где T - период электрических импульсов, Ω_d - угловая скорость азимутального дрейфа энергичных частиц.

В условиях средней магнитосферы Юпитера $\Omega_d T \ll 1$ и поэтому

$$D_{LL} = DL^4$$

мы получаем соответствующую наблюдениям функциональную зависимость диффузии от магнитной оболочки. Сложнее обстоит дело с объяснением величины коэффициента D . В ионосфере Юпитера $\beta \sim 10^{-6}$. В плазменном торе спутника Ио $\beta \sim 10^{-3}$. Оценки показывают, что этого не достаточно для объяснения экспериментально наблюдаемого значения $D = 10^{-10} \text{ s}^{-1}$. Вероятно, более существенный вклад в коэффициент диффузии может дать модуляция уже существующих кольцевых токовых систем в плазменном торе спутника Ио и в ионосфере Юпитера. Периодическая дополнительная ионизация и прогрев плазмы в зоне таких токов тоже будет давать закономерность аналогичного вида. В целом вопрос о реальных причинах радиальной диффузии энергичных электронов в радиационных поясах Юпитера нуждается в дальнейшем изучении.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- √ Для электронных радиационных поясов Юпитера характерны высокочастотные 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 синхронизируются синфазной составляющей добротности магнитосферного резонатора.
- √ Эффект глобального резонанса важен для понимания особенностей радиальной диффузии частиц в магнитосфере Юпитера.

