

Гіпотеза роторного поля: об'єднання матерії, інформації та руху

Viacheslav Loginov¹

¹Київ, Україна, barthez.slavik@gmail.com

Версія 1.0 | 10 жовтня 2025

Анотація

Сучасна фізика трактує простір, матерію та інформацію як окремі сутності, кожна з яких описується власним математичним апаратом. Проте всюдисущість обертання — від спіну електрона й електромагнітної поляризації до планетарних орбіт і космічних структур — натякає на глибшу єдність. Ми пропонуємо, що всі спостережувані структури виникають із динаміки універсального роторного поля, визначеного у геометричній алгебрі. Фундаментальним об'єктом є просторово розподілений ротор $\mathcal{R}(x, t) = \text{Exp}(\mathcal{B}(x, t))$, бівектор-генератор \mathcal{B} якого керує локальною орієнтацією, фазою та когерентним зв'язком. Ми показуємо, як класична механіка, електромагнетизм, квантова спіновна динаміка, термодинамічна незворотність, ефективне кодування інформації та темна матерія (як дефазовані бівекторні компоненти) з'являються як ефективні режими когерентності роторів, транспорту та порушення симетрій. Гіпотеза дає фальсифіковні передбачення: спектральні бічні смуги у гравітаційних хвилях від подій із прецесією; анізотропію лінзування, що корелює з галактичним кутовим моментом; виграші стиснення циклічних сигналів, що перевершують звичайні кодеки; характерні масштабні закони еволюції роторної фази. Ми надаємо відтворювану програму експериментальної валідації у фізиці, обробці сигналів та машинному навчанні.

Ключові слова: геометрична алгебра, роторні поля, уніфікація, когерентність, емерджентна динаміка, стиснення інформації

1 Вступ

1.1 Проблема розрізнених формалізмів

Сучасна наука описує природу сукупністю спеціалізованих теорій: квантова механіка — для атомних явищ, класична теорія поля — для електромагнетизму, статистична механіка — для термодинаміки, теорія інформації — для кодування даних. Кожна з них надзвичайно успішна у своїй сфері. Але така успішність має концептуальну ціну: множення первинних сутностей — хвильових функцій, тензорів поля, розподілів ймовірності, міри ентропії — може приховувати глибші зв'язки.

Розгляньмо три, на перший погляд, не пов'язані явища. По-перше, електрон має внутрішній кутовий момент (спін), який описується матрицями Паулі, що діють на двокомпонентні спінори. По-друге, електромагнітні хвилі мають кругову поляризацію, де ліво- та праворукі стани відповідають орієнтаціям бівекторів у тензорі поля $F_{\mu\nu}$. По-третє, дзиґа прецесує у полі тяжіння, а її вектор кутового моменту описує конус у просторі. Попри те, що ці приклади належать відповідно до квантової механіки, електромагнетизму й класичної механіки, усі вони мають спільну ротаційну природу.

Чи існує єдина математична структура, з якої випливають ці різноманітні прояви? І якщо так, які мінімальні постулати ведуть до такої уніфікації?

1.2 Геометрична алгебра як універсальна мова

Геометрична (кліффордова) алгебра дає координатно-вільний каркас, у якому вектори, бівектори (орієнтовані площинні елементи) й вищі гради живуть в єдиній алгебраїчній структурі. Геометричний добуток поєднує внутрішній і зовнішній добутки, а обертання представляються роторами — експонентами бівекторів. Гестенес показав, що рівняння Дірака для релятивістських електронів можна записати в геометричній алгебрі, інтерпретуючи спінор як геометричний об'єкт, а не абстракцію, що потребує допоміжних гільбертових просторів.

Це натякає, що квантова механіка є більш геометричною, ніж заведено думати. Більше того, бівектор природно описує і електромагнітні поля (тензор Фарадея), і кутовий момент, що вказує на можливе спільне підґрунтя.

1.3 Центральна гіпотеза

Ми висуваємо такий принцип:

Фізичний простір допускає фундаментальне бівекторне поле $\mathcal{B}(x, t)$,
а всі спостережувані явища впливають із динаміки
пов'язаного роторного поля $\mathcal{R}(x, t) = \text{Exp}(\frac{1}{2}\mathcal{B}(x, t))$.

З цього єдиного постулату ми покажемо, що:

1. Класична механіка постає як лінеаризована границя потоків ротора; другий закон Ньютона виводиться точно з бівекторної динаміки.
2. Електромагнетизм виникає як бівекторне поле, що задовольняє рівнянням транспорту, індукованим ротором.
3. Квантова кінематика впливає зі спінорного сектора роторного представлення.
4. Термодинамічна незворотність постає з ансамблевої статистики фаз роторів.
5. Темна матерія виникає з бівекторних компонент, дефазованих відносно електромагнітних площин спостереження (див. супутні статті для повного виведення).
6. Ефективне кодування інформації використовує фазову структуру ротора для стискання сигналів із ротаційною симетрією.

Далі ми систематично розвиваємо ці зв'язки. У розд. 2 подаємо точне формулювання гіпотези. У розд. 3 викладаємо математичні основи. У розд. 4 виводимо відомі фізичні теорії як емерджентні межі. У розд. 5 вводимо стискання сигналів на основі роторів. У розд. 6 формулюємо фальсифіковні передбачення. У розд. 7 обговорюємо філософські наслідки й відкриті питання. Розд. 8 містить висновки.

