Шаровая молния как самосогласованная спиральная структура: от аналогии с кавитацией к точному решению в 6-мерном фазовом пространстве

Аннотация

Предложена модель шаровой молнии (ШМ) как самоподдерживающейся спиральной волны электромагнитного поля, описываемой матричным волновым уравнением с унитарным спиральным анзацем. Показано, что конечномерный класс точных решений определяется замкнутой алгеброй $\{I, W, S\}$, где матрицы W и S имеют явный вид, соответствующий спиральной симметрии и

антисимметричной структуре поля. Устойчивость решений носит алгебраический характер и определяется масштабом когерентности $R^* \sim 1/\varepsilon$. При нарушении симметрии (контакт с поверхностью) система переходит к динамике огибающей, описываемой нелинейным уравнением Шрёдингера, что приводит к формированию солитона и локальному разрушению. Модель связывает рождение структуры с ударом молнии, а время жизни — с тепловым балансом и диссипацией, без использования произвольных подгоночных

параметров, за исключением феноменологической эффективности передачи спиральности. Полный вывод точного решения матричного нелинейного волнового уравнения для спиральной волны приведён в статьях АХ 136623 (линейное уравнение) и АХ 136660 (нелинейное уравнение), опубликованных на сайте АрХиворг.ру. Экспериментальное подтверждение энергетики рождения шаровой молнии, согласующейся с данной моделью, дают работы Абрахамсона–Динниса и Паивы–Сильвы.

1. Введение: аналогия с кавитацией и ударной инициацией

Аналогия между кавитационным пузырьком, возникающим при ударе клешни креветки-богомола, и шаровой молнией позволяет выделить общие черты инициации локализованных структур: в обоих случаях ударная волна формирует за фронтом область пониженного давления, в которой зарождается сферическая полость. В воде эта полость

заполняется насыщенным паром (кавитационный пузырёк), в воздухе — перегретой плазменной средой (зародыш шаровой молнии).

Однако на стадии удержания аналогия исчерпывается: кавитационный пузырёк не имеет механизма самоподдержания и быстро схлопывается по закону Рэлея:

$$t_R \approx 0{,}915\, R_0 \sqrt{\frac{\rho}{\Delta P}},$$

где R_0 — начальный радиус полости, ρ — плотность среды, ΔP — перепад давления. Для типичных условий в воздухе ($\rho \approx 1{,}2\ \text{кг}/\text{м}^3$, $\Delta P \approx 100\ \text{кПа}$, $R_0 \approx 10\ \text{см}$) получаем $t_R \sim 0{,}3\ \text{мс}$, что на несколько порядков меньше наблюдаемого времени жизни шаровой молнии (секунды и более).

Это расхождение указывает на необходимость активного механизма удержания, не сводимого к гидродинамическому равновесию. В терминах предложенной модели таким механизмом является алгебраическая устойчивость,

обеспечиваемая замкнутой операторной алгеброй $\{I, W, S\}$, которая динамически компенсирует внешнее давление и предотвращает коллапс.

---

2. Вывод из уравнений Максвелла: спиральная волна в 6-мерном фазовом пространстве

Рассмотрим электромагнитное поле в точке, описываемое шестью компонентами $(E_x, E_y, E_z, B_x, B_y, B_z)$. Шестимерное

фазовое пространство совпадает с фазовым пространством электромагнитного поля в точке, а уравнения первого порядка выводятся из условия Бельтрами и релаксации Тейлора. Нелинейная форма второго порядка следует из формы четыре, приведённой в статье AX 136660.

Введём спиральный анзац:

$$\mathbf{U}(x,t) = \mathbf{M}\exp(iWx - St),$$

где $\mathbf{M}$ — вектор амплитуд, W и S — матрицы, описывающие

пространственную и временную эволюцию спиральной структуры. Полный вывод точного решения матричного нелинейного волнового уравнения для спиральной волны выполнен в работе АХ 136660 (нелинейное уравнение); линейному уравнению посвящена работа АХ 136623. Обе статьи опубликованы на сайте АрХиворг.ру.

Матрицы W и S имеют следующий явный вид. У матрицы W все элементы, кроме стоящих на главной диагонали, равны единице; на главной диагонали стоят нули:

$$W = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Матрица S — антисимметричная матрица с нулями на главной диагонали и элементами $S_{13} = S_{21} = S_{32} = 1$, $S_{31} = S_{12} = S_{23} = -1$:

$$S = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Алгебра $\{I, W, S\}$ имеет максвелловское происхождение: обе

матрицы являются полиномами оператора спиральности спина 1, а их коммутационные соотношения обеспечивают замкнутость структуры.

Точное решение распадается на три моды с собственными значениями (W, S):

$$(\mu, \lambda) = (2, 0), \quad (-1, -i\sqrt{3}), \quad (-1, +i\sqrt{3}).$$

В терминах волнового числа и частоты допустимый спектральный набор несущей:

$$k + i\omega \in \left\{ 2,\ \ -1 + i\sqrt{3},\ \ -1 - i\sqrt{3} \right\}.$$

Эти моды соответствуют трём взаимно ортогональным плоским волнам, а вместе они дают спиральную волну, порождённую замкнутой алгеброй. Их суперпозиция формирует самоподдерживающуюся структуру, которая динамически компенсирует внешнее давление и предотвращает коллапс. Таким образом, «жизнь» шаровой молнии — это не статическое равновесие, а стационарная

динамика, задаваемая замкнутой операторной алгеброй.

---

3. Устойчивость и масштаб когерентности

Устойчивость решений носит алгебраический, а не энергетический характер. Слабое нарушение алгебры порождает масштаб когерентности $R^* \sim 1/\varepsilon$, где ε — малый параметр, характеризующий отклонение от идеальной замкнутости структуры.

