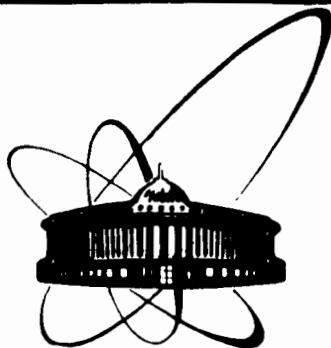


24/1-83



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

5535/83

P11-83-591

И.В.Амирханов, С.М.Голубых, Е.П.Жидков,  
А.Н.Ильина\*, В.Д.Ильин\*

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ  
УГЛОВОГО И ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРОВ  
ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ  
ДИПОЛЬНОГО ТИПА

Направлено в журнал  
"Геомагнетизм и аэронавигация"

\* НИИЯФ МГУ.

1983

Качественное представление об общей физической картине движения частиц в магнитных ловушках дает теория стохастической динамики, связывающая проблему устойчивости движения с проблемой возникновения стохастических закономерностей в детерминированной системе /1/. С точки зрения стохастической теории движение частиц в мультипериодных системах при некоторых критических значениях параметра адиабатичности  $\chi_e$  ( $\chi = \rho/R_e$ , где  $\rho$  - циклотронный радиус,  $R_e$  - радиус кривизны магнитосиловой линии) перестает быть адиабатическим и становится неустойчивым /стохастическим/, возникает диффузия частиц, приводящая к потерям /2/. В основе стохастических эффектов лежат резонансные процессы между колебаниями по разным степеням свободы. Интенсивность этих процессов экспоненциально зависит от параметра  $\chi$  и угла  $\alpha$  наклона скорости частицы к магнитному полю. При определенных условиях нелинейные резонансы проявляют себя как каналы /стоки/, по которым происходит утечка частиц /2,3/. Поэтому естественно ожидать, что в области резонансов должны наблюдаться провалы /резкий спад/ в спектрах частиц по  $\chi$  и  $\alpha$ .

В настоящей работе исходя из результатов численного исследования колебаний нелинейного трехмерного осциллятора /2/ вычисляются размеры /ширины/ провалов в энергетических и угловых спектрах для протонов внутреннего радиационного пояса.

Определяющую роль в стохастизации движения играют нелинейные резонансы типа

$$\omega = 2\pi\Omega, \quad /1/$$

где  $\omega$  - циклотронная частота частицы,  $\Omega$  - частота осцилляций между точками отражений,  $\pi$  - любое целое положительное число. В медианной /экваториальной/ плоскости резонансы /1/ приближенно описываются уравнением /4/

$$n = 0,72 \chi_e^{-1} \sin^{-1,55} \alpha_e, \quad /2/$$

где

$$\chi_e \approx 5 \cdot 10^{-5} R_e^2 (W^2 + 2E_0 W)^{1/2}, \quad /3/$$

$R_e$  - расстояние в радиусах Земли до ведущей силовой линии,  $E_0$  - энергия покоя частицы в МэВ,  $W$  - кинетическая энергия.

Как показывают численные расчеты /3/, ширина нелинейного резонанса /стохастического слоя/ в реальном геомагнитном поле

определяется выражением

$$\Delta a_e^0 \approx 80 (0,12 - 10^{-3} a_e^0) R_e^{-2} \operatorname{tg} a_e; \quad /3/$$

$$30^\circ \leq a_e \leq 60^\circ; \quad 1,6 \leq R_e \leq 2,3.$$

Отсюда следует, что с увеличением  $a_e$  и уменьшением  $R_e$  ширина слоя растет и достигает значения  $\Delta a_e \sim 5^\circ$ . Соответствующий интервал энергии, приходящийся на резонанс, можно оценить из уравнения /2/, которое дает

$$\Delta W \approx 1,5 \cdot 10^{-4} n E^{-1} (W^2 + 2E_0 W)^{3/2} (0,12 - 10^{-3} a_e^0) \sin a_e. \quad /4/$$

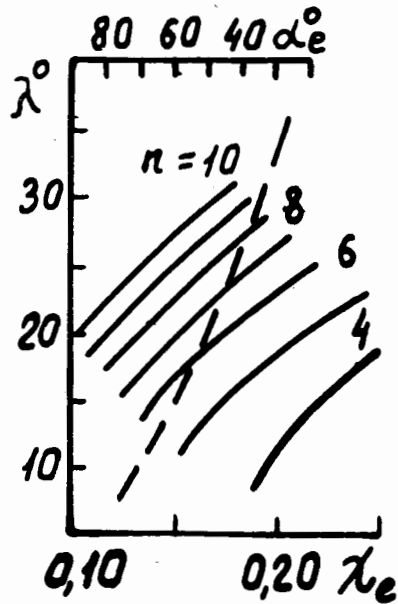
Величина  $\Delta W$  относительно слабо зависит от угла  $a_e$  и в основном определяется энергией и порядковым номером резонанса. Например, при энергиях  $W \sim 100 \div 500$  МэВ значения  $\Delta W \sim n/0,16 \div 7/$  МэВ. Учитывая, что для дипольного поля  $n \geq 4$ , получим  $\Delta W \geq 0,6 \div 30$  МэВ. Таким образом, чтобы экспериментально наблюдать особенности в спектрах энергичных протонов в экваториальной плоскости /широта  $\lambda = 0/$ , необходимо в оптимальном случае разрешение по углу в несколько градусов ( $(\Delta a_e)_{\max} \approx 5^\circ$ ) и по энергии  $\sim 100$  МэВ /при  $W \sim 500$  МэВ/.