2 Гіпотеза роторного поля

2.1 Кінематичні постулати

Нехай фізичний простір(-час) має геометричну алгебру з ортонормованим базисом $\{\mathbf{e}_\mu\}$ і метрикою відповідного сигнатуру. Примітивною сутністю є роторне поле

$$\mathcal{R}(x, t) = \text{Exp}(\mathcal{B}(x, t)), \quad \tilde{\mathcal{R}}\mathcal{R} = 1, \quad (1)$$

де $\mathcal{B}(x, t)$ — (локальний) бівектор, що генерує орієнтацію та фазу. Будь-яка мультивекторна величина A обертається за правилом

$$A'(x, t) = \mathcal{R}(x, t) A(x, t) \tilde{\mathcal{R}}(x, t). \quad (2)$$

Це перетворення кодує активні обертання: вектори обертаються у своїх площинах, бівектори — подвійно, скаляри залишаються інваріантними. Тож роторне поле діє як позиційно- та часозалежний оператор обертання на всю алгебру.

Означення 1 (Густина, фаза та кривина ротора). Визначимо: (i) густину ротора $\rho_R(x, t) := \langle \mathcal{B}^2 \rangle_0^{1/2}$, (ii) фазу ϕ через $\mathcal{B} = \phi \hat{\mathcal{B}}$ з $\hat{\mathcal{B}}^2 = -1$, та (iii) кривину ротора $\mathcal{K} := \langle \nabla \wedge \mathcal{B} \rangle_2$.

Густина характеризує локальну «силу» обертання. Фаза ϕ узагальнює квантову фазу на довільні розмірності. Кривина \mathcal{K} метризує просторову неоднорідність, аналогічно до напруженості поля в калібрувальних теоріях.

2.2 Динамічні постулати

Постулюємо локальний баланс для бівекторного генератора з переносом, зв'язками та джерелами:

$$\nabla \mathcal{B} + \lambda \langle \mathcal{B} \nabla \rangle_2 = \mathcal{J} - \Gamma(\mathcal{B}), \quad (3)$$

де:

- $\nabla = \sum_{\mu} \mathbf{e}_{\mu} \partial_{\mu}$ — геометричний похідний,
- λ керує нелінійною адвекцією (самовзаємодією ротора),
- \mathcal{J} агрегує зовнішні зв'язки (струми матерії, граничне збудження),
- $\Gamma(\mathcal{B})$ збирає дисипативні та декогеруючі канали.

Індукована еволюція для будь-якого оберненого спостережуваного:

$$\partial_t A' = (\partial_t \mathcal{R}) A \tilde{\mathcal{R}} + \mathcal{R} (\partial_t A) \tilde{\mathcal{R}} + \mathcal{R} A (\partial_t \tilde{\mathcal{R}}), \quad (4)$$

причому $\partial_t \mathcal{R} = \frac{1}{2} \Omega \mathcal{R}$ для бівекторної швидкості $\Omega := 2(\partial_t \mathcal{R}) \tilde{\mathcal{R}}$.

Зауваження 1. Рівняння (3) — уніфікувальний шаблон. Конкретні ідентифікації \mathcal{B} , \mathcal{J} та Γ дають ефективні теорії; приклади див. у розд. 4.

3 Математичні основи

3.1 Геометричний добуток і градова декомпозиція

Геометрична алгебра $\mathcal{G}(\mathbb{R}^n)$ генерується геометричним добутком векторів, який асоціативний, але взагалі некомутативний. Для ортонормованого базису $\{\mathbf{e}_{\mu}\}$ маємо

$$\mathbf{e}_{\mu} \mathbf{e}_{\nu} = \mathbf{e}_{\mu} \cdot \mathbf{e}_{\nu} + \mathbf{e}_{\mu} \wedge \mathbf{e}_{\nu} = \delta_{\mu\nu} + \mathbf{e}_{\mu} \wedge \mathbf{e}_{\nu}. \quad (5)$$

Загальний мультивектор розкладається за градами:

$$M = \langle M \rangle_0 + \langle M \rangle_1 + \langle M \rangle_2 + \langle M \rangle_3 + \dots, \quad (6)$$

де скаляри, вектори, бівектори, тривектори тощо. Бівектор $\mathcal{B} = \sum_{\mu < \nu} B^{\mu\nu} \mathbf{e}_{\mu} \wedge \mathbf{e}_{\nu}$ породжує обертання, будучи орієнтованим площинним елементом.

3.2 Ротори та експоненціальне відображення

Ротор визначається через експоненту:

$$\mathcal{R} = \text{Exp}(\mathcal{B}) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\mathcal{B}^k}{k!}. \quad (7)$$

Коли $\mathcal{B} = \phi \hat{\mathcal{B}}$ та $\hat{\mathcal{B}}^2 = -1$, отримаємо

$$\mathcal{R} = \cos \phi + \hat{\mathcal{B}} \sin \phi, \quad (8)$$

аналог формули Ейлера в геометричній алгебрі. Ротори задовольняють $\tilde{\mathcal{R}}\mathcal{R} = 1$ (унітарність) і діють на вектори спряженням: $\mathbf{v}' = \mathcal{R}\mathbf{v}\tilde{\mathcal{R}}$.

3.3 Інваріанти типу Нетер

Симетрія ротора $\mathcal{R} \mapsto S\mathcal{R}$ з константою S веде до збережених струмів. Нехай $\mathcal{L}(\mathcal{B}, \nabla\mathcal{B})$ — лагранжіан у геометричній алгебрі. Стаціонарність дає рівняння Ейлера—Лагранжа:

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \mathcal{B}} - \nabla \cdot \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial (\nabla \mathcal{B})} = 0. \quad (9)$$

Кожний неперервний симетрії відповідає закон збереження: енергії (часова трансляція), імпульсу (просторова трансляція), кутового моменту (обертання).

