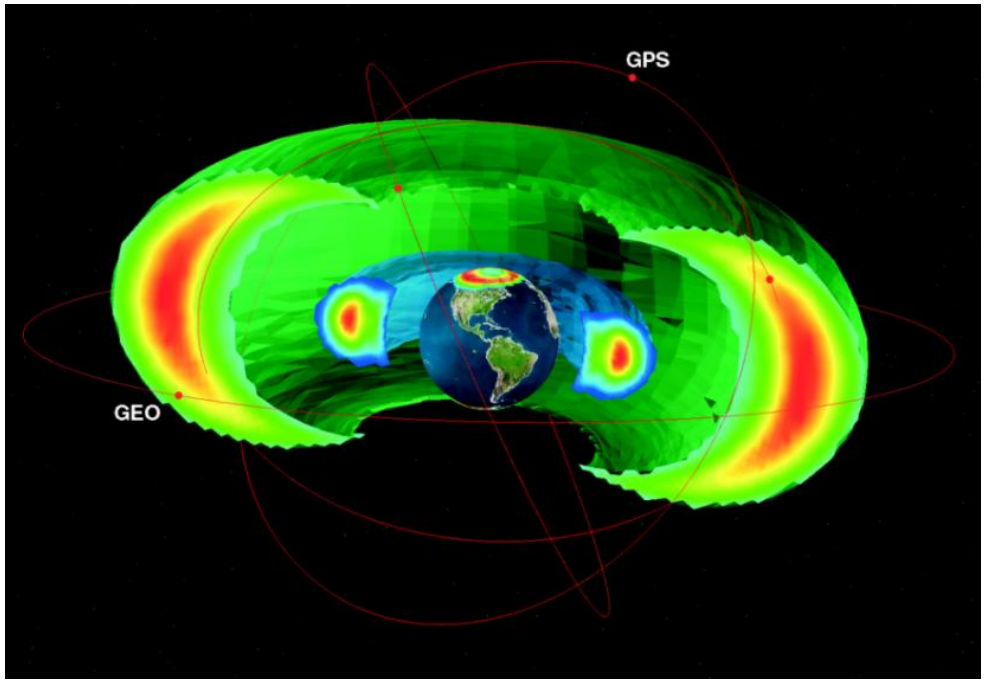
НЕЛИНЕЙНОЕ УСКОРЕНИЕ ЭЛЕКТРОНОВ НАКЛОННЫМИ СВИСТОВЫМИ ВОЛНАМИ: КРИТИЧЕСКОЕ ЗНАЧЕНИЕ АМПЛИТУДЫ ВОЛНЫ

А.В. Артемьев, А.А. Васильев



Space Research Institute
Russian Academy of Science

Взаимодействие волна-частца

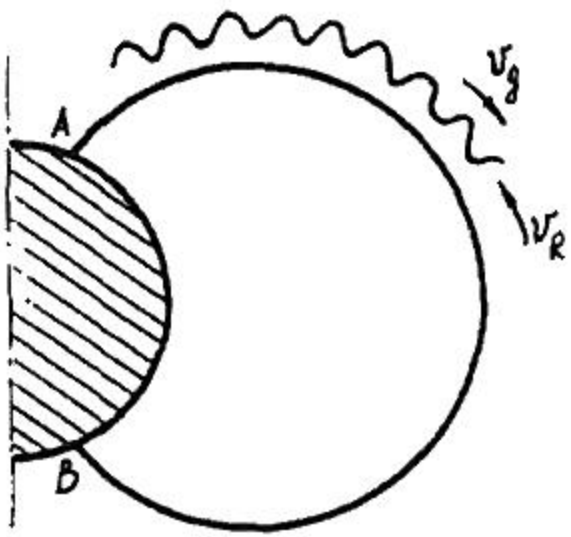
Условия резонанса

$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} = n\omega_c/\gamma,$$

$$\omega_c > \omega\gamma$$

n=-1 **$k_{\parallel}v_{\parallel}<0$**

$$\omega = -kv_{\parallel} - \omega_c / \gamma$$



Karpman et al. 1974

Вблизи резонанса уравнения движения частицы могут быть переписаны в виде уравнения для нелинейного математического маятника с крутящим моментом

