

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБМЕННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ И ПОЗИТРОННЫХ ПОТОКОВ

С.А. Хриткин

*Московский государственный институт электроники и математики
(технический университет)*

A simulation of the exchange interaction in electron-positron matter, leading to the dynamic compensation of the Coulomb field and self-organization of the active medium in the form of macroscopic quantum superplasmoid is implemented. The results of calculations of potential distribution and the distributions of amplitudes and phases of single-particle wave functions with exchange interaction of electron and positron bunches is showing.

1. Моделирование обменного взаимодействия в электронно-позитронной среде проводится в рамках научного направления – гамма-электроника, в котором анализируется взаимодействие электронных и позитронных потоков с электромагнитным полем в гамма-диапазоне длин волн [1]. Электронно-позитронные пары могут образовываться в результате воздействия мощного импульса гамма-квантов на различные среды с плотностью частиц, соответствующей или существенно превышающей плотности атмосферного воздуха.

Исследуются резонансные эффекты при обменном взаимодействии в электронно-позитронном веществе, ведущие к самоорганизации активной среды. В основе метода моделирования лежит предположение о возможности создания квантового макроплазмоида в виде большой капли электронно-позитронной жидкости. Используется принцип тождественности при зарядовом сопряжении групп электронов и позитронов с равным числом частиц. При определенных условиях частицы переходят в единое макроскопическое квантовое состояние с большим временем жизни и свойствами сверхтекучести. В квантовом макроплазмоиде макроскопические волновые функции электронов и позитронов становятся одинаковыми и макроплазмоид приобретает свойства сверхплазмоида [1].

В свободном состоянии сверхплазмоид имеет форму шара. Вблизи неоднородностей он проявляет свойства сверхпроникновения, прежде всего, сверхпроникновение в диэлектрик. Обменные процессы в шаре моделируются с использованием макроскопических волновых функций электронов и позитронов квантовой теории. В частности, показано, что равенство волновых функций электронов и позитронов, а также прохождение плазмоида сквозь диэлектрик без изменения свойств возможно в случае динамической компенсации кулоновского поля.

Резонансные эффекты при квантовом обменном взаимодействии ведут к резонансной самоорганизации активного объема заряженной среды и продолжаются вплоть до динамической компенсации

кулоновского поля и установления динамической электронно-позитронной моды. Отметим тесную связь эффекта тождественности при зарядовом сопряжении и эффекта динамической компенсации кулоновского поля во всем объеме. Наиболее важны резонансы, приводящие к компенсации кулоновского поля с получением квантового электронно-позитронного макроплазмоида.

Процессы обменного взаимодействия в электронно-позитронном веществе анализируются в рамках метода крупных частиц классической теории [2] и с использованием макроскопических волновых функций электронов и позитронов квантовой теории [1,3]. Установление связи волновой модели квантовой теории и модели крупных частиц полезно для понимания роли характерных расстояний между частицами.

Проводится совместное решение уравнений Шредингера и Пуассона для макроскопических волновых функций электронов и позитронов. Моделирование процессов проводится в несколько этапов. Сначала показывается возможность получения сгущений зарядов одного знака, затем рассматривается влияние сил пространственного заряда на взаимодействие сгущений разного знака.

2. Для описания коллективных процессов в электронно-позитронно-ионной бесстолкновительной плазме, согласно общей методике [1], вводятся макроскопические одночастичные волновые функции электронов и позитронов с выделенными амплитудами и фазами

$$\Psi_e(x, y, z, t), \Psi_p(x, y, z, t), \Psi_i(x, y, z, t), \Psi_{e,p,i} = |\Psi_{e,p,i}| \exp(iS_{e,p,i}),$$

связанные с плотностью заряда выражениями

$$|\Psi_e|^2 = n_e, \quad |\Psi_p|^2 = n_p, \quad |\Psi_i|^2 = n_i.$$

Введение таких функций означает, что в физически малом объеме V_Φ все однотипные частицы (электроны, позитроны или ионы) ведут себя упорядочено и одинаково как тождественные частицы без близких (парных, тройных и других дискретных) взаимодействий.

Во всех случаях важна тесная связь плотностей заряда и потенциала $\Phi(x, y, z, t)$ в уравнении Пуассона

$$\Delta\Phi = \frac{|e|}{\varepsilon} \left(|\Psi_e|^2 - |\Psi_p|^2 - Z|\Psi_i|^2 \right).$$

Уравнения Шредингера для волновых функций имеют вид

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_e}{\partial t} = H_e \Psi_e, \quad H_e = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U_e,$$

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_p}{\partial t} = H_p \Psi_p, \quad H_p = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + U_p,$$

$$i\hbar \frac{\partial \Psi_i}{\partial t} = H_i \Psi_i, \quad H_i = -\frac{\hbar^2}{2M} \Delta + U_i,$$

