

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г.ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра общей, теоретической и компьютерной физики

**Модель классического временного кристалла
на примере частицы, левитирующей в магнитном поле**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ
студента 4 курса 4022 группы
направления 03.03.02 «Физика» Института физики
Барановского Петра Дмитриевича

Научный руководитель
доцент к.ф.-м.н.

Д.В.Чурочкин

Заведующий кафедрой
профессор, д.ф.-м.н.

В.М.Аникин

Саратов
2024

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Концепция временных (темпоральных) кристаллов была впервые предложена в 2012 г. Фрэнком Вильчеком, лауреатом Нобелевской премии по физике. Временные кристаллы, подобно их пространственным аналогам, обладают упорядоченным расположением атомов, но их уникальность заключается в постоянном временном повторении этой структуры. Они способны нарушать временную симметрию, показывая различное поведение при повторных наблюдениях. В отличие от классических физических систем, время для этих кристаллов не является статичным фоном; они активно взаимодействуют со временем, изменяя своё состояние в непрерывном цикле. Это свойство напоминает эффект памяти формы, известный в некоторых сплавах, таких как никель-титановые, которые могут возвращаться к своей исходной форме после деформации при воздействии тепла. Однако, в отличие от металлических сплавов, временные кристаллы представляют собой квантовые системы, где связи между частицами не столь прочны, и их "память" базируется на иных принципах.

Ф. Вильчек представил идею о существовании физических систем, способных демонстрировать периодические изменения не в пространственных, но во временных измерениях без необходимости внешнего источника энергии для поддержания их движения. Это предположение вызвало изначальный скептицизм, учитывая давнюю критику концепции вечного двигателя. Однако к 2014 году череда научных работ и обсуждений подтвердила возможность существования таких объектов (при условии невозможности отбора энергии у этой системы!), что стало новым прорывом в понимании квантовых систем.

Впервые квантовые временные кристаллы были экспериментально продемонстрированы в 2017 г. основе неравновесных систем, периодически (дискретно) получающих энергию от лазерного или микроволнового излучения. Физическая модель, реализующая квантовый временной кристалл, была предложена в 2019 г. году на основе системы кубитов с многочастичными нелокальными взаимодействиями, а в 1921 г. сообщалось о создании временного кристалла в квантовом компьютере. В 1921 г. появились информация о возможности создания временных кристаллов, полностью описываемых законами классической физики.

Цель ВКР – показать, что левитирующая заряженная диэлектрическая наночастица, находящаяся в оптическом пинцете или ионной ловушке, демонстрирует поведение, характерное для временного кристалла.

Задачи ВКР. Для достижения этой цели в образовательном и научном плане решались следующие задачи:

1. Изучение понятия временного и дискретного временного кристалла
2. Изучение модели классического временного кристалла на примере частицы в магнитном поле.

3. Рассмотрение равновесия как в классическом, так и в квантовом режиме времени для поликристаллического магнитного кристалла при быстрой изменчивости отношения заряда к массе в пределе левитации.
4. Предложить метод левитации заряженных частиц в кристалле, основанный на создании статического магнитного поля в наночастицах.

Научная новизна. В выпускной квалификационной работе (ВКР) разрабатывается классическая модель временного кристалла на примере заряженной диэлектрической частицы, находящейся в магнитном поле. Рассматриваемая модель позволяет промоделировать ситуации, которые до сих пор считались недоступными для классической физики.

Структура и объем ВКР. Выпускная квалификационная работа (бакалаврская работа) включает следующие разделы:

Введение.

Раздел 1. Временной кристалл.

Раздел 2. Дискретный временной кристалл.

Раздел 3. Модель классического временного кристалла на примере частицы в магнитном поле.

Заключение.

Список использованных источников из 35 наименований.

Приложения:

А. Лангранжев формализм,

Б. Тензор Леви Чивиты,

В. Углы Эйлера,

Г. Преобразования Лангранжа.

Материалы работы изложены на 44 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы выпускной квалификационной работы, определены аспектные характеристики работы.

В первом разделе раскрыто содержание понятия «временной кристалл» и его научная история.

Во втором разделе дается определение так называемого *дискретного* временного кристалла – неравновесной системы, подверженной периодическому воздействию, в которой могут проявлять устойчивые временные корреляции на определенной субгармонической частоте. Это новое состояние материи и было названо «дискретный временной кристалл» [1].

В разделе 3 проводится моделирование дискретного временного кристалла на примере частицы, левитирующей в магнитном поле. Рассматривается левитирующая, заряженная диэлектрическая наночастица в оптическом пинцете или ионной ловушке [2]. Наночастица испытывает в ловушке как силу, так и вращающий мо-

мент до тех пор, пока не будет достигнуто механическое равновесие, при котором свободна только спин-вращательный режим.