$$\frac{d\xi}{dt} = \xi$$

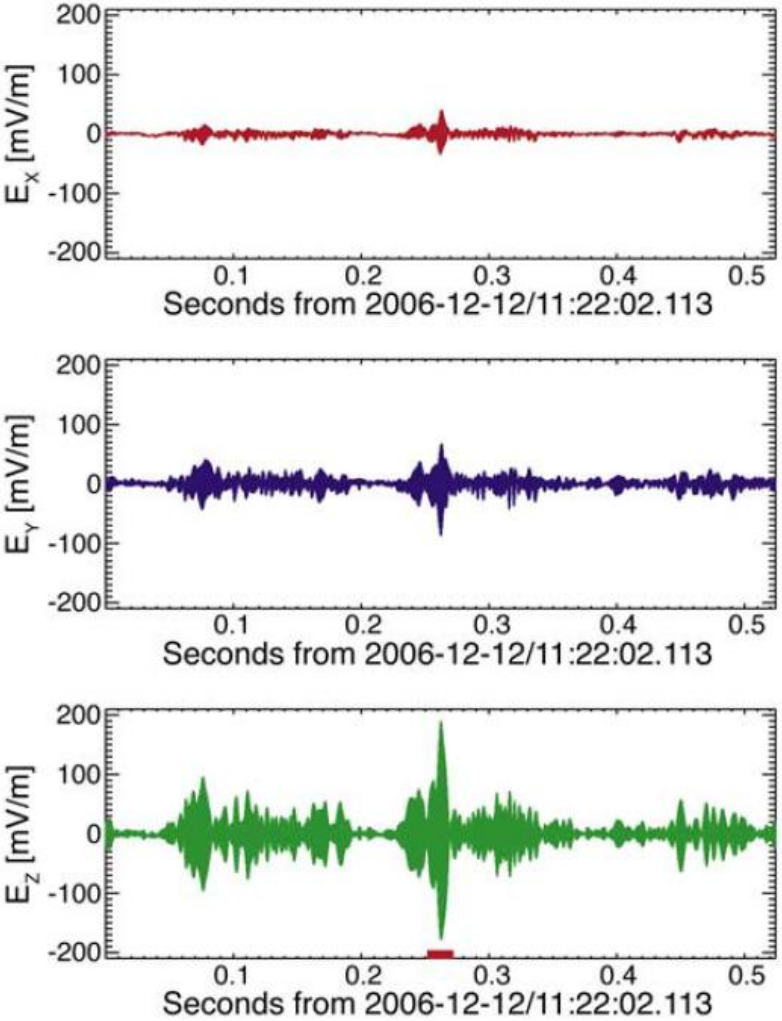
***D. Nunn*, 1971,**
***V.I. Karpman*,, 1975**

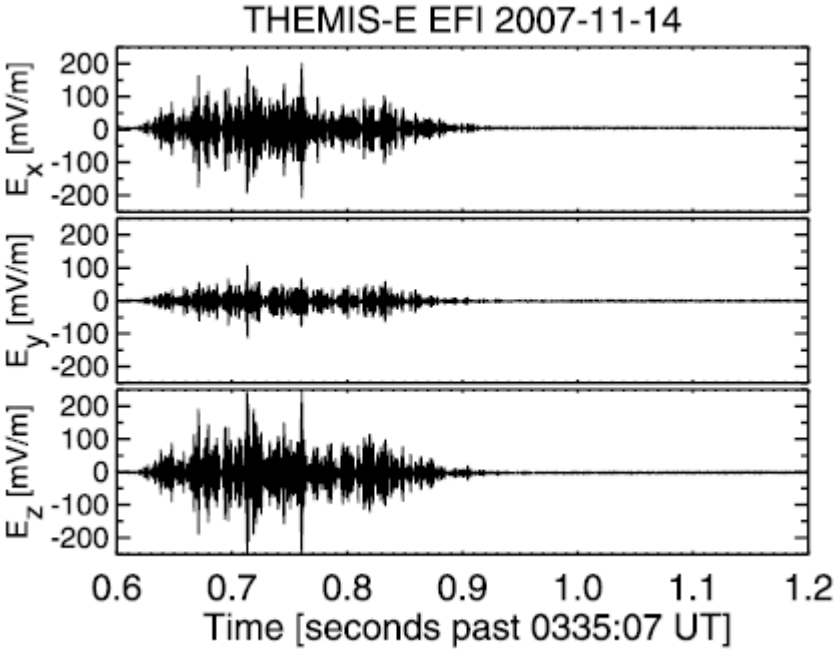
$$\frac{d\xi}{dt} = -\left[-\frac{1}{2\tau^2}\cos 2\xi + \alpha\right]$$