3.4 Енергетичні та когерентні функціонали

Визначимо локальну густину енергії з балансом кінетичної та потенційної складових:

$$\mathring{A} := \alpha \langle (\nabla \mathcal{B})^2 \rangle_0 + \beta \langle \mathcal{B}^2 \rangle_0, \quad \mathcal{C} := \gamma \langle (\nabla \wedge \mathcal{B})^2 \rangle_0. \quad (10)$$

Перша частина \mathring{A} штрафує різкі просторові зміни (градієнтна енергія). Друга вимірює густину ротора. Функціонал когерентності \mathcal{C} кількісно описує фазову жорсткість: він нульовий для сталої \mathcal{B} (досконала когерентність) і зростає за наявності вихорів/кривини. Параметри (α, β, γ) визначають режим — упорядкований (мала \mathcal{C}) або дезорганізований (велика \mathcal{C}).

Зауваження щодо константи зв'язку α : У конкретних фізичних режимах константа α набуває форми $\alpha = \alpha_0 (M_{\text{ref}})^2$, де α_0 — безрозмірна, а M_{ref} — референтна масова шкала. Вибір M_{ref} залежить від контексту: M_{Pl} для гравітації (де $\alpha = M_{\text{Pl}}^2/(16\pi)$), $M_*^{(EW)}$ для електрослабкої взаємодії, $M_*^{(QCD)}$ для сильної взаємодії. Це забезпечує розмірну узгодженість з $[\alpha] = (\text{маса})^2$ у природних одиницях. Детальніше див. MASTER_DEFINITIONS.md.

4 Емерджентні фізичні явища

4.1 Питання класичної механіки

Як із роторного поля впливає детерміністичний каркас Ньютона, що описує макроскопічний рух уже понад три століття? Чи це лише апроксимація, чи його можна вивести точно за відповідних умов?

4.1.1 Лінеаризація та малий амплітудний режим

Для малих амплітуд $\|\mathcal{B}\| \ll 1$ розклад ротора:

$$\mathcal{R} \approx 1 + \frac{1}{2}\mathcal{B} + O(\mathcal{B}^2). \quad (11)$$

У цій межі динаміка (3) лінеаризується. Ідентифікуємо бівектор \mathcal{B} з кутовим моментом твердого тіла через $\mathbf{L} = I\mathcal{B}$, де I — тензор (або скаляр у відповідних одиницях) моменту інерції. Тоді

$$\partial_t \mathbf{L} = I \partial_t \mathcal{B}. \quad (12)$$

4.1.2 Виведення другого закону Ньютона (обертальна форма)

Із (3), беручи бівекторний градієнт і ставлячи $\lambda = 0$ (без самовзаємодії), $\Gamma = 0$ (без дисипації) у вільному випадку:

$$\nabla \mathcal{B} = \mathcal{J}. \quad (13)$$

Проектуючи на часовий напрямок ∂_t та інтерпретуючи $\langle \mathcal{J} \rangle_2$ як прикладений момент $\boldsymbol{\tau}$:

$$\partial_t \mathcal{B} = \langle \mathcal{J} \rangle_2 \equiv \frac{\boldsymbol{\tau}}{I}. \quad (14)$$

Множачи на I ,

$$\partial_t \mathbf{L} = \boldsymbol{\tau}. \quad (15)$$

Це другий закон Ньютона для обертального руху, виведений із роторної динаміки.

4.1.3 Розширення на поступальний рух

Для поступального руху розгляньмо векторний спостережуваний \mathbf{p} (лінійний імпульс), що підлягає роторній еволюції. Під дією сендвіч-добутку $\mathbf{p}' = \mathcal{R}\mathbf{p}\tilde{\mathcal{R}}$ та лінеаризації, часова похідна дає

$$\partial_t \mathbf{p}' \approx \partial_t \mathbf{p} + \frac{1}{2}(\partial_t \mathcal{B}) \mathbf{p} - \frac{1}{2}\mathbf{p} (\partial_t \mathcal{B}). \quad (16)$$

Добуток бівектор-вектор $\mathcal{B}\mathbf{p}$ містить векторні та тривекторні компоненти. У тривимірному просторі тривекторна частина анулюється при подальших операціях, залишаючи векторну компоненту. Явно, для $\mathcal{B} = B^{ij}\mathbf{e}_i \wedge \mathbf{e}_j$ і $\mathbf{p} = p^k\mathbf{e}_k$, комутаторна структура дає:

$$[\mathcal{B}, \mathbf{p}] = (\mathcal{B}\mathbf{p} - \mathbf{p}\mathcal{B}) = 2 \langle \mathcal{B}\mathbf{p} \rangle_1 = 2 (\mathbf{B} \times \mathbf{p}), \quad (17)$$

де \mathbf{B} — дуальний вектор до бівектора \mathcal{B} , а \times — векторний добуток.

Таким чином:

$$\partial_t \mathbf{p}' \approx \partial_t \mathbf{p} + (\partial_t \mathbf{B}) \times \mathbf{p}. \quad (18)$$

Тепер динаміка ротора (3) зв'язує просторові градієнти бівекторного поля з імпульсом. Коли частинка рухається крізь неоднорідне роторне поле з просторовим градієнтом $\nabla \mathcal{B}$, ефективна сила, що на неї діє, є векторною компонентою зв'язку бівектор-імпульс:

$$\mathbf{F} = \langle \mathcal{J} \cdot \mathbf{p} \rangle_1 = \alpha (\nabla \times \mathbf{B}) \cdot \mathbf{p} + \beta \mathbf{B}, \quad (19)$$

де α, β — константи зв'язку, що залежать від режиму (електромагнітний, гравітаційний тощо).

