

**S-, P- и R- страты в инертных газах с точки зрения нелинейной динамики***Ю. Б. Голубовский, Т. В. Гуркова*

Санкт-Петербургский государственный университет

Стратификация классического тлеющего разряда является одной из фундаментальных проблем физики неравновесной плазмы, которой посвящены сотни работ за последние десятилетия. Страты являются примером самоорганизации разряда в виде ионизационных волн, распространяющихся вдоль положительного столба. В последнее время достигнуты значительные успехи в понимании механизма стратификации, основанные на применении нелокальной кинетики электронов в пространственно периодических синусоидально модулированных неоднородных полях.

В настоящей работе развивается динамический подход [1,2] к анализу фазовых траекторий электронов. Анализируется поведение электронной компоненты плазмы при наборе энергии вплоть до порога возбуждения в отсутствие упругих ударов. В кинетической теории этот случай игнорируется, поскольку функции распределения воспроизводятся от периода к периоду, и отсутствует диссипация. С точки зрения динамики этот случай наиболее важен, поскольку появляется пространственный масштаб периодического поля, который отвечает за целочисленные и нецелочисленные резонансы.

Рассматривается уравнение движения для кинетической энергии  $w(x)$  электронов, движущихся с сохранением полной энергии в синусоидально модулированных полях  $E(x)$  вида:

$$E(x) = E_0 \left( 1 + \alpha \cos \left( \frac{2\pi x}{L} \right) \right), \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{dw(x)}{dx} = eE(x) - \varepsilon_{ex} \sum_n \delta(x - x_n) \\ w|_{x=0} = 0, \quad w|_{x_{n-0}} = \varepsilon_{ex}, \quad w|_{x_{n+0}} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

здесь  $E_0$  - постоянное электрическое поле,  $\alpha$  - глубина модуляции поля,  $L$  - пространственный период поля,  $e$  - заряд электрона,  $\varepsilon_{ex}$  - энергия порога возбуждения. Последний член в правой части уравнения (2) - потенциальная гребенка Дирака - описывает неупругий удар с потерей кванта энергии  $\varepsilon_{ex}$ .

В качестве примера на рис. 1 представлены траектории движения электронов в фазовой плоскости  $(w, x)$ , полученные на основе анализа решения уравнения (2) для нулевой начальной кинетической энергии и различных длин пространственного периода  $L = L_0$  и  $L = L_0 \pm \Delta L$ , где  $L_0$  - резонансная длина,  $\Delta L = 0.2L_0$ .

Воспроизведение траекторий с определенным периодом означает, что можно ожидать резонансных значений периодов поля, кратных  $L_0$ .

Предлагается интерпретация наблюдаемых в экспериментах S-, P- и R- страт, как основной резонанс, вторая гармоника и нецелочисленный резонанс, соответствующий  $2/3$  от основного резонанса. Анализируется решение уравнения (2) с целью выяснения остроты полученных резонансов. Для этого были выполнены расчеты необходимого количества неупругих ударов  $k$  для воспроизведения траектории электронов в широком диапазоне длин пространственных периодов  $0.2 < L/L_0 < 1.1$  (рис.2). Из рис. 2 видно, что имеют место отчетливые резонансы на длинах  $L = L_0$  (S-страта),  $L = \frac{1}{2} L_0$  (P-страта),  $L = \frac{2}{3} L_0$  (R-страта),  $L = \frac{1}{3} L_0$  (Q-страта).

Динамический подход устраняет основные затруднения кинетической теории, связанные с большой длиной пространственного установления функции распределения, намного превышающей длину положительного столба. Проанализирована роль малых потерь энергии в упругих ударах. Показано, что в этом случае фазовые траектории стягиваются к аттракторам, которым в кинетической теории соответствуют резонансные траектории (рис. 3).