нелинейность **неоднородность**

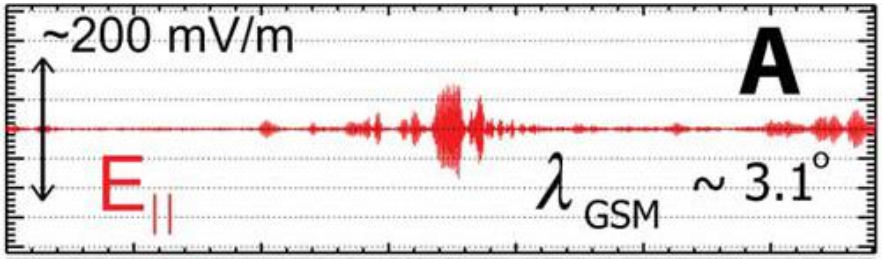
Наблюдения вистлерных волн большой амплитуды

Cattel et al. 2008 GRL





Cully et al. 2008 GRL



Wilson et al. 2011 GRL

Уравнения движения электрона

Эффективное распределение амплитуды волны

$$\phi = \phi_0 + \int^z k_{\parallel}(z')dz' + k_{\perp}x - \omega t$$

$$H = m_e c^2 \gamma - e\Phi_0 u(z) \sin\phi$$

$$\gamma = \sqrt{1 + \frac{p_x^2 + p_z^2}{(m_e c)^2} + \left(\frac{e}{c^2 m} x B(z)\right)^2}$$