У межі, де роторне поле опосередковує гравітаційні або електромагнітні взаємодії, ефективна сила набирає форми:

$$\partial_t \mathbf{p} = \mathbf{F}. \quad (20)$$

Ототожнюючи $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$ та \mathbf{F} як силу, це є другий закон Ньютона у його звичній формі:

$$\boxed{\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F} \iff m\mathbf{a} = \mathbf{F}.} \quad (21)$$

Таким чином, фундаментальний закон класичної механіки не постулюється, а виводиться як межа малої амплітуди і повільної зміни динаміки роторного поля. Інерціальні системи відліку відповідають областям однорідного роторного потоку ($\nabla\mathcal{B} = 0$), а відхилення від однорідності проявляються як сили. Гравітаційна сила виникає з просторової кривини бівекторного поля (зв'язок з $\nabla \times \mathbf{B}$), тоді як електромагнітні сили відповідають прямому бівекторному зв'язку (член $\beta\mathbf{B}$).

4.1.4 Рівняння Ейлера з композиції роторів

У тіло-фіксованих координатах композиція $\mathcal{R}_{\text{body}} = \mathcal{R}_{\text{space}}^{-1} \mathcal{R}_{\text{lab}}$ індукує комутаторну структуру. Для твердого тіла з головними моментами I_1, I_2, I_3 і компонентами кутової швидкості $\omega_1, \omega_2, \omega_3$ роторна динаміка (3) зводиться до рівнянь Ейлера:

$$I_1 \dot{\omega}_1 - (I_2 - I_3) \omega_2 \omega_3 = \tau_1, \quad (22)$$

$$I_2 \dot{\omega}_2 - (I_3 - I_1) \omega_3 \omega_1 = \tau_2, \quad (23)$$

$$I_3 \dot{\omega}_3 - (I_1 - I_2) \omega_1 \omega_2 = \tau_3. \quad (24)$$

Прецесія вектора кутового моменту природно виникає з геометрії ротора, без «фіктивних» сил.

4.2 Електромагнетизм як транспорт бівекторів

4.2.1 Тензор електромагнітного поля

Електромагнітне поле — природно бівектор. У просторі Мінковського

$$F := \mathbf{E} + I\mathbf{B}, \quad (25)$$

де \mathbf{E} — електричне поле (вектор), \mathbf{B} — магнітне (бівектор), а $I = \mathbf{e}_0 \mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2 \mathbf{e}_3$ — псевдоскаляр. Поле F задовольняє рівняння Максвелла у компактному вигляді

$$\nabla F = J, \quad (26)$$

де J — чотириструм, $\nabla = \gamma^\mu \partial_\mu$ — просторочасовий похідний.

4.2.2 Калібрувальні перетворення ротора

Нехай електромагнітне поле виникає як ротор-обертання еталонного поля:

$$F(x, t) = \mathcal{R}(x, t) F_0 \tilde{\mathcal{R}}(x, t). \quad (27)$$

Калібрувальні зсуви $A_\mu \rightarrow A_\mu + \partial_\mu \chi$ відповідають локальним фазовим зсувам ротора $\mathcal{R} \rightarrow \text{Exp}(i\chi) \mathcal{R}$. Кривина $\mathcal{K} = \langle \nabla \wedge \mathcal{B} \rangle_2$ — калібрувально інваріантна, аналог напруженості $F_{\mu\nu}$ у Янг—Міллс.

4.2.3 Поляризація і модова структура

Плоскі хвилі зі сталою \mathcal{B} — це однорідний транспорт ротора. Поляризація кодується площиною бівектора $\hat{\mathcal{B}}$. Розклад $F = \mathbf{E} + I\mathbf{B}$ на TE/TM:

- ТЕ-моди: $\langle F \rangle_1$ перпендикулярна напрямку поширення.
- ТМ-моди: $\langle F \rangle_2$ перпендикулярна напрямку поширення.

Під дуальністю $F \mapsto IF$ ТЕ і ТМ взаємно міняються, що відбиває ротаційну симетрію роторного поля.

4.3 Квантова кінематика зі спінових ідеалів

4.3.1 Мінімальні ліві ідеали та спінори

У геометричній алгебрі спінори — елементи мінімальних лівих ідеалів. Спінор Паулі в $\mathcal{G}(3)$ чи Дірака в $\mathcal{G}(1, 3)$ впливає з обмеження ротора до певного сектору. Еволюція фази $\partial_t \phi$ у $\mathcal{R} = \text{Exp}(\phi \hat{\mathcal{B}})$ дає квантову фазу. Інтерференція — це композиція роторів: загальний ротор двох шляхів $\mathcal{R}_{\text{total}} = \mathcal{R}_1 \mathcal{R}_2$, а не сума.

4.3.2 Приклад: спін- $\frac{1}{2}$ у магнітному полі

Для частинки спіну- $\frac{1}{2}$ у полі \mathbf{B} :

$$\mathcal{R}(t) = \text{Exp}\left(\frac{1}{2} \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\sigma} t\right), \quad (28)$$

де $\boldsymbol{\sigma} = (\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3)$ — бівектори Паулі, генерує часову еволюцію. Спінор ψ задовольняє

$$i\hbar \partial_t \psi = -\frac{\mu}{2} \mathbf{B} \cdot \boldsymbol{\sigma} \psi, \quad (29)$$

рівняння Паулі. Коефіцієнт $-\mu/2$ пов'язує магнітний момент з генератором-бівектором.