С практической точки зрения наибольший интерес, по-видимому, представляют широты  $\lambda \neq 0$ , поскольку с увеличением  $\lambda$  растет локальный угол  $a(\lambda)$  и соответственно ширина резонанса  $\Delta a(\lambda)$ , отнесенная к данной широте. Ввиду того, что с ростом  $\lambda$  потоки протонов сильно падают /5/, ограничением в этом случае будет та минимальная интенсивность частиц, которая еще обеспечивает надежную статистику регистрации.

На рисунке в дипольном приближении изображены резонансные кривые в плоскости  $(\chi_e, \lambda)$ , где величина  $\lambda$  связана с экваториальным углом  $a_e$  уравнением /5/

$$\sin a_e = \frac{\cos^3 \lambda}{(1 + 3 \sin^2 \lambda)^{1/4}} \approx \cos^4 \lambda. \quad /5/$$

Здесь предполагается, что при одном прохождении медианной плоскости магнитный момент частицы  $\mu (\mu \propto \sin^2 a / \beta)$  сохраняется, в силу чего выполняется соотношение



$$\frac{\sin^2 a_e}{B_e} = \frac{\sin^2 a}{B} \approx \text{const}, \quad /6/$$

$$\frac{B}{B_e} = \frac{(1 + 3 \sin^2 \lambda)^{1/2}}{\cos^6 \lambda} \equiv \eta,$$

где  $B$  - напряженность поля вдоль ведущей силовой линии. Ширины резонансов  $n$  рисунка находятся через  $\Delta a_e$  с помощью уравнения /5/, которое дает

$$\Delta \lambda \approx \frac{\operatorname{tg} a_e}{\operatorname{tg} \lambda(a_e)} \Delta a_e. \quad /7/$$

Для упрощения вычислений  $\Delta \lambda$  на рисунке приведена функция  $\lambda(a_e)$ . В качестве примера отметим, что при  $R_e = 1,8$  величина  $\Delta \lambda \sim 1 \div 2^\circ$  ( $n = 10 \div 4$ ).

При определении  $\Delta a(\lambda)$  для заданной широты  $\lambda$  поступим следующим образом. За широту точки отражения  $\lambda_m$  возьмем то значение, которое соответствует экваториальному углу  $a_e + \frac{\Delta a_e}{2}$ , тогда согласно /6/ можно записать:

$$\sin \left( a_e + \frac{\Delta a_e}{2} \right) = \eta^{-1/2}(\lambda_m),$$

$$\sin \left( a_e - \frac{\Delta a_e}{2} \right) = \eta^{-1/2}(\lambda_m) \sin a_e.$$

Принимая во внимание, что на широте  $\lambda_m$  локальный угол  $a = \frac{\pi}{2} - \Delta a$ , получим

$$\Delta a \approx (2 \Delta a_e \operatorname{ctg} a_e)^{1/2}. \quad /8/$$

Итак, резонансными частицами на широте  $\lambda_m$  будут те частицы, локальные углы  $a$  которых попадают в конус /образованный при перпендикуляре к силовой линии/ с раствором  $2 \Delta a$ . Оценки показывают, что даже при  $\Delta a_e \sim 1^\circ$  величина  $\Delta a \sim 1 \div 8^\circ$  ( $30^\circ \leq a \leq 60^\circ$ ) и, следовательно, угол раствора приемного детектора  $\sim 15 \div 30^\circ$ .

Таким образом, как видно из приведенных оценок, наблюдение предполагаемых особенностей в спектрах протонов вполне доступно.

Поиск этих эффектов в радиационных поясах представляется весьма интересным и важным для развития теории стохастической динамики в космофизике.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Заславский Г.М., Чириков Б.В. УФН, 1971, 105, с.3.

2. Чириков Б.В. Физика плазмы, 1978, 4, с.521.
3. Амирханов И.В. и др. ОИЯИ, P11-83-505, Дубна, 1983.
4. Ильин В.Д., Ильина А.Н. Физика плазмы, 1982, 8, с.148.
5. Хесс В. Радиационный пояс и магнитосфера. Атомиздат, М., 1972.

Амирханов И.В. и др. P11-83-591  
Об особенностях углового и энергетического спектров частиц  
в магнитном поле дипольного типа

Предсказывается существование провалов в спектрах высокоэнергичных протонов в геомагнитной ловушке. Указано место нахождения предполагаемых особенностей. Обосновывается практическая возможность наблюдения указанных эффектов в дифференциальных спектрах. Выводы основаны на представлениях о нелинейных резонансах между колебаниями частиц по разным степеням свободы.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1983

Amirkhanov I.V. et al. P11-83-591  
About a Characteristic Property of Angular and Energy  
Distribution of Particles in Magnetic Field with a Dipole  
Configuration

The existence of slits in high energy proton spectra in geomagnetic trap is predicted. The location of the supposed characteristic properties is pointed out. A practical possibility to observe these effects in differential spectra is substantiated. The conclusions are based on the representations about nonlinear resonances between particle oscillations in different degrees of freedom.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1983

Перевод О.С.Виноградовой

Рукопись поступила в издательский отдел  
16 августа 1983 года.