

Материальные поля фермионов в квантовой механике и их динамика

Андреев П.А.

МГУ им. М.В. Ломоносова, физический факультет

Для исследования физических эффектов, в которых существенны пространственно-временные распределения частиц и полей, необходимы уравнения квантовой гидродинамики, в которых физические характеристики системы представлены в виде материальных полей в трёхмерном пространстве. Такая физическая ситуация возникает, например, в задачах спинтроники, связанных с движением частиц с собственным магнитным моментом во внешних полях [1], при возбуждении и распространении спиновых волн [2] и т.п..

Уравнения квантовой гидродинамики для системы заряженных частиц, обладающих собственным магнитным моментом, с учётом кулоновских и спин-спиновых взаимодействий были получены в работе [3]. В работе [4] учтён вклад спин-токового взаимодействия в уравнение баланса импульса и магнитного момента на основании гамильтониана Брейта без томасовской «половинки».

Принимая во внимание вклад, в векторный потенциал магнитного поля, от магнитного момента, аналогично [5], функция Гамильтона, учитывающая взаимодействие магнитного момента с магнитными моментами и токами других частиц может быть представлена в виде

$$H = \sum_{p=1}^N \left(\frac{1}{2m_p} D_p^2 + e_p \varphi_p^{ext} - \mu_p^\alpha B_{p(ext)}^\alpha \right) + \frac{1}{2} \sum_{p,n,p \neq n}^N (e_p e_n G_{pn} - \mu_p^\alpha \mu_n^\beta G_{pn}^\alpha), \quad (1)$$

Где через D_p обозначен обобщённый импульс, содержащий векторный потенциал внешнего поля и поля магнитных моментов. Взаимодействие токов учитывается в уравнениях квантовой гидродинамики на основе принципа суперпозиции магнитных полей.

На основе уравнения Шредингера с гамильтонианом, возникающим путём квантования (1), и учитывающего, наряду с кулоновским и спин-спиновым, спин-токовое взаимодействие частиц, можно получить систему уравнений баланса числа частиц, импульса, собственного магнитного момента и энергии. С этой целью получены явные выражения для квантовых корреляций через волновые функции системы, а также найдены выражения для тензоров давления и плотности потока магнитного момента через спиноры системы частиц. В работе [4] уравнения баланса импульса и магнитного момента получены в приближении самосогласованного поля.

Методом, предложенным в работе [3], введено поле скоростей в квантовые уравнения баланса, что в частности позволило получить уравнение баланса внутренней энергии, которое является основным уравнением неравновесной квантовой термодинамики. Получены явные выражения вектора плотности потока энергии и скалярного поля плотности работы сил взаимодействия между частицами через волновые спиноры системы частиц.

Для задач связанных с распространением и дисперсией волн, возбуждением волн внешними полями преобладающим является механизм взаимодействия через самосогласованное поле. Исходя из уравнений баланса в работе получена система уравнений квантовой гидродинамики в приближении самосогласованного поля. Эта система уравнений является незамкнутой, так как содержит тензор кинетического давления и тензор плотности потока магнитного момента. Используя метод, развитый в работе [6], и явный вид тензоров кинетического давления и плотности потока магнитного момента, для этих величин получено явное выражение через произвольные одночастичные волновые спиноры. В приближении самосогласованного поля отсюда получаем связь тензоров кинетического давления и плотности потока магнитного момента

с концентрацией и намагниченностью. Таким образом получена замкнутая система уравнений квантовой гидродинамики системы многих взаимодействующих частиц.

Литература

1. I. Zutic, J. Fabian, and S. Das Sarma Spintronics: Fundamentals and applications// Rev. Mod. Phys., V.76.P.323(2004).
2. Paulo F. Farinas Electron paramagnetic spin-wave effects on the transport current through a semimagnetic semiconductor layer // Phys. Rev. B., V.64.P.161310(2001)
3. Кузьменков Л. С., Максимов С. Г., Федосеев В. В. Микроскопическая квантовая гидродинамика систем фермионов 1. //ТМФ. 126,N1,с.136(2001)
4. Харабадзе Д.Э. Учет спин-токового взаимодействия при помощи гамильтониана Брейта в гидродинамическом методе.//Вестн. Моск. ун-та. Физ. Астрон.,N6.,с.10.(2005)
5. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория поля.М.:Наука,1989.
6. Кузьменков Л. С., Максимов С. Г., Федосеев В. В. Микроскопическая квантовая гидродинамика систем фермионов 2. //ТМФ. 126.N.2.,С.258(2001)