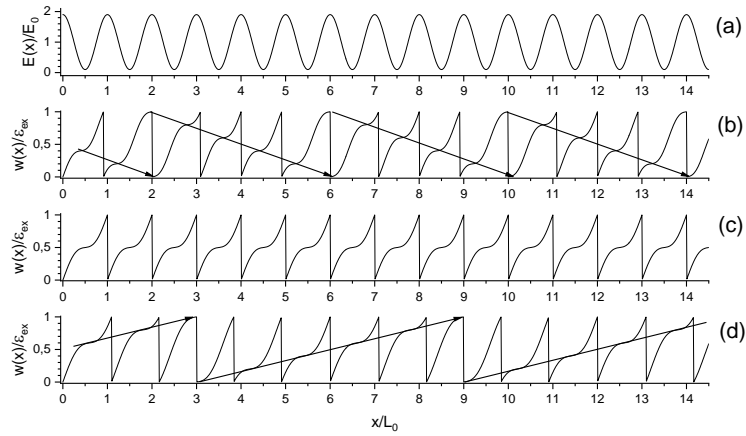


Рис. 1. Фазовые траектории электронов в периодическом электрическом поле (a) с пространственным периодом  $L = L_0 - \Delta L$  (b),  $L = L_0$  (c) и  $L = L_0 + \Delta L$  (d).

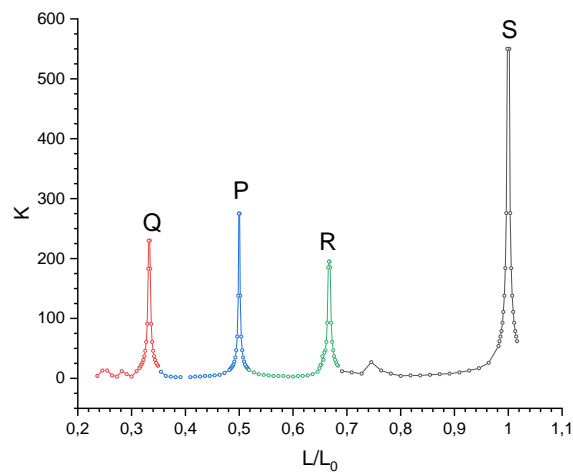


Рис. 2. Зависимость числа неупругих ударов  $k$ , необходимых для воспроизведения решения, от длины пространственного периода  $L$ .

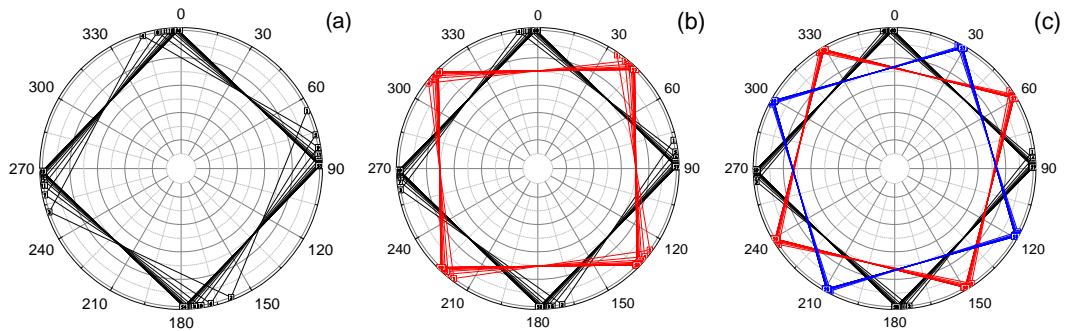


Рис. 3. Фазовые траектории движения электронов в случае малых потерь на упругие удары для S-страт (a), P-страт (b) и R-страт (c) для различных начальных кинетических энергий.

### Литература

1. Golubovskii Y., Pelyukhova E., Sigener F., Nekuchaev V. Stratification of discharge in noble gases from the viewpoint of the discrete dynamics// Phys.Plasmas 22, 032105 (2015).
2. Golubovskii Y., Valin S., Pelyukhova E., Nekuchaev V., Sigener F. Discharge stratification in noble gases as convergence of electron phase trajectories to attractors// Phys.Plasmas 23, 123518 (2016).