

УДК 530.145: 535.14

СВОЙСТВА СИСТЕМЫ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ КВАЗИЧАСТИЦ ВНЕ РАМОК ТЕОРИИ ВОЗМУЩЕНИЙ

Анатолий Анатольевич Аникьев¹

доктор физико-математических наук, профессор

aaanikiev@mail.ru

Эмилия Николаевна Аникьева²

старший преподаватель

korol_0909@mail.ru

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э.

Баумана

г. Москва, Россия

²Мичуринский государственный аграрный университет

г. Мичуринск, Россия

Аннотация. Рассмотрены подходы к оценке спектральных параметров эволюции систем не использующие стандартную теорию возмущений в квантовой механике и квантовой теории поля. На примере лагранжиана учитывающего парные и тройные взаимодействия квазичастиц проведены расчеты уравнений движения квазичастиц и получены параметры эволюции полевых функций во всех порядках теории возмущений как без учета диссипации, так и с учетом диссипации в системе. Показано, что без учета диссипации система обладает периодическим нелинейным движением, а при учете диссипации, происходит нарушение группы симметрии системы и в ней наблюдается фазовый переход, сопровождающийся уменьшением фазового объема.

Ключевые слова: диссипация, фазовый объем, квазичастицы, парное взаимодействие.

Введение

Теория возмущения является основным инструментом при оценке заряда и массы взаимодействующих частиц в квантовой механике и квантовой теории поля. Взаимодействие приводит к перенормировке массы и заряда элементарных частиц и возможности сравнения полученных параметров с массами и зарядами, измеренными экспериментально. До настоящего времени не разработана теория, позволяющая выполнить аналитические вычисления заряда и массы частиц, поэтому вводятся некоторые затравочные значения.

Теория струн, расширенная введением понятия суперсимметрии возможно позволит получить результаты Стандартной модели элементарных частиц, но пока проверка результатов этой теории технически не достижима, поскольку она оперирует с величинами порядка планковских размеров (длина $\sim 10^{-33}$ см) и планковских времен ($\sim 10^{-44}$ с). В теории струн, основной целью которой является объединение всех видов взаимодействий, именно на планковских масштабах и планковских временах возможно объединение сил гравитационного взаимодействия и взаимодействий в физике элементарных частиц – слабого, сильного и электромагнитного, поскольку в этой области флуктуации гравитационного потенциала сравнимы с комптоновской длиной волны релятивистских элементарных частиц.

Основным недостатком классической квантовой теории поля является представление о точечном взаимодействии частиц, т.е. частица представлена как некоторое образование, обладающее массой и зарядом, но не имеющее размера. Поэтому при изучении сильных взаимодействий, например, теория возмущений – разложение по малому параметру – константе связи оказывается не применимой, поскольку константа связи велика. При малых значениях констант взаимодействия последовательные члены ряда возмущений также могут содержать особенности, например, при вычислении параметров электрона с учетом радиационных поправок [1], в ряду теории возмущений имеются члены неограниченно возрастающие при приближении импульса электрона к поверхности светового конуса фотонов ($p_\phi = mc$), - так называемая

«инфракрасная» катастрофа. Аналогичная «ультрафиолетовая» катастрофа возникает, когда вычисляются поправки к параметрам частиц в области больших импульсов.

Существуют методы борьбы с недостатками теории возмущений, например, в случае инфракрасной катастрофы в собственно-энергетической части электрона, учитывающего излучение фотонов (радиационные поправки) вводится некая «затравочная» масса фотонов, а для ультрафиолетовой асимптотики в пропагаторе фотонов приходится вводить обрезание по импульсам при больших значениях импульса. В этой связи приходится искать пути выхода за рамки теории возмущений. Таких направлений можно насчитать четыре. Первое – дисперсионные соотношения Крамерса – Кронига, связывающие действительную и мнимую части комплексной функции через интеграл по полюсам типа Коши.