n=0, резонанс Ландау
n=-1, циклотронный резонанс

$$H = \gamma - \varepsilon u(z) \sum_n J_n(\eta) \sin\phi_n$$

$$\gamma = \sqrt{1 + p_z^2 + 2I_x \chi b(z)}$$

$$\phi_n = \phi_{0n} + \int^z k_{\parallel}(z')dz' + n\theta - \omega t$$

$$\eta = k_{\perp}\sqrt{2I_x/\chi b(z)}$$

Магнитный момент

$$I_x = \frac{1}{2\pi}\oint p_x dx$$

Условия резонанса

$$\omega - k_{\parallel}(z)v_z = -n\frac{\chi b(z)}{\gamma}$$

Система вблизи резонанса

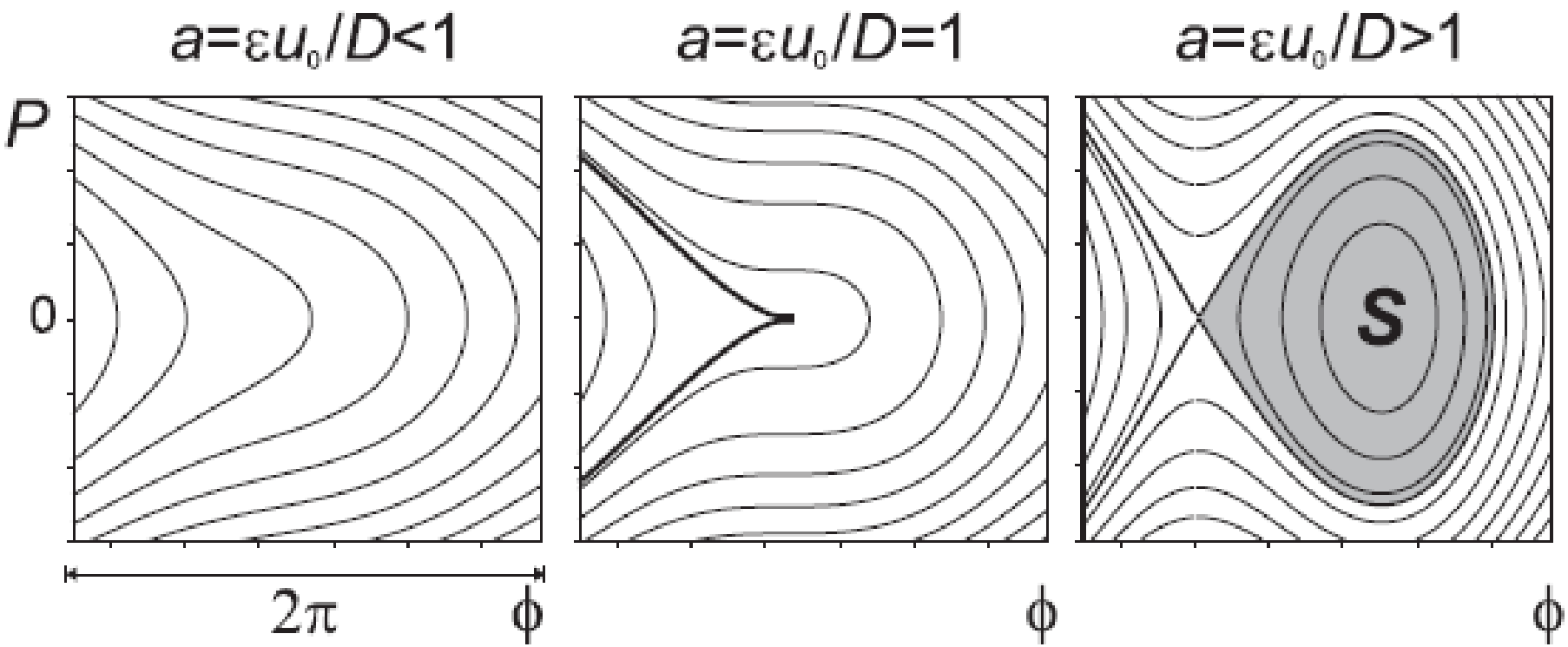
$$H_\phi = \frac{1}{2}\frac{k_\parallel^2}{\gamma_R^2\gamma}P^2 + D(z)\phi - \varepsilon u_0 \sin\phi,$$

