

# NONLINEAR WAVES AND COHERENT STRUCTURES IN LASER-INDUCED PLASMAS AND POLARIZED VACUUM

*S. I. Tzenov* \*

Extreme Light Infrastructure — Nuclear Physics, Magurele, Bucharest, Romania

Starting from the Vlasov–Maxwell equations describing the dynamics of various species in a free quasi-neutral plasma, an exact relativistic hydrodynamic closure for a special type of water-bag distributions, satisfying the Vlasov equation, has been derived. It has been shown that the set of equations for the macroscopic hydrodynamic variables coupled to the wave equations for the self-consistent electromagnetic field is equivalent to the Vlasov–Maxwell system. In the case of magnetized quasi-neutral plasma, the hydrodynamic substitution has been used to derive the hydrodynamic equations for the plasma density and current velocity, coupled to the wave equations for the self-consistent electromagnetic fields.

Based on the method of multiple scales, a system comprising a vector nonlinear Schrödinger equation for the transverse envelopes of the self-consistent plasma wakefield, coupled to a scalar nonlinear Schrödinger equation for the electron current velocity envelope for free plasma, has been derived. In the case of magnetized plasma, it has been shown that the whistler wave envelopes of the three basic modes satisfy a system of three coupled nonlinear Schrödinger equations.

Numerical examples for typical plasma parameters have been presented, which demonstrate the relevance of the results obtained for the so-called shock laser-plasma acceleration. In addition, it has been shown that in the case of magnetized plasma, the whistler waves considerably facilitate the transverse confinement.

The effect of the nonlinear corrections to the electric displacement vector and the intensity of the magnetic field in nonlinear electrodynamics of Heisenberg–Euler type has been studied. It has been shown that the slowly varying wave envelope in free polarized vacuum satisfies a nonlinear wave equation. In the case where an external constant magnetic field is applied, the single nonlinear wave equation should be replaced by a system of two coupled nonlinear equations for the two independent wave polarizations. In both cases, a novel effect of light speed reduction can be observed, which is due to the vacuum polarization.

Исходя из уравнений Власова–Максвелла, описывающих динамику различных видов в свободной квазинейтральной плазме, получено точное релятивистское гидро-

---

\*E-mail: [stephan.tzenov@eli-np.ro](mailto:stephan.tzenov@eli-np.ro)

динамическое замыкание для специального вида распределений типа водяных мешков, удовлетворяющих уравнению Власова. Показано, что система уравнений для макроскопических гидродинамических переменных, связанных с волновыми уравнениями для самосогласованного электромагнитного поля, эквивалентна системе Власова–Максвелла. В случае замагниченной квазинейтральной плазмы гидродинамическое замещение использовалось для получения гидродинамических уравнений для плотности плазмы и скорости тока, связанных с волновыми уравнениями для самосогласованных электромагнитных полей.

На основе метода множественных масштабов получена система, содержащая векторное нелинейное уравнение Шредингера для поперечных огибающих самосогласованного плазменного волнового поля, связанного со скалярным нелинейным уравнением Шредингера для огибающей скорости тока электрона для свободной плазмы. В случае замагниченной плазмы показано, что огибающие вистлеровской волны трех основных мод удовлетворяют системе трех связанных нелинейных уравнений Шредингера.

Приведены численные примеры типичных параметров плазмы, которые демонстрируют актуальность полученных результатов для так называемого ударного лазерно-плазменного ускорения. Кроме того, показано, что в случае замагниченной плазмы волны вистлера способствуют значительному усилению удержания ускоренного пучка в поперечном направлении.

Изучено влияние нелинейных поправок к вектору электрического смещения и напряженности магнитного поля в нелинейной электродинамике типа Гейзенберга–Эйлера. Показано, что медленно меняющаяся огибающая волны в свободном поляризованном вакууме удовлетворяет нелинейному волновому уравнению. В присутствии постоянного магнитного поля это нелинейное волновое уравнение должно быть заменено системой двух связанных нелинейных волновых уравнений для двух независимых поляризаций волны. В обоих случаях можно наблюдать новый эффект уменьшения скорости света, что связано с поляризацией вакуума.

PACS: 52.38.-r; 52.38.Kd; 03.50.De; 03.50.Kk