В физических процессах комплексной функцией выступает амплитуда двухчастичного рассеяния с её аналитическим продолжением в комплексную плоскость. Обоснованием вывода дисперсионных соотношений выступает принцип причинности и методы теории функций комплексных переменных [2]. Привлекательность этого метода связана с тем, что выражения для амплитуды рассеяния, полученные разложением по степеням константы взаимодействия могут быть непосредственно проверены измеряемыми величинами – эффективным сечением рассеяния в процессах сильных и электромагнитных взаимодействий адронов.

Второй путь – применение метода функционального интегрирования по всем возможным траекториям частиц – альтернативная формулировка квантовой механики с помощью интеграла Фейнмана. Этим методом возможно получение неких общих результатов в квантовой теории поля, например, проведение квантования неабелевых (некоммутируемых) калибровочных полей [3], и показать в общем виде, что ряды теории возмущений в квантовой теории поля являются асимптотическими, т.е. не имеют хорошо определенной области сходимости.

Третьим методом выходящим за рамки теории возмущений можно считать метод ренормализационной группы. Смысл ренорм группы состоит в выделении расходящихся членов ряда теории возмущений в лагранжиане взаимодействия и добавлении в исходный лагранжиан контрчленов, устраняющих расходимости с одновременной перенормировкой входящих в выражение масс, зарядов и констант связи. Может показаться, что этот прием искусственный, и сомневаться в его эффективности, как это заявил Р. Фейнман но доказательство истинности группы перенормировок позволило принять этот метод в качестве одного из основных при вычислении амплитуд рассеяния частиц методом S – матрицы в главных порядках теории возмущений.

В качестве четвертого метода можно принять суммирование основных диаграмм, описывающих пропагаторы и вершинные части частиц с учетом парного взаимодействия во всех порядках разложения свободной энергии по константам взаимодействия. Этот подход аналогичен методу функционального интеграла, но вычисление интеграла бесконечного порядка заменяется здесь на суммирование бесконечного ряда диаграмм во всех порядках взаимодействия.

Наименее затратным на наш взгляд является четвертый метод получения спектральных параметров квазичастиц, в котором сочетаются достоинства первого и второго методов. Покажем работу четвертого метода на примере системы взаимодействующих квазичастиц – фононов. Запишем лагранжиан взаимодействия в виде:

$$L(x) = \partial_\nu u_\nu(x) \cdot \partial^\nu u^\nu(x) + \frac{1}{2} \cdot a \cdot u_\nu(x)^2 + \frac{1}{4} \cdot b \cdot u_\nu(x)^4 \quad (1)$$

Здесь $u_\nu(x)$ – полевые функции 4 – мерных координат, ν - пробегает значения 0, 1, 2, 3.

Уравнения движения для Лагранжиана (1) получаются вариацией действия:

$$\frac{\partial L}{\partial u_\nu(x)} - \frac{\partial}{x_\nu} \frac{\partial L}{\partial u_\nu(x)/\partial x_\nu} = 0 \quad (2)$$

Уравнение движения для Лагранжиана (1) с учетом только трехчастичного взаимодействия во всех порядках теории возмущений получим в виде:

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_v^2} = au(x) - b \cdot u(x)^3 \quad (3)$$

Ограничиваясь одномерным случаем мы представим графическое решение уравнения (3) в качестве эллиптического интеграла второго рода – эллиптической функции. На рисунке 1 показаны графики зависимости от времени решения уравнения (3) для константы $a = 1$ и константы связи $b = 1/9$.