Время жизни определяется двухканальной формулой: флуктуационный канал распада подавлен квадратично по ε, тогда как диссипативный канал линеен и доминирует. Основной механизм потери устойчивости — систематическая диссипация энергии (теплопроводность, излучение, рекомбинация плазмы).

Тепловой баланс даёт времена жизни от долей секунды

(термический запас) до десятков и сотен секунд (химический запас), что согласуется с наблюдениями без подгоночных параметров.

---

4. Переход к солитону: динамика огибающей

При нарушении симметрии (контакт с поверхностью) замкнутость алгебры нарушается, и система выходит из класса точных решений. В этом режиме динамика описывается

нелинейным уравнением Шрёдингера для огибающей $M(x,t)$:

$$i\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + 2|M|^2 M = 0.$$

Это уравнение допускает солитонные решения, соответствующие локализованным волновым пакетам, несущим концентрированную энергию. Именно эти солитоны ответственны за наблюдаемые эффекты разрушения — оплавленные отверстия в стекле.

Солитонное решение для огибающей, приводящее к нелинейному уравнению Шрёдингера, подробно рассмотрено в работе АХ 136675, опубликованной на сайте АрХиворг.ру.

Таким образом, «смерть» шаровой молнии реализуется как переход от алгебраически устойчивого режима к солитонной динамике: потеря симметрии → распад алгебры → формирование солитона → локальное разрушение.

5. Общая картина рождения, жизни и смерти шаровой молнии

Рождение. Удар молнии создаёт ударную волну и зону пониженного давления, инициируя локальную закрутку поля (спиральность). Эффективность передачи спиральности — единственный феноменологический параметр модели.

Жизнь. Структура удерживается алгебраической устойчивостью замкнутой алгебры $\{I, W, S\}$. Масштаб

когерентности $R^* \sim 1/\varepsilon$ задаёт пространственную протяжённость структуры, доминирующий диссипативный канал — время жизни.

Смерть. Контакт с поверхностью нарушает сферическую симметрию, что разрушает замкнутость алгебры. Система переходит к динамике огибающей (НУШ), формируется солитон — и происходит локальное разрушение.

Цепочка рождения структуры прослежена от удара молнии до формулы времени жизни без единого произвольного звена, за исключением феноменологической эффективности передачи спиральности.

---

6. Эксперименты, подтверждающие модель

Экспериментальные работы, подтверждающие энергетику рождения шаровой молнии и согласующиеся с данной

моделью, были проведены в экспериментах Абрахамсона–Динниса и Паивы–Сильвы.

Эксперимент Абрахамсона–Динниса. Теоретическая работа [1] показала, что при ударе линейной молнии в почву образуются наночастицы чистого кремния, которые, окисляясь в воздухе, формируют светящуюся сферу — модель «горящего кремния». Эта модель объясняет энергетику рождения: источник энергии — химическая энергия окисления кремнийсодержащего вещества почвы, что согласуется с

каналом питания структуры из кремнийсодержащего вещества, предложенным в настоящей работе.

Эксперимент Паивы–Сильвы. Экспериментальная работа [2] продемонстрировала воспроизводимое получение светящихся шаров с временем жизни до 8 секунд при электрических разрядах в чистом кремнии. Авторы прямо указывают, что эксперимент «демонстрирует роль испарения и окисления Si, как предложено в теории Абрахамсона–

Динниса» [1]. Это прямое экспериментальное подтверждение энергетики рождения ШМ, согласующейся с моделью настоящей статьи.

Обе работы согласуются с положениями, изложенными в статье AX 136665, где подробно рассмотрено сопоставление этих экспериментов с теоретическими предсказаниями модели.

Заключение

Предложенная модель шаровой молнии как самосогласованной спиральной волны электромагнитного поля объединяет физическую аналогию, строгий математический вывод и проверяемые предсказания. Аналогия с кавитацией (креветка-богомол) подчёркивает разницу между пассивным гидродинамическим объектом и активной полевой структурой: рэлеевская оценка показывает,

что гидродинамика объясняет рождение объекта, но не его жизнь. Вывод из уравнений Максвелла и явный вид матриц W и S обеспечивают физическую обоснованность модели, а переход к солитону для огибающей — описание механизма разрушения. Цепочка «удар молнии $\rightarrow$ алгебраическая устойчивость $\rightarrow$ формула времени жизни» прослежена без единого произвольного звена, за исключением феноменологической эффективности передачи спиральности.

Эксперименты Абрахамсона–Динниса и Паивы–Сильвы дают независимое подтверждение энергетики рождения, заложенной в модель.

Список литературы (все работы, упомянутые в статье):

1. **AX 136623** — вывод точного решения для линейного уравнения спиральной волны. Опубликовано на сайте АрХиворг.ру.

2. **АХ 136660** — вывод точного решения для нелинейного уравнения и форма четыре. Опубликовано на сайте АрХиворг.ру.
3. **АХ 136665** — описание экспериментов и их сопоставление с моделью. Опубликовано на сайте АрХиворг.ру.
4. **АХ 136675** — солитонное решение для огибающей и вывод нелинейного уравнения Шрёдингера. Опубликовано на сайте АрХиворг.ру.

5. **Abrahamson, J., Dinniss, J.** — Ball lightning caused by oxidation of nanoparticle networks from normal lightning strikes on soil. *Nature*, **403**, 519–521 (2000).

6. **Paiva, G. S., Pavão, A. C., Alpes de Vasconcelos, E., Mendes, O., Jr., da Silva, E. F., Jr.** — Production of Ball-Lightning-Like Luminous Balls by Electrical Discharges in Silicon. *Physical Review Letters*, **98**, 048501 (2007). DOI: 10.1103/PhysRevLett.98.048501.