

ОТЗЫВ
научного руководителя
на диссертацию Маслова Василия Евгеньевича
«Солитоны и осциллоны в скалярных теориях поля»,
представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 1.3.3 — теоретическая физика.

Нелинейные классические решения с локализованной плотностью энергии — солитоны и осциллоны — занимают особое место в теоретической физике. С одной стороны, они важны для теории ранней Вселенной и для физики конденсированного состояния вещества. В космологии солитоны могут играть роль темной материи, «притворяться» черными дырами, сопровождать генерацию барионного числа и т.п. Ещё более эффектны осциллоны — пульсирующие долгоживущие сгустки скалярного поля — которые формируются в нелинейных космологических симуляциях даже в тех случаях, когда их появление изначально не предполагается. Несмотря на конечное время жизни, они могут существенно изменить процессы образования аксионной темной материи и барионной асимметрии, а также являться источниками гравитационных волн на стадии постинфляционного разогрева. В лабораторной физике солитоны и осциллоны описывают (квази)стационарные состояния систем (бозе-конденсатов, спиновых цепочек и др.).

С другой стороны, солитоны и осциллоны интересны сами по себе. В настоящее время в неинтегрируемых теориях изучаются, как правило, только топологические солитоны или Q-шары, существование которых обеспечивается законами сохранения топологического или глобального зарядов соответственно. А другие механизмы появления солитонов не рассматриваются. Осциллоны — загадка хотя бы потому, что в литературе отсутствует общепринятое объяснение их повсеместной распространенности. Более того, в некоторых моделях осциллоны совершают 10^{14} осцилляций за время жизни, и это при том, что большие или малые параметры в таких моделях отсутствуют. Поэтому поиск новых видов солитонов и причин существования осциллонов, а также объяснение невероятной живучести последних — крайне актуальные задачи.

В диссертации Василия Евгеньевича Маслова рассматриваются задачи, напрямую связанные с вопросами существования солитонов и осциллонов. Работа состоит из Введения, четырех глав основного текста, Заключения и списка литературы. Технически сложные вычисления отнесены в Приложения.

Во Введении обсуждаются солитоны и осциллоны в неинтегрируемых моделях, обозначается общая проблематика диссертации. В первой главе предложен новый «хаотический» механизм появления многосолитонных решений в неинтегрируемых (1+1)-мерных скалярных теориях. Основная идея этой главы состоит в том, что статические уравнения поля в неинтегрируемых моделях тоже являются неинтегрируемыми, что гарантирует существование бесконечного множества «хаотических» солитонов с вакуумными асимптотиками. Показано, что профили «хаотических» солитонов образуют фрактал дробной размерности в конфигурационном пространстве, а свойство самоподобия фрактала связано с экспонентами Ляпунова решений. Доказывается, что количество солитонов экспоненциально растет с их пространственным размером, а показатель экспоненты можно ограничить топологической энтропией статических уравнений. Также получена связь между распределением «хаотических» солитонов и энтропией Колмогорова-Синяя.

Результаты данной главы связывают теорию солитонов и теорию динамических систем и, таким образом, важны для обеих областей математической физики. В диссертации предлагается новый общий механизм появления солитонных решений. Также

показано, как их изучать методами теории динамических систем. Наоборот, для теории динамических систем изучение и классификация «хаотических» солитонов — новая и интересная прикладная задача.

Во второй главе диссертации строится универсальная «эффективная теория поля» для описания скалярных осциллонов большого размера. Здесь главная идея — каноническое преобразование от поля φ и его канонического импульса π_φ к новым переменным I и θ , которые медленно зависят от времени и от пространственных координат. Показано, что эффективное действие для I и θ можно строить в виде разложения по их пространственным производным, т. е. фактически по обратному характерному размеру конфигурации. Важно, что в главе доказана глобальная $U(1)$ инвариантность эффективного действия во всех порядках разложения. Это говорит о существовании глобального заряда и, следовательно, семейства нетопологических солитонов — осциллонов — минимизирующих энергию при данном значении заряда. Таким образом приближенная эффективная теория объясняет появление и стабильность осциллонов. Также в главе получены строгие критерии существования долгоживущих осциллонов большого размера: грубо говоря, для этого скалярный потенциал теории должен быть близок к квадратичному. Интересным сторонним результатом главы является доказательство критерия линейной стабильности осциллонов (критерия Вахитова-Колоколова) в рамках эффективной теории поля.