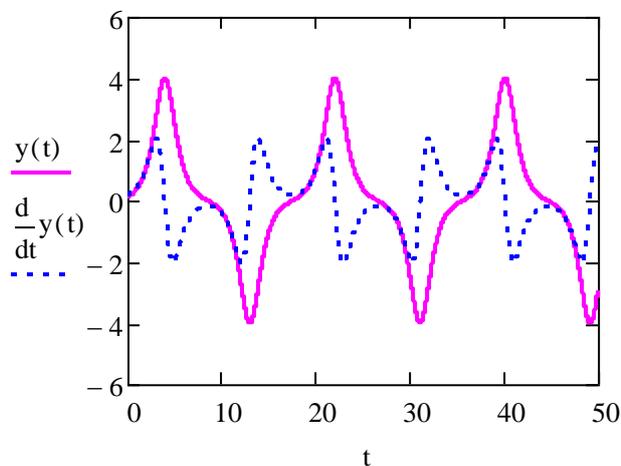


Рисунок 1 - Решение уравнения (3) через эллиптическую функцию. Сплошной линией показано периодическое решение $u(x)$, а пунктиром – изменение скорости полевой функции в зависимости от времени

На рисунке 2 представлена фазовая траектория системы в которой учтено только взаимодействие одно – и двухчастичных состояний квазичастиц.

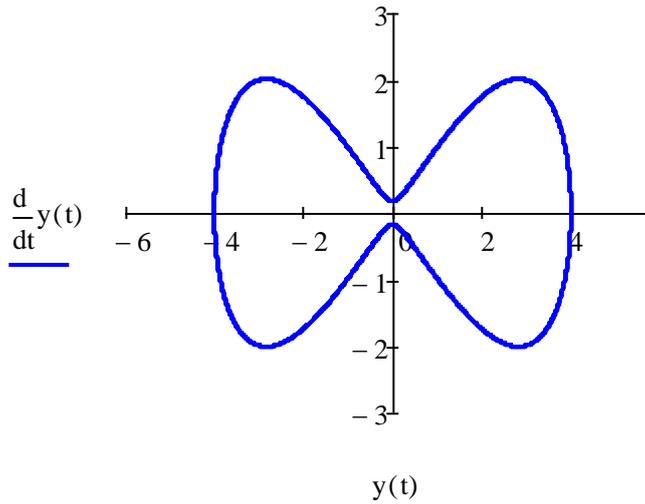


Рисунок 2 - Фазовая траектория системы квазичастиц с парным взаимодействием. Замыкание траектории свидетельствует о нелинейном периодическом изменении состояния системы во времени.

При введении в Лагранжиан диссипации в виде взаимодействия системы квазичастиц с термостатом – $c \cdot \delta E$ - флуктуациями в системе с термостатом, уравнение движения с квазичастиц принимает вид:

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x_v^2} = au(x) - b \cdot u(x)^3 + c \cdot \frac{\partial u(x)}{\partial x_0} \quad (4)$$

Включение в систему взаимодействующих квазичастиц взаимодействия с термостатом существенно меняет характер эволюции системы. На рисунке 3 показана эволюция полевой функции системы на период времени 0 – 400 шагов.

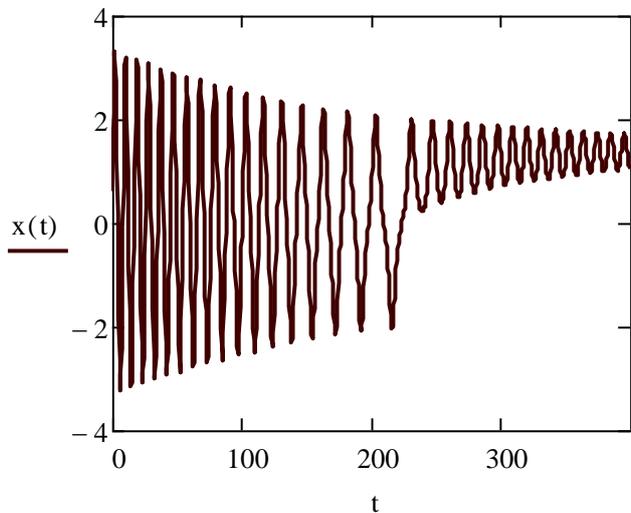


Рисунок 3 - Эволюция одномерной координаты системы как функция времени. На интервале 220 – 230 шагов виден переход системы в новое состояние нелинейного периодического движения с малой амплитудой.