где U_e , U_p , U_i – потенциальные энергии электронов, позитронов и ионов (заряд $Z|e|$) в кулоновском поле с потенциалом $\Phi(x, y, z, t)$,

$$U_e = -|e| \Phi, \quad U_p = |e| \Phi, \quad U_i = Z|e| \Phi.$$

В более общем случае при учете магнитного поля в нерелятивистском пределе для частиц с нулевым спином уравнение Шредингера записывается с учетом обобщенного импульса, содержащего векторный потенциал \vec{A}

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[\frac{1}{2m} \left(\vec{p} - \frac{e}{c} \vec{A} \right)^2 + e\Phi \right] \Psi.$$

Для уточнения модели полагаем, что в начальный момент времени сгущения электронов и позитронов имеют вид шаровых облаков, радиусы которых не больше комптоновской длины волны ($\sim 4.10^{-11}$ см) и могут быть близки к классическому радиусу электрона $r_0 = 10^{-13}$ см. Вложенные друг в друга, одинаковые во всем, кроме знака заряда, шаровые облака (сгустки) электронов e^+ и позитронов e^- вместе образуют электронно-позитронную пару (микрокаплю конденсата).

Находятся выражения для плотности вероятности частиц $n = \Psi\Psi^*$ и плотности потока вероятности \mathbf{j}

$$n = \frac{\hbar}{2imc^2} \left[\Psi \frac{d\Psi^*}{dt} - \Psi^* \frac{d\Psi}{dt} \right] - \frac{e}{mc^2} \Phi \Psi \Psi^*,$$

$$\mathbf{j} = \frac{i\hbar e}{2m} \left[\Psi \text{grad} \Psi^* - \Psi^* \text{grad} \Psi \right] - \frac{e}{mc^2} \Psi \Psi^* \mathbf{A}.$$

В нашем случае рассмотрения макроскопических квантовых состояний величина n является плотностью частиц, а вектор \mathbf{j} – вектор плотности потока частиц. Такой подход типичен для задач теории сверхжидкостей.

Волновое уравнение можно считать уравнением для потенциала поля Ψ , создаваемого электронно-позитронными или электронно-дырочными парами, отвечающее за силовое взаимодействие. Функцию Ψ следует рассматривать как двухчастичный оператор в пространстве чисел заполнения теории вторичного квантования. Он имеет отличные от нуля матричные элементы, соответствующие поглощению электрона и рождению позитрона.

3. Для получения резонансного эффекта среднее расстояние между центрами частиц выбирается меньшим или порядка радиуса действия кулоновских сил. Эффект обмена в стандартном виде наблюдается уже в начальные промежутки времени t . Распределение заряда дается линиями

уровней потенциала $\Phi(x, y)$. В начальные моменты времени кулоновский потенциал характеризуется наличием узкой щели между двумя областями заряда при $y = 2,5$ (рис. 1).

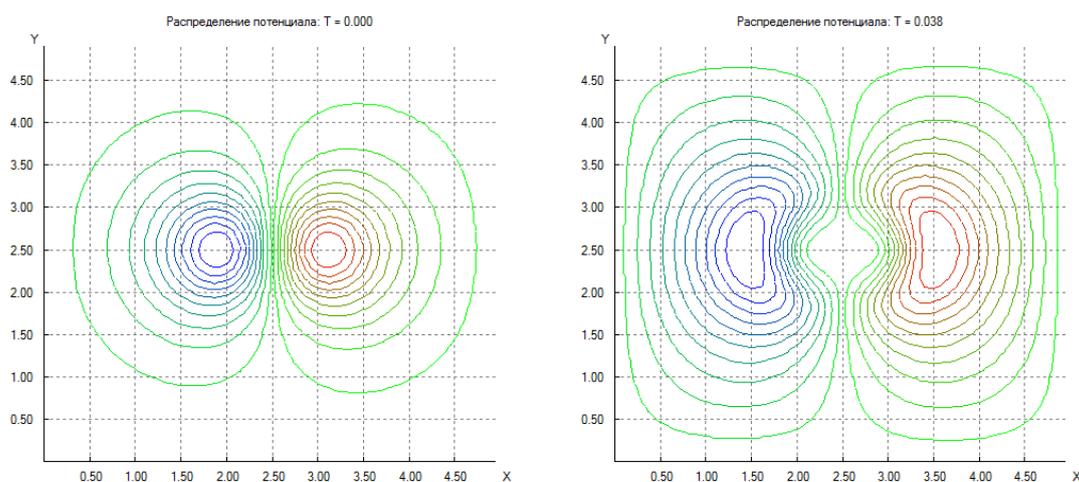


Рис.1. Уровни потенциала $\Phi(x, y)$ при двухчастичном обмене зарядами в начальный момент времени $t=0$ (слева) и в момент образования щели $t=0,038$ (справа)

Под действием кулоновских сил амплитуды волновых функций сгустков электронов и позитронов изменяются, их центры смещаются навстречу друг к другу, в результате чего возникает общий центр с одинаковым распределением волновых функций электронов и позитронов. Этот результат иллюстрируется на картине линий уровней волновых функций электронов Ψ^- и позитронов Ψ^+ для резонансного обменного процесса, происходящего в пределах одного периода обменных колебаний (рис. 2).