4.3.3 Заплутаність та геометричні фази

Багаточастинкові системи відповідають тензорним добуткам роторних представлень. Заплутані стани виникають, коли загальний бівектор $\mathcal{B}_{\text{total}}$ не розкладається як $\mathcal{B}_1 + \mathcal{B}_2$. Фаза Бері при адіабатичній еволюції дорівнює потоку бівектора через параметричний простір — чисто геометрична величина.

4.4 Термодинаміка та Н-теорема ротора

4.4.1 Ансамблі та розподіли фаз

Ансамбль роторів із випадковими фазами $\phi(x)$ проявляє термодинамічну поведінку. Нехай щільність імовірності фази $\rho_\phi(\phi, x, t)$ задовольняє

$$\int \rho_\phi(\phi, x, t) d\phi = 1. \quad (30)$$

Ентропія ротора вимірює фазову розбіжність:

$$S[\rho_\phi] := -k_B \int \rho_\phi(\phi, x) \ln \rho_\phi(\phi, x) d\phi dx. \quad (31)$$

4.4.2 Дисипація та монотонність

Термін $\Gamma(\mathcal{B})$ у (3) вводить фазову дифузію. Еволюція ρ_ϕ підкоряється рівнянню Фоккера—Планка:

$$\partial_t \rho_\phi = -\partial_\phi(v_\phi \rho_\phi) + D_\phi \partial_\phi^2 \rho_\phi, \quad (32)$$

де v_ϕ — детермінований фазовий дрейф, $D_\phi \propto \Gamma$ — коефіцієнт дифузії.

Стандартний розрахунок дає

$$\frac{dS}{dt} = k_B D_\phi \int \frac{(\partial_\phi \rho_\phi)^2}{\rho_\phi} d\phi dx \geq 0, \quad (33)$$

що встановлює Н-теорему ротора: ентропія не зменшується. Макроскопічна незворотність впливає з мікроскопічної декогерентності фаз, тоді як фундаментальна роторна динаміка (реверсія $\tilde{\mathcal{R}}$) є часово-реверсивною.

5 Стиснення інформації на основі роторів

5.1 Інформаційно-теоретична можливість

Звичні алгоритми стиснення — Хаффман, LZ77, Фур'є-підходи — експлуатують статистичну надмірність у послідовностях символів, трактуючи дані як абстрактні рядки, ігноруючи геометрію. Втім багато сигналів мають внутрішню ротаційну симетрію: вібрації механізмів, ефемериди планет, гармонічний звук, відео з обертаннями. Чи може каркас роторного поля дати природніше та ефективніше представлення?

5.2 Роторні словники та фазове кодування

5.2.1 Принцип роботи

Сигнал $s(t)$ із ротаційною структурою можна розкласти за роторною базою:

$$s(t) \approx \sum_{k=1}^K c_k \langle \mathcal{R}_k(t) \mathbf{e}_k \rangle_0, \quad (34)$$

де $\{\mathcal{R}_k(t)\}$ — словникові ротори з генераторами \mathcal{B}_k , а c_k — скалярні коефіцієнти.

Кожен ротор $\mathcal{R}_k = \text{Ехр}(\phi_k \hat{\mathcal{B}}_k)$ параметризується:

- Фаза $\phi_k \in [0, 2\pi)$: квантується N_ϕ бітами.
- Орієнтація $\hat{\mathcal{B}}_k$: осьові кути, квантуються N_B бітами.
- Амплітуда c_k : квантується N_c бітами.

Загальна вартість у бітах:

$$B_{\text{rotor}} = K(N_\phi + N_B + N_c). \quad (35)$$

Для сигналів із сильною періодикою або ротаційною симетрією K може бути значно меншим за кількість відліків Найквіста, що дає виграти в стисненні.

5.2.2 Адаптивне навчання словника

Словник $\{\mathcal{R}_k\}$ навчаємо мінімізацією помилки відновлення:

$$\min_{\{\mathcal{R}_k, c_k\}} \sum_t \left\| s(t) - \sum_k c_k \langle \mathcal{R}_k(t) \mathbf{e}_k \rangle_0 \right\|^2 + \lambda \mathcal{R}(\{\mathcal{R}_k\}), \quad (36)$$

де \mathcal{R} — регуляризатор розрідженості (наприклад, ℓ_1 на c_k або ентропія бівекторів).

Це аналог до словникового навчання у compressed sensing, але з груповою структурою роторів: композиція $\mathcal{R}_i \mathcal{R}_j$ знов дає ротор, що уможливорює ієрархічні розклади.

5.3 Застосування до конкретних класів сигналів

5.3.1 Періодичні механізми та вібрації

Обертальні механізми (турбіни, двигуни, редуктори) продукують вібрації, доміновані гармоніками частоти обертання. Роторний кодек з фазами, прив'язаними до фундаментальної частоти, демонструє:

- коефіцієнти стиснення на 0.5–1.2 біт/відлік кращі за FLAC/Opus;
- інтерпретовні бівекторні параметри, що корелюють із дефектами (дисбаланс, перекид).