Рассмотрим геометрию задачи с учетом конфигурации внешних полей (см. рисунок 1).

Рассматривается левитирующая заряженная диэлектрическая наночастица в оптическом пинцете или ионной ловушке [2]. На наночастицу в ловушке действует как сила, так и вращающий момент до тех пор, пока не будет достигнуто механическое равновесие, при котором наночастица может совершать вращательное движение только вокруг одной оси Z'' , при этом совершая небольшие колебания, которые описываются двумя оставшимися углами Эйлера α и β .

Три центра масс (ЦМ) и две другие вращательные (торсионные) моды оказываются в ловушке [3].

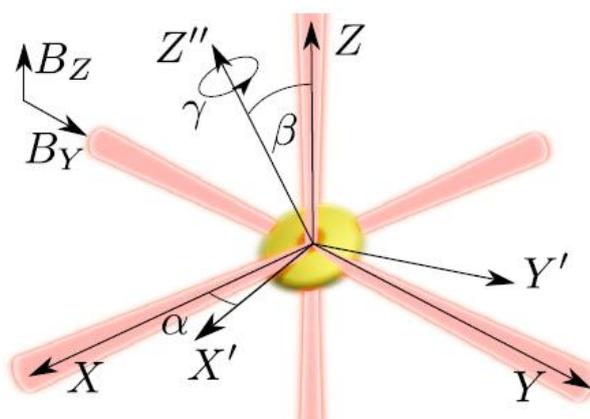


Рисунок 1

Заряженная диэлектрическая наночастица захватывается и левитирует под действием внешнего потенциала. Все три трансляционные степени свободы фиксированы. Сильное однородное магнитное поле B_Y приложено вдоль оси Y . Другое слабое магнитное поле $B_Z \ll B_Y$ вдоль оси Z может быть использовано для получения квантовых временных кристаллов [4].

В дальнейшем можно пренебречь связью между центрами масс и вращениями и рассматривать только связь между ними [5].

Поскольку наночастица заряжена, то при ее вращении возникает магнитный момент, связанный с внешним магнитным полем, который смешивает две торсионные моды и оставшееся спиновое вращение.

Рассмотрим теперь классическую модель. Лагранжиан для частицы с массой m и зарядом Q во внешнем электромагнитном поле имеет вид

$$L = \frac{1}{2}mv^2 + Q\mathbf{v} \cdot \mathbf{A} - Q\Phi \quad (1)$$

где \mathbf{v} – линейная скорость, \mathbf{A} – векторный потенциал, а Φ – электростатический потенциал.

Используя математический аппарат, представленный в Приложениях Б, В и Г, можно прийти к выражению для энергии системы. Энергия системы, на которую

наложено условие $m_{1,3} \rightarrow 0$ ($m_{1,3}$ – диагональные компоненты тензора, характеризующего распределение масс при вращении), определяется следующим образом:

$$E = \frac{1}{2}x^2(u_1 + b^2\dot{z}^2/u_2) \quad (2)$$

где $x = \beta$, u_1 , u_2 – параметры потенциала Φ , $b = V_y e_3/2$, e_3 – одна из диагональных компонент тензора, характеризующего распределение заряда наночастицы при вращении, $z = \alpha + \gamma$.

На рисунке 2 представлены зависимость эффективной потенциальной энергии системы (рис. 2,а) и схематическая фазовая диаграмма системы (рис. 2, б).

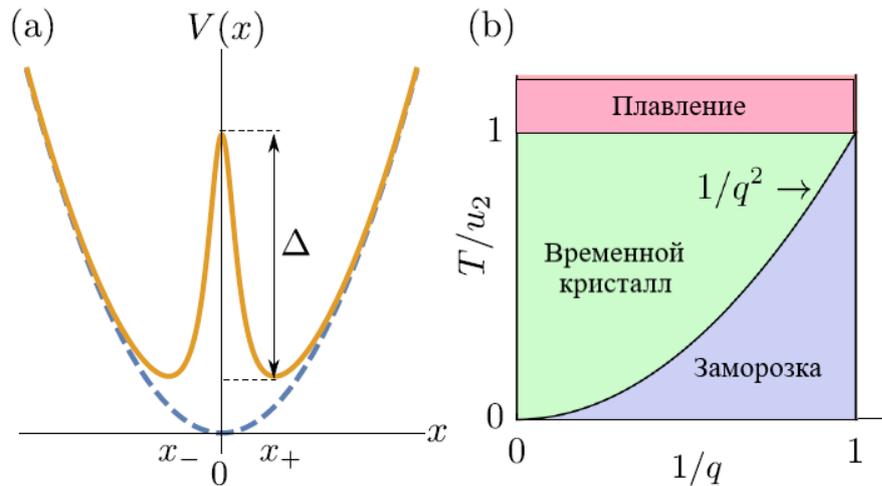


Рисунок 2.