В целом, глава 2 — важный шаг на пути понимания причин существования и стабильности долгоживущих осциллонов. Результаты главы проиллюстрированы явным вычислением эффективного действия в двух порядках градиентного разложения, а также сравнением с численными результатами в простой скалярной модели. Представляется, что результаты данной главы актуальны для описания осциллонов в других, более сложных теориях.

Глава 3 диссертации посвящена объяснению интересного факта: осциллоны встречаются чаще и живут дольше в низкоразмерных моделях. Для этого в главе рассмотрен формальный предел нулевого количества измерений $d \rightarrow 0$. Показано, что при $d=0$ в любой скалярной теории существует семейство точных вечноживущих решений — «нольмерных осциллонов». Осциллоны в $d=1$ и $d=2$ измерениях появляются так часто и живут так долго именно потому, что они похожи на точные нольмерные решения. Следует отметить, что глава 3 фактически предлагает новый метод описания осциллонов низкой размерности с помощью приближения их «нольмерными» решениями и вычисления поправок по d .

В четвертой — последней — главе диссертации рассматриваются осциллоны в скалярных теориях с почти квадратичными потенциалами. К такому классу, например, относится модель монодромии при некотором выборе параметров. В главе 4 показано, что метод эффективного действия в этих моделях можно упростить, а его точность — радикально повысить. Основная мысль здесь состоит в том, что в широкой окрестности любого значения поля почти квадратичный потенциал можно приблизить параболой. При этом, кривизна параболы («эффективная масса») будет зависеть масштаба поля и не совпадёт, в частности, с массой поля в вакууме. Поэтому в предлагаемом в главе 4 методе «ренормгруппы» потенциал разбивается на квадратичную по полю часть, также пропорциональную квадрату «эффективной массы», и оставшуюся нелинейную часть, которая учитывается по теории возмущений. После вычисления эффективного действия «эффективная масса» делается зависящей от значения поля, что существенно повышает точность вычислений. Полученные аналитические результаты сравниваются с численными решениями полевых уравнений, а также с другими методами описания осциллонов. Примечательно, что предложенный в главе 4 метод «ренормгруппы» оказывается значительно точнее.

В Заключение вкратце сформулированы итоги работы.

Полученные в диссертации результаты вносят существенный вклад в понимание причин существования осциллонов и солитонов в неинтегрируемых теориях, а также

предоставляют мощные теоретические методы описания этих объектов. Результаты представляют значительный интерес для ряда областей теоретической и математической физики, таких, как классическая теория поля, теория ранней Вселенной и физика конденсированного состояния вещества. Все результаты диссертации опубликованы в рецензируемых журналах, доложены на конференциях и семинарах.

К недостатку работы можно отнести незавершенность аналитического описания осциллонов, которое не включает в себя способ вычисления времени жизни этих объектов. Это замечание никоим образом не снижает научной ценности работы, а является пожеланием на будущее.

За время работы над диссертацией Василий Маслов вырос в самостоятельного и квалифицированного исследователя, который способен участвовать во всех этапах научной работы, от формулировки яркой идеи до написания текста статьи. Василий выполнил аналитические вычисления, используя сложнейшие методы теории динамических систем, классической и квантовой теории поля. Также он стал экспертом по численным методам решения нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных.

Считаю, что диссертационная работа Маслова Василия Евгеньевича «Солитоны и осциллоны в скалярных теориях поля» соответствует всем требованиям, предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, а ее автор, несомненно, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 — теоретическая физика.

«15» сентября 2023 г.

Старший научный сотрудник ИЯИ РАН,
кандидат физ.-мат. наук

Левков Д.Г.

Подпись Левкова Д.Г. удостоверяю
Заместитель директора ИЯИ РАН
доктор физ.-мат. наук, профессор РАН

Рубцов Г.И.