$$P = \gamma\gamma_R^2\dot{\phi}/k_\parallel^2$$

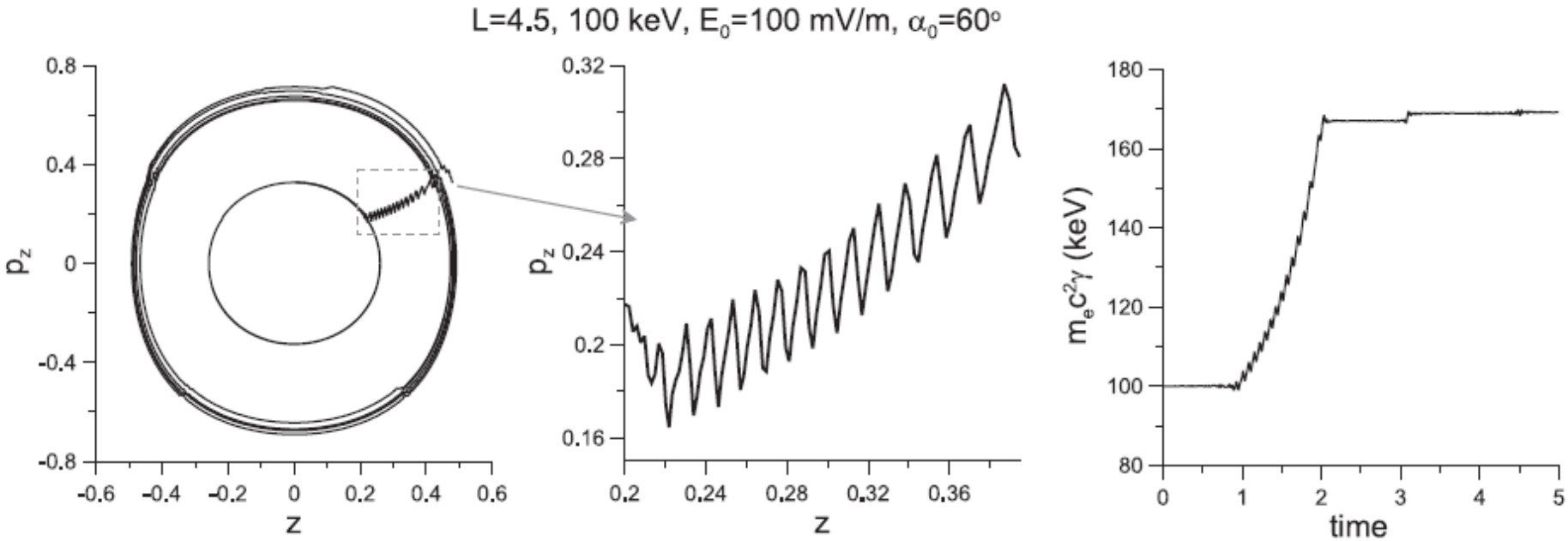
$$\gamma_R = 1/\sqrt{1 - v_R^2}$$

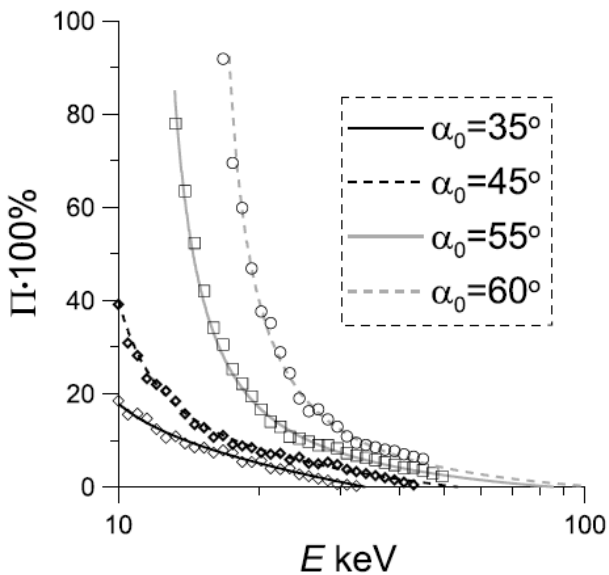
$$\gamma = \gamma_R\sqrt{1 + \xi b}$$

$$v_R(z) = \omega/k_\parallel(z)$$



Захваты





вероятность захвата

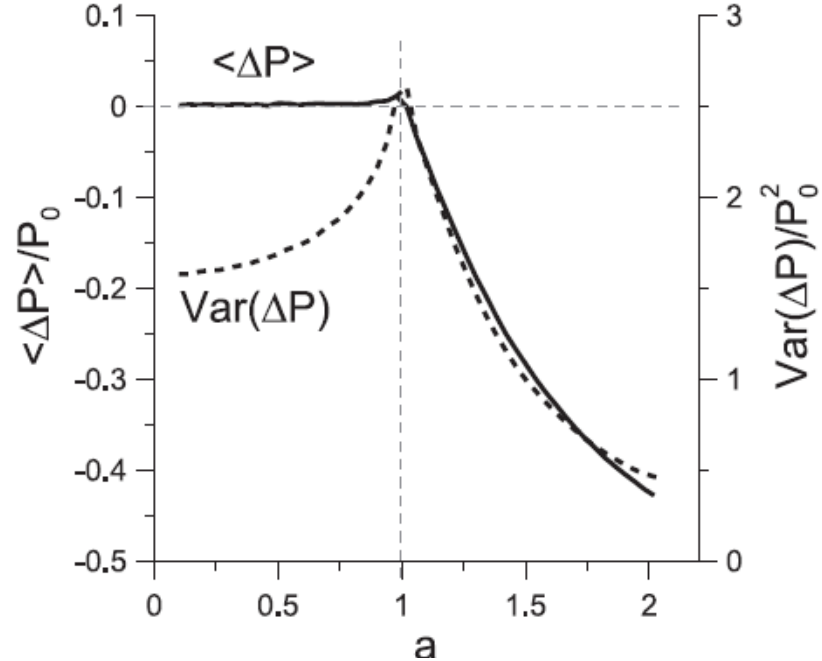
$$\Pi = \frac{\sqrt{\varepsilon}}{4\pi\omega_{pe}k_{\|}D}\frac{\partial S}{\partial z}$$