На рисунке 4 показана фазовая траектория системы с диссипацией, где заметен срыв состояния системы в область с меньшим фазовым объемом. Очевидно оба состояния обладают устойчивой точкой по методу ренормгруппы.

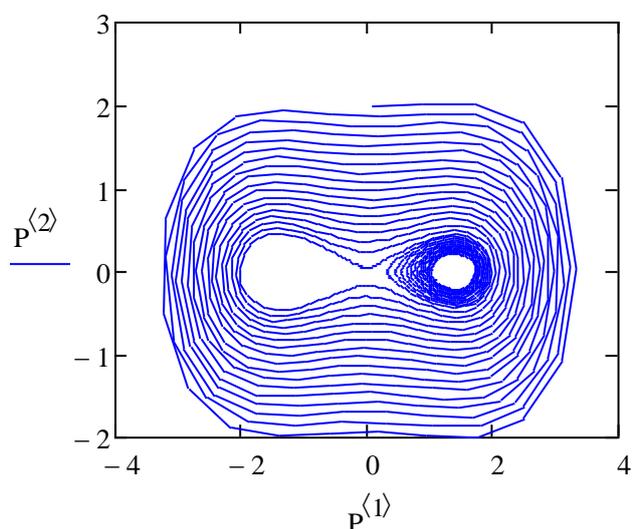


Рисунок 4 - Фазовая траектория системы взаимодействующих частиц с диссипацией. Хорошо видно переключение фазового объема при некотором интервале времени

Таким образом, суммирование диаграмм во всех порядках теории возмущений показывает существенное отличие поведения систем от общепринятого. Кроме того, учет диссипации кардинально меняет поведение системы, приводя к фазовому переходу системы в процессе эволюции к состоянию с меньшим фазовым объемом, что соответствует эволюцию системы к стационарному состоянию с минимальной энергией.

Список литературы:

1. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теоретическая физика. В 10 т. т. IV. // В.Б. Берестецкий, Е.М. Лифшиц, Л.П. Питаевский. Квантовая электродинамика. М.: Изд-во «ООО Физматлит». 2020. 720 с.

2. Боголюбов Н.Н., Ширков Д.В. Введение в теорию квантованных полей. 4–е изд. испр. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1984. 600 с.

3. Славнов А.А., Фадеев Л.Д. Введение в квантовую теорию калибровочных полей. 2-е изд. М.: Наука. 1988. – 272 с.

UDC 519.6

**PROPERTIES OF A SYSTEM OF INTERACTING QUASI-PARTICLES
BEYOND THE FRAMEWORK OF PERTURBATION THEORY**

Anatoly An. Anikiev¹

Doctor of Physical-Technical Science, Professor
aaanikyev@mail.ru

Emiliya Nik. Anikieva²

Senior teacher of the Department of Mathematics
physics and informational technologies
korol_0909@mail.ru

¹Bauman Moscow State Technical University
Moscow, Russia

²Michurinsk State Agrarian University
Michurinsk, Russia

Annotation. Approaches to estimating the spectral parameters of the systems evolution that do not use standard perturbation theory in quantum mechanics and quantum field theory are considered. Using the example of the Lagrangian taking into account pair and triple interactions of quasi-particles, the equations of motion of quasiparticles were calculated and the parameters of the evolution of field functions were obtained in all orders of perturbation theory, without both taking into account dissipation and taking into account dissipation in the system. It is shown that without

considering dissipation, the system has periodic nonlinear motion, and when dissipation is taken into account, the symmetry group of the system is violated and a phase transition is observed in it, accompanied by a decrease in the phase volume.

Key words: dissipation, phase volume, quasi particles, pair interaction.

Статья поступила в редакцию 01.02.2024; одобрена после рецензирования 20.03.2024; принята к публикации 22.03.2024.

The article was submitted 01.02.2024; approved after reviewing 20.03.2024; accepted for publication 22.03.2024.