

## Изучение теории комплексного скалярного поля с внешним источником и её сравнение с U(1)-инвариантными теориями скалярного поля

К.С. Давыдов<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Московский физико-технический институт (государственный университет)

<sup>2</sup>Институт ядерных исследований РАН

В различных теориях скалярного поля возникают стабильные или метастабильные частицеподобные решения уравнений движения, существование и стабильность которых определяются сохраняющимся зарядом, соответствующим U(1)-симметрии. Такие полевые решения находят применение в расширениях Стандартной модели, а также в физике конденсированного состояния. В данной работе рассматривается теория комплексного скалярного поля с внешним источником, имеющая схожие с Q-шарами свойства. Её лагранжиан имеет вид

$$\mathcal{L} = \partial^\mu \varphi^* \partial_\mu \varphi - m^2 \varphi^* \varphi + J^* \varphi + \varphi^* J,$$

где внешний источник  $J$  выбран в виде

$$J = j(\vec{x})e^{i\omega t}.$$

Для простоты будем рассматривать внешний источник в виде суперпозиции точечных источников

$$j(\vec{x}) = \sum_{k=1}^N j_k \delta(\vec{x} - \vec{a}_k) e^{i\alpha_k},$$

где  $j_k$  и  $\alpha_k$  – действительные числа, а  $\vec{a}_k$  – некоторый постоянный вектор.

Основная цель работы – изучение свойств полевых решений, а также исследование их на стабильность. Вследствие того, что решения уравнений движения напоминают соответствующие решения для Q-шаров, в работе сравнивается теория с внешним источником и теории комплексного скалярного поля, описывающие Q-шары, с потенциалами

$$U(|\varphi|^2) = m^2 |\varphi|^2 - \frac{\lambda}{2} |\varphi|^4,$$

$$U(|\varphi|^2) = m^2 |\varphi|^2 \theta\left(1 - \frac{|\varphi|^2}{v^2}\right) + m^2 v^2 \theta\left(\frac{|\varphi|^2}{v^2} - 1\right),$$

где  $\theta$  – функция Хэвисайда. В дальнейшем будем называть теорию с первым потенциалом теорией  $|\varphi|^4$ , а теорию со вторым потенциалом теорией с кусочно-параболическим потенциалом.

В ходе исследования были найдены полевые решения для теории с внешним точечным источником в  $(d+1)$ -мерном пространстве времени при  $d=1, 2, 3$ . Несмотря на то что внешний источник явно нарушает трансляционную и глобальную U(1)-инвариантность, выражения для энергии и для заряда на уравнениях движения не зависят от времени, а потому их рассмотрение имеет смысл. В процессе изучения данной теории были подсчитаны энергия и заряд для одного точечного источника, а также для двух взаимодействующих точечных источников. Основным свойством полевых решений, полученных для данных конфигураций, является их экспоненциальный характер убывания. Характерный размер, где поле, энергия и заряд не являются нулевыми, равен

$$\frac{1}{\Omega}, \text{ где}$$

$$\Omega = \sqrt{m^2 - \omega^2}.$$

Также в теории с внешним источником был найден ток, сохранение которого гарантируется наличием нетривиальной симметрии, являющейся композицией временных трансляций и глобальных фазовых преобразований поля,

$$\theta^\mu = -\omega J^\mu + T^{\mu 0},$$

где  $J^\mu$  - тензор, совпадающий по виду с током в случае ненарушенной  $U(1)$ -симметрии, а  $T^{\mu 0}$  – компоненты тензора энергии-импульса  $T^{\mu\nu}$ .

Кроме того, для теории с внешним источником было получено соотношение, связывающее энергию и заряд, которое также верно и для  $Q$ -шаров:

$$\frac{dE}{d\omega} = \omega \frac{dQ}{d\omega}.$$

В (1+1)-мерном пространстве-времени решение уравнений движения было исследовано на абсолютную стабильность. Будем называть решения полевых уравнений абсолютно стабильными, если их энергия меньше энергии малых возмущений над вакуумом. В случае  $\omega \in [-m, m]$  одномерное решение в теории с внешним источником является абсолютно стабильным.

Помимо этого, в (1+1)-мерном пространстве-времени была найдена сила взаимодействия двух зарядов, а также расстояние между ними, когда эта конфигурация наиболее устойчива.

Основной целью работы было сравнение теории с внешним источником с  $|\varphi|^4$  – теорией и с теорией с кусочно-параболическим потенциалом. В работе было установлено, что в (1+1)-мерном пространстве-времени в пределе  $\omega \rightarrow m$  энергия, заряд, а также пространственное поведение полевых решений совпадают в сравниваемых теориях.

Наконец, была исследована одномерная бесконечная периодическая структура из внешних источников и было проведено её сравнение с бесконечным периодическим решением  $|\varphi|^4$  – теории. Было показано, что в некотором пределе возможно установление соответствия между параметрами теорий, когда полевые решения, энергия и заряд ведут себя схожим образом в сравниваемых теориях.

## Литература

- [1] *Раджараман Р.* Солитоны и инстантоны в квантовой теории поля. – М.: Мир, 1985. 416с.
- [2] *Рубаков В. А.* Классические калибровочные поля: Бозонные теории. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2014. 296с.
- [3] *S. R. Coleman*, Nucl.Phys. B262 (1985) 263 [Erratum: Nucl.Phys. B269 (1986) 744].
- [4] *I.E. Gulamov, E.Ya. Nugaev, M.N. Smolyakov*, Phys.Rev. D87 (2013) no.8, 085043.