Рассеяние

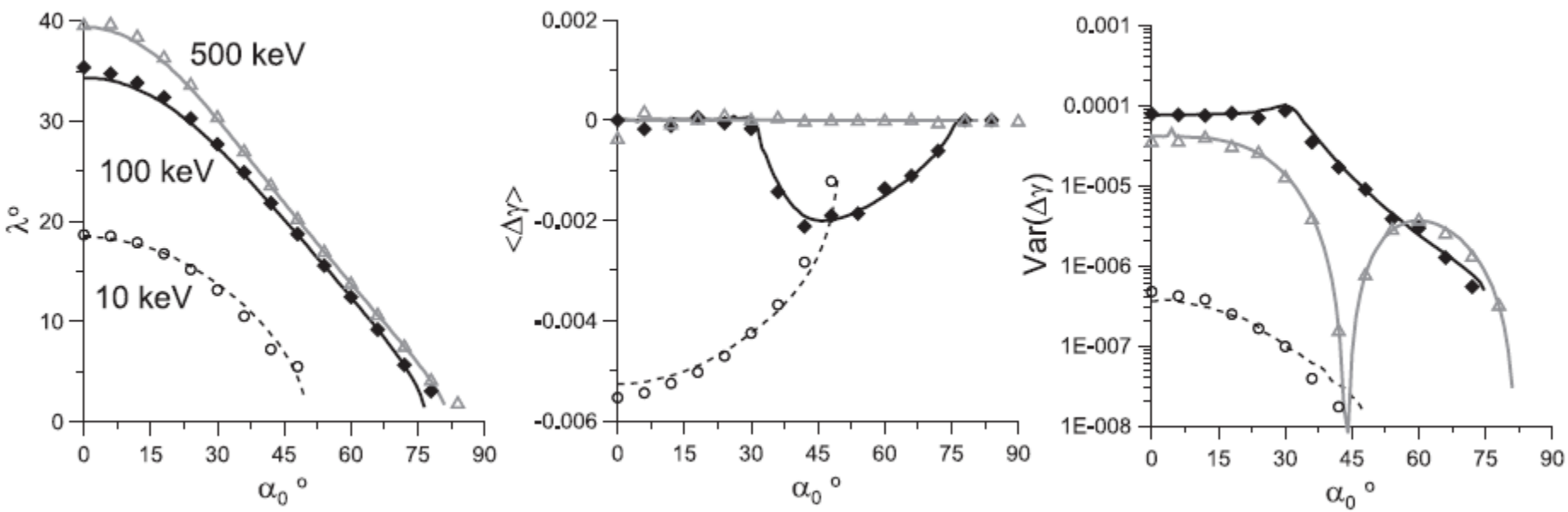
$$H_\phi = \frac{1}{2}\frac{k_\parallel^2}{\gamma_R^2\gamma}P^2 + D(z)\phi - \varepsilon u_0 \sin\phi,$$