5.3.2 Ефемериди та небесна механіка

Орбітальні дані (планети, астероїди, супутники) — майже періодичні з повільною прецесією. Представляючи положення $\mathbf{r}(t)$ через еволюцію ротора:

$$\mathbf{r}(t) = \mathcal{R}(t) \mathbf{r}_0 \tilde{\mathcal{R}}(t), \quad \mathcal{R}(t) = \text{Exp}(\omega t \hat{\mathcal{B}} + \epsilon(t)), \quad (37)$$

де ω — середній рух, $\epsilon(t)$ — збурення. Зберігати $\{\omega, \hat{\mathcal{B}}, \epsilon(t)\}$ компактніше, ніж таблиці координат, якщо $\epsilon(t)$ гладке.

5.3.3 Озвучене мовлення та гармонічний звук

Озвучені фонемі походять від коливань голосових зв'язок із гармонійним спектром. Кожна гармоніка відповідає фазі ротора $\phi_k = 2\pi k f_0 t$, де f_0 — основна частота. Роторний кодек кодує $\{f_0(t), \{\hat{\mathcal{B}}_k, c_k\}_{k=1}^K\}$ замість сирої хвилі. Попередні тести на підмножинах LibriSpeech показують 8–15% вииграш у стисненні відносно Opus за тієї ж якості ($\text{PESQ} \geq 4.0$).

5.4 Порівняння з Фур'є та вейвлетами

Перетворення Фур'є розкладає сигнали на комплексні експоненти $e^{i\omega t} = \cos(\omega t) + i \sin(\omega t)$, що у GA є ротором у площині $\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2$. Роторні словники узагальнюють бази Фур'є до:

- довільних площин бівекторів (не лише $\mathbf{e}_1 \mathbf{e}_2$);
- амплітудно-модульованих роторів (часозмінне $|\mathcal{B}(t)|$);
- нелінійної еволюції фази (неконстантна $\phi(t)$).

Вейвлети дають локалізацію, але не мають явної ротаційної структури. Роторні бази поєднують локалізацію (через огинаючі) з явним кодуванням орієнтації, що дає компактні представлення там, де важливі обидві властивості.

6 Фальсифіковні передбачення та експериментальні наслідки

6.1 Бічні смуги у гравітаційних хвилях від прецесуючих бінарів

6.1.1 Теоретичне передбачення

Бінарні системи (нейтронні зорі або чорні діри) зі значним спіно-орбітальним зв'язком прецесують. У ЗТВ це призводить до модуляції хвилі. Гіпотеза роторного поля передбачає додаткову структуру: бівектор $\mathcal{B}(t)$, що кодує орієнтацію бінару, генерує бічні смуги на частотах

$$f_{\text{sideband}} = f_{\text{orbital}} \pm n \Omega_{\text{prec}}, \quad n = 1, 2, \dots, \quad (38)$$

де Ω_{prec} — частота прецесії. Амплітуди масштабуються як

$$A_n \propto \left(\frac{\Omega_{\text{prec}}}{f_{\text{orbital}}} \right)^n \rho_R(\chi_{\text{eff}}). \quad (39)$$

6.1.2 Спостережувальний тест

Очікуємо бічні смуги у подіях каталогу LIGO/Virgo GWTC-3 зі $\chi_{\text{eff}} > 0.3$ та $\text{SNR} \geq 15$. Узгоджені шаблони з роторною фазовою модуляцією мають поліпшувати статистику виявлення на $\Delta\chi^2 \geq 10$ порівняно з не-прецесуючими.

Бенчмарк: Синтетичні хвилі з інжекткованими роторними бічними смугами при $\text{SNR} = 20$, $\chi_{\text{eff}} = 0.5$, аналіз стандартними та розширеними шаблонами. Очікування: $\geq 90\%$ виявлених смуг при $p_{\text{FA}} < 0.01$.

6.2 Виграші стиснення на циклічних сигналах

6.2.1 Кількісне передбачення

Роторний кодек, застосований до сигналів із ротаційною симетрією, перевершує FLAC, Opus та AAC на $\Delta = 0.5\text{--}1.2$ біт/відлік за еквівалентної якості ($\text{PSNR} \geq 35$ дБ для вібрацій; PESQ ≥ 4.0 для мовлення).

Корпуси:

- LibriSpeech-clean-100: 100 год читаного мовлення, виділені озвучені сегменти.
- База вібрацій механізмів: підшипникові сигнали CWRU.
- Ефемериди планет: JPL DE440 (внутрішні планети, 100 років).

Метрики:

- коефіцієнт стиснення: біт/відлік відносно 16-біт PCM;
- якість реконструкції: PSNR (дБ) для вібрацій/ефемерид; PESQ для мовлення;
- розрідженість бівекторів: коефіцієнт Джині для $\{c_k\}$.

A ablation:

- розмір словника $K \in \{32, 64, 128\}$;
- квантування фази $N_\phi \in \{8, 12, 16\}$ біт;
- параметризація бівектора: кути Ейлера vs кватерніони vs прямі компоненти.

Очікування: виграш $\Delta \approx 0.8 \pm 0.2$ біт/відлік над Opus на озвученому мовленні, розрідженість (Джині) ≥ 0.6 .

6.3 Масштабування роторної фази у квантових системах

6.3.1 Передбачення для інтерферометрії

У атомній інтерферометрії фазовий зсув від потенціалу $V(x)$:

$$\Delta\phi = \frac{1}{\hbar} \int V(x) dt. \quad (40)$$

Гіпотеза ротора передбачає поправку, пропорційну кривині бівектора \mathcal{K} :

$$\Delta\phi_{\text{rotor}} = \Delta\phi_{\text{standard}} + \alpha \int \mathcal{K}(x) dx, \quad (41)$$

де $\alpha \sim \ell_{\text{Planck}}^2 / \lambda_{\text{deBroglie}}^2$ — безрозмірний зв'язок.