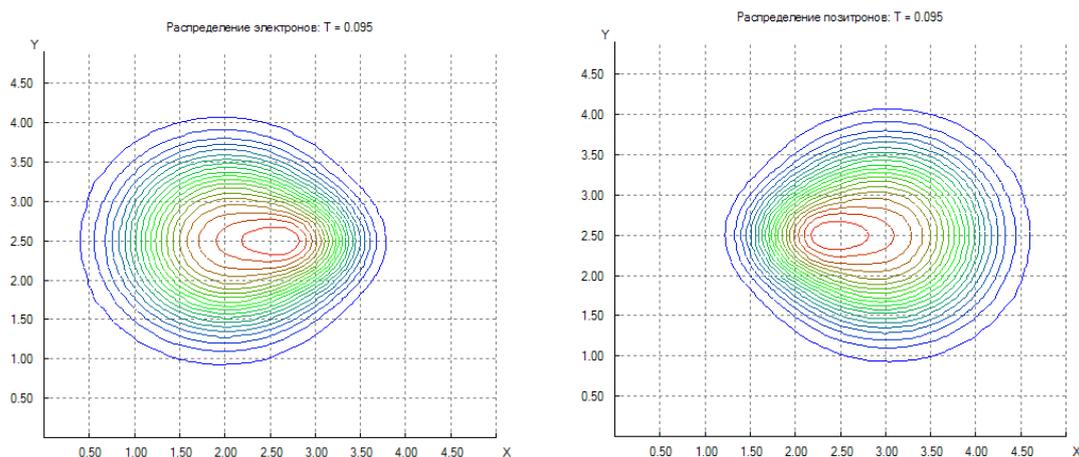


Рис.2. Распределения амплитуд одночастичных волновых функций электронов Ψ^- (слева) и позитронов Ψ^+ (справа) с общим центром $x = 2,5$.

Распределения фаз волновых функций электронов и позитронов (рис. 3) характеризуется несколькими максимумами и минимумами.

Действие кулоновских сил между сгустками частиц разного знака приводит к возникновению градиента фаз одночастичных волновых функций, что обуславливает более сложный характер полученных распределений по сравнению с зависимостями на рис.2.

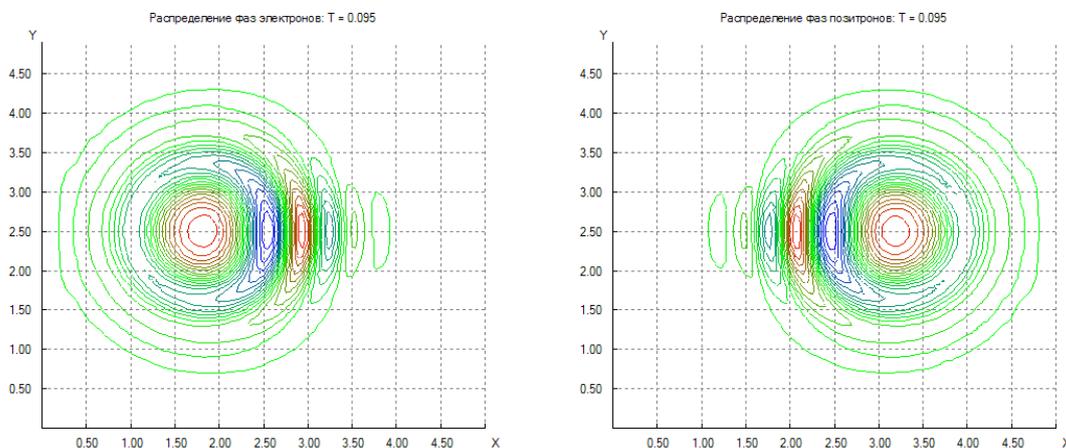


Рис. 3. Распределения фаз одночастичных волновых функций электронов Ψ^- (слева) и позитронов Ψ^+ (справа) с общим центром $x = 2,5$

Проведенные расчеты показали, что в квантовой электронике, как и в электронике СВЧ, процессы обменного взаимодействия могут происходить в кинематическом приближении при малом влиянии кулоновских сил и в режиме пространственного заряда при достаточно больших кулоновских силах. Показано, что при увеличении плотности сгустков (увеличении нелинейности) периодический волновой процесс переходит в неперiodический процесс смещения центров волновых функций электронов и позитронов. При достижении сближения волновых центров осуществляется компенсация кулоновского поля.

1. Канавец В.И. Электронно-позитронное вещество: от позитрония до сверхжидкости и шаровой молнии. М.: Изд-во «Педагогическое общество». 2009.
2. Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А. Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Новосибирск: Наука. 1991.
3. Канавец В.И., Мозговой Ю.Д., Хриткин С.А. Обменное взаимодействие электронных и позитронных сгустков. //Радиотехника и электроника. Т. 55. №4. 2010. С. 500