$$a = \varepsilon u_0 / D$$

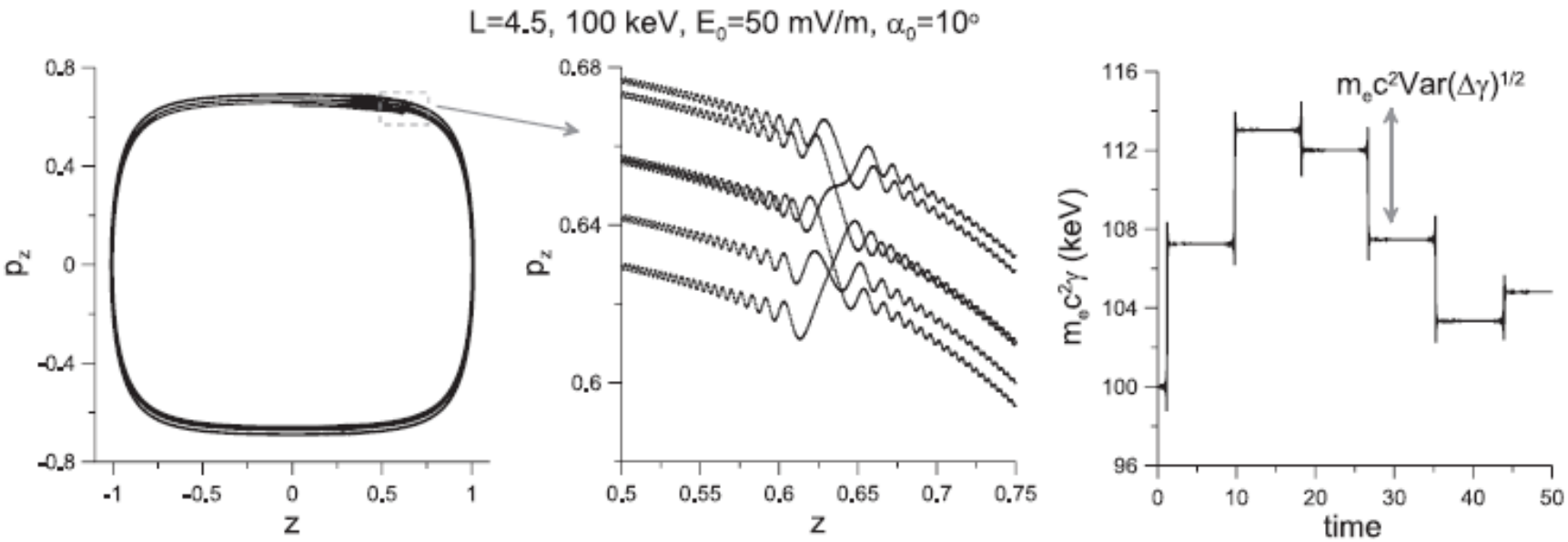
$$\Delta P = \varepsilon u_0 \sqrt{\frac{2\gamma\gamma_R}{k_\parallel^2 D}} f(\theta, a)$$