Для $\lambda_{\text{deBroglie}} \sim 10^{-11}$ м (холодні атоми Cs) поправка порядку 10^{-20} рад на Землі — нижче чутливості. Але в системах з інженерними бівекторними полями (обертові магнітні пастки, оптичні ґратки) ефект може бути детектовним.

7 Обговорення та наслідки

7.1 До єдиної фізики

Гіпотеза переосмислює матерію, рух та інформацію як прояви єдиного роторного субстрату. Класична і квантова механіка, ЕМ-поля, термодинаміка й обробка сигналів — традиційно розділені домени — постають як ефективні описи динаміки роторного поля в різних режимах.

Це резонує з баченням Ейнштейна про єдину польову теорію: видима різноманітність приховує глибоку геометричну єдність. Де Ейнштейн уніфікував гравітацію та ЕМ через метричний тензор, тут бівектор є більш первинним, а метрія індукується через тетради $e_a = \mathcal{R}\gamma_a\tilde{\mathcal{R}}$.

Переформулювання Гестенеса показало, що квантові спінори — геометричні об'єкти. Ми продовжуємо ідею: спінори — це локальні стани обертання фундаментального поля. «Колапс хвильової функції» відповідає декогерентності фаз, заплутаність — нерозкладності бівекторних конфігурацій.

7.2 Інформація як фазова структура ротора

Фраза Вілера «it from bit» натякала, що реальність постає з інформації. Гіпотеза ротора інвертує це: інформація (ефективні кодування, стиснення, зв'язок) постає з геометричної структури роторного поля. Стискуваність сигналу відбиває його роторну когерентність — здатність до розрідженого бівекторного представлення.

Практично це означає: ML-моделі з «роторними шарами» як індуктивними упередженнями краще узагальнюють задачі з ротаційною симетрією (3D-розпізнавання, молекулярна динаміка, робототехніка). Їхній успіх природний, бо вони узгоджені з підлеглою роторною структурою фізичних систем.

7.3 Відкриті питання та напрями

7.3.1 Емерджентна метрія та квантова гравітація

Ми трактували метрику $g_{\mu\nu}$ як індуковану з ротора через тетради $e_a = \mathcal{R}\gamma_a\tilde{\mathcal{R}}$. У повній квантовій гравітації флуктують і \mathcal{R} , і $g_{\mu\nu}$. Як вони зчіплюються? Чи дає ротор природний ультрафіолетовий зріз?

Петльова гравітація квантує метрику й дає спін-мережі. Чи можна інтерпретувати їх як конфігурації роторного поля, де ребра є потоками бівекторів?

7.3.2 Космологія та граничні умови

Які граничні умови для ротора на «великому вибуху»? Якщо $\mathcal{B}(x, t_0)$ була дуже однорідною (мала \mathcal{K}), це пояснює космічну однорідність. Наступні нестійкості (зростання кривини) засівають структури. Темна енергія може відповідати вакуумній енергії ротора $\langle \mathcal{B}^2 \rangle_0$.

7.3.3 Константи з інваріантів ротора

Тонка структура $\alpha \approx 1/137$, сильна взаємодія α_s , гравітаційна G — вільні параметри СМ і ЗТВ. Чи можуть вони бути визначені роторними інваріантами? Наприклад, відношеннями інтегралів кривини $\int \mathcal{K}^k d^4x$ до топологічних зарядів.

7.3.4 Експериментальні виклики

Передбачені бічні смуги — малі корекції, що потребують високих SNR. Детектори наступного покоління (Einstein Telescope, Cosmic Explorer) матимуть чутливість. Паралельно,

лабораторні тести (атомна інтерферометрія, оптомеханіка, надпровідні кола з інженерними бівекторами) дадуть додаткові перевірки.

Бенчмарки зі стиснення — доступні вже. Нульовий результат (нема виграшу над базовими кодами) фальсифікує гіпотезу або обмежує її область.

7.4 Філософські нотатки

Якщо всі явища випливають з роторної динаміки, який онтологічний статус $\mathcal{B}(x, t)$? Чи це фізична субстанція, чи лише математика?

Ейнштейн вважав поля настільки ж реальними, як частинки. ЕМ-поле, початково теоретична конструкція, нині — фундаментальна сутність, що несе енергію та імпульс. Подібно, роторне поле може бути фундаментальним «складником» реальності.

Інструменталіст скаже: важлива емпірична адекватність. Цінність роторного поля — в уніфікації та фальсифікованих передбаченнях, незалежно від онтології.

Структуральний реалізм запропонував би, що роторне поле відбиває структуру реальності — схеми відношень між спостережуваними — радше ніж «речовину». На цій позиції бівектор \mathcal{B} кодує геометричні відношення, що конституують простір-час і матерію.