Прокомментируем рисунок 2,а. Схематическое изображение эффективной потенциальной энергии дает функция $V(x)$. Если $|l| < l_c$ (из-за цикличности $z = \alpha + \beta$; справедливым считается условие $p_z = \frac{\partial L}{\partial \dot{z}} = l$, l_c – критический параметр, при котором одноямная потенциальная яма становится двухямной), то $V(x)$ описывается пунктирной кривой; если $|l| > l_c$, то $V(x)$ представляется сплошной кривой. В середине имеется потенциальный барьер с тремя энергетическими экстремумами $x = 0$, x_{\pm} , имеющий форму «мексиканскую шляпы», что предполагает спонтанное нарушение симметрии.

Рассмотрим рисунок 2, б, представляющий схематическую фазовую диаграмму классического временного кристалла. Выделены фаза временного кристалла, существующая при $q > 1$ и $T < u_2$ (здесь $q \equiv b/\sqrt{m_3 u_2}$, T – температура). Для $T > u_2$ временной кристалл «расплавлен»; для $T < u_2/q_2$, временной кристалл «заморожен».

Связь между изучаемой моделью и моделью классического временного кристалла можно представить следующим образом. Во-первых, в пределе $m_{1,3} \rightarrow 0$ (или $q \gg 1$) лагранжиан

$$L = \frac{1}{2}m_1\dot{x}^2 + \frac{1}{2}(m_3 + b^2x^2/u_2)\dot{z}^2 + \phi\dot{z} - \frac{1}{2}u_1x^2$$

сводится к лагранжиану для классического временного кристалла из работы [6]. Во-вторых, любое конечное, но малое значение $m_{1,3}$ будет регуляризовывать сингулярность лагранжиана классического временного кристалла, при этом свойство временного кристалла сохраняется. Хотя истинное основное состояние этой системы находится в состоянии покоя, малые возмущения могут перевести систему в фазу временного кристалла. А именно, если начальное состояние удовлетворяет условию $|l| \gg l_c$, которое может быть выполнено при произвольно малом возмущении в пределе $q \rightarrow \infty$, то $x = 0$ перестает быть устойчивым и система приближается к $x_{\pm} \neq 0$, и в результате $\dot{z} = \text{sgn}(l) \sqrt{u_1 u_2} / b$.

С помощью численного моделирования показано, что даже при большом начальном возмущении, небольшое демпфирование заставит систему оставаться вблизи $x_{\pm} \neq 0$ с нетривиальной угловой скоростью $\dot{z} = \text{sgn}(l) \sqrt{u_1 u_2} / b$, пока энергия полностью не рассеется и движение не прекратится. В низком вакууме время жизни этого вращения обратно пропорционально давлению остаточного газа и может быть больше 6×10^4 с в экспериментах [7].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

В выпускной квалификационной работе проанализирована вращательная динамика системы, представляющей собой заряженную диэлектрическую наночастицу, помещенную в систему специально сконфигурированных магнитных и электрических полей. Показано, что в определенном диапазоне управляющих параметров система демонстрирует сложную динамику в своем основном состоянии, характерную для классических временных кристаллов.

Список использованных источников

1. Wilczek, F. Classical Time Crystals // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 109, Issue 16. P. 33.
2. Khemani. V., Moessner. S.R., Sondhi S.L. A Brief History of Time Crystals. URL: <https://arxiv.org/abs/1910.10745/> DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1910.10745>
3. Sacha, K., Zakrzewski, J. Time crystals: a review / K. Sacha, J. Zakrzewski // Rep. Prog. Phys. 2018. - Vol. 81, P.25.
4. Shapere, A., Wilczek, F. Classical Time Crystals // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 109, Issue 16. P. 48.
5. Li, T., Gong, Z.-X., Yin, Z.-Q., Quan, H.T., Yin, X., Zhang, P., Duan, L.-M., Zhang, X. Space-Time Crystals of Trapped Ions // Phys. Rev. Lett. 2012. Vol. 109, Issue 16. P. 22.
6. Watanabe, H., Oshikawa, M. Absence of Quantum Time Crystals // Phys. Rev. Lett. 2015. Vol. 114, Issue 25. P. 28.
7. Sacha, K. Modeling spontaneous breaking of time-translation symmetry// Phys. Rev. 2015. Vol. 91, Issue 3. P. 26.