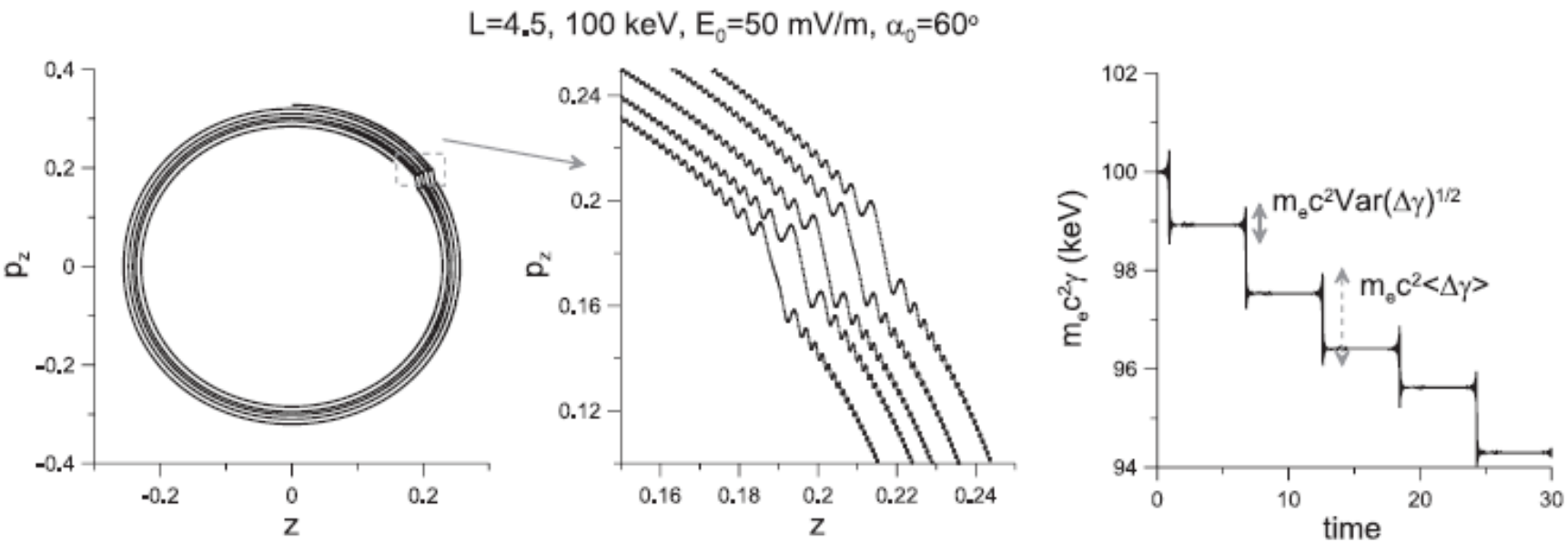


L=4.5, E_0=50 mV/m



Примеры траекторий



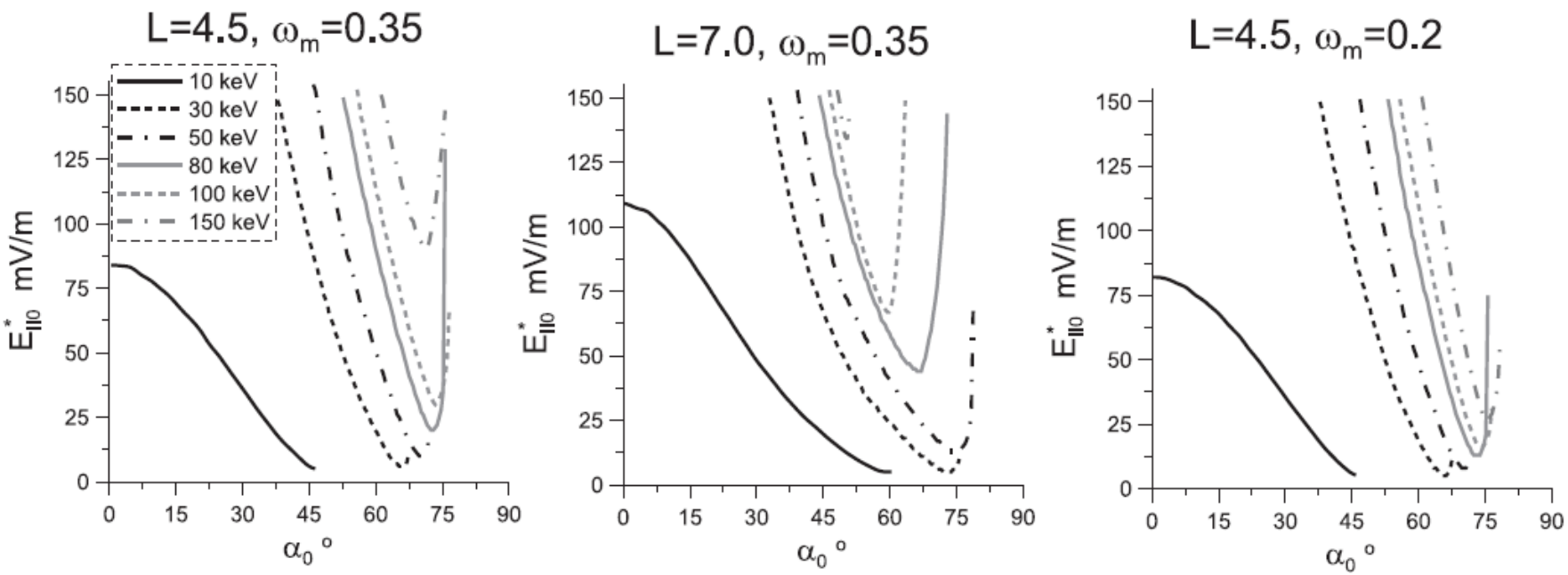


Критическая амплитуда волн

$$\Delta E_{scat} = m_e c^2 (1 - \Pi) \sqrt{\langle \Delta\gamma \rangle^2 + \mathrm{Var}(\Delta\gamma)}$$

$$\Delta E_{trap} = m_e c^2 \Pi \Delta\gamma_{trap},$$

$\Delta E_{trap} > \Delta E_{scat}$ for $E > E^*$



Выводы:

- **Для наблюдаемых значений амплитуд волн и распределений волнового поля вдоль силовых линий магнитного поля получены выражения, описывающие характеристики захвата и рассеяния электронов свистовыми волнами, распространяющимися под большим углом к внешнему полю.**
- **Сопоставлены вариации энергии частиц за счёт захватов и рассеяния**
- **Для электронов с энергиями <150-200 кэВ всегда есть диапазон экваториальных питч-углов, для которых захваты оказываются важнее рассеяния.**
- **Рассеяние электронов на высокоамплитудных волнах носит не диффузионный характер из-за ненулевых средних скачков энергии и питч-угла.**