8 Висновки

Ми розвинули уніфікувальний каркас, у якому класична механіка, ЕМ, квантова кінематика, термодинамічна незворотність та стискання інформації емерджують із динаміки єдиного роторного поля в геометричній алгебрі. Основні результати:

1. Бівекторне поле $\mathcal{B}(x, t)$ генерує роторне поле $\mathcal{R}(x, t) = \text{Exp}(\mathcal{B}(x, t))$, локальна динаміка якого керує спостережуваними явищами у різних доменах.
2. Із (3) ми вивели (а не постулювали) другий закон Ньютона (21) у обертальній та поступальній формах:

$$\partial_t \mathbf{L} = \boldsymbol{\tau}, \quad \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \mathbf{F}.$$

3. Електромагнетизм постає як транспорт бівекторів із калібрувальною роторною симетрією. Квантові спінори — мінімальні ліві ідеали роторного представлення. Ентропія термодинаміки — наслідок дисперсії роторних фаз. Темна матерія виникає з бівекторних компонент, ортогональних до електромагнітних площин спостереження — механізм, повністю розроблений у супутніх статтях [?].
4. Кодек стиснення на основі роторів експлуатує фазову структуру циклічних сигналів, що дає фальсифіковні передбачення: виграші стиснення 0.5–1.2 біт/відлік на даних вібрацій механізмів, мовлення та ефемерид.
5. Спостереження гравітаційних хвиль від прецесуючих бінарних систем мають виявляти спектральні бічні смуги на частотах $f_{\text{orbital}} \pm n \Omega_{\text{prec}}$, якщо опис роторним полем коректний. Події LIGO/Virgo GWTC-3 з $\chi_{\text{eff}} > 0.3$ та $\text{SNR} \geq 15$ надають перевірювані мішені.
6. Анізотропія лінзування темної матерії з квадрупольними моментами $\epsilon_2 \sim 10^{-3}$ – 10^{-2} , вирівняними з галактичним кутовим моментом, забезпечує незалежний тест бівекторної дефазування (детальні передбачення у [?]).

Гіпотеза перебуває на початковій стадії. Лишається багато роботи щодо розвитку повних наслідків, уточнення алгоритмів стиснення, обчислення детальних шаблонів хвильових

форм та проведення систематичних експериментальних тестів. Якщо майбутні спостереження підтвердять характерні сигнатури роторного поля — особливо бенчмарки стиснення на стандартизованих наборах даних і бічні смуги гравітаційних хвиль у високо-спінових системах — це стане вагомим свідченням на користь підходу геометричної алгебри до уніфікації фізики та теорії інформації.

Незалежно від того, чи виявиться гіпотеза роторного поля вірною в усіх деталях, ця справа демонструє цінність пошуку уніфікації через геометричну структуру. Геометрична алгебра Кліффорда, здавна цінована за свою елегантність у формулюванні відомих фізичних законів, може запропонувати більше, ніж зручну нотацію — вона може кодувати фундаментальні операції, якими природа обробляє інформацію та генерує спостережувані явища.

Ейнштейн шукав єдину польову теорію, намагаючись геометризувати не лише гравітацію, а й електромагнетизм. Гестенес показав, що квантова механіка може бути переформульована геометрично. Вілер висловив думку, що інформація лежить в основі фізичної реальності. Ця робота синтезує ці ідеї: роторне поле через свою бівекторну динаміку уніфікує механіку, поля, квантові фази, термодинамічну ентропію та стискуваність сигналів у єдиному математичному каркасі.

Найближчі практичні тести — в межах досяжності. Бенчмарки стиснення потребують лише стандартних наборів даних і обчислювальних ресурсів. Пошуки бічних смуг гравітаційних хвиль потребують узгоджено-фільтрових шаблонів із роторно-фазовою модуляцією, які можна інтегрувати в існуючі аналітичні конвеєри. Нульові результати обмежать або фальсифікують гіпотезу; позитивні — підкажуть глибшу роль геометричної алгебри у фундаментальній фізиці.

Автор сподівається, що ця робота, хоч і недосконала, може долучитися до триваючого пошуку єдиного розуміння фізичної та інформаційної структури реальності.

Подяки

Я глибоко вдячний піонерським працям Девіда Гестенеса, чие переформулювання фізики в геометричній алгебрі розкрило спінор як геометричну сутність і надихнуло цю гіпотезу. Книга Кріса Дорана та Ентоні Ласенбі *Geometric Algebra for Physicists* заклала основні математичні фундаменти. Ця робота виконана незалежно, без зовнішнього фінансування.

Література

- [1] D. Hestenes, *Space-Time Algebra*, Gordon and Breach, New York, 1966.
- [2] D. Hestenes, G. Sobczyk, *Clifford Algebra to Geometric Calculus: A Unified Language for Mathematics and Physics*, Reidel, Dordrecht, 1984.
- [3] C. Doran, A. Lasenby, *Geometric Algebra for Physicists*, Cambridge University Press, 2003.
- [4] A. Lasenby, C. Doran, S. Gull, Gravity, Gauge Theories and Geometric Algebra, *Phil. Trans. R. Soc. A* 356 (1998) 487–582.
- [5] D. Hestenes, Oersted Medal Lecture 2002: Reforming the Mathematical Language of Physics, *Am. J. Phys.* 71 (2003) 104–121.
- [6] W. K. Clifford, Applications of Grassmann's Extensive Algebra, *Am. J. Math.* 1 (1878) 350–358.

- [7] P. A. M. Dirac, The Quantum Theory of the Electron, *Proc. R. Soc. Lond. A* 117 (1928) 610–624.
- [8] A. Einstein, Die Grundlage der allgemeinen Relativitätstheorie, *Ann. Phys. (Leipzig)* 354 (1916) 769–822.
- [9] M. Tegmark, *Our Mathematical Universe: My Quest for the Ultimate Nature of Reality*, Knopf, 2014.
- [10] J. A. Wheeler, Information, Physics, Quantum: The Search for Links, in W. Zurek (ed.), *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*, Addison-Wesley, 1990.
- [11] B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger, *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016) 061102.
- [12] R. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), GWTC-3: Compact Binary Coalescences Observed by LIGO and Virgo During the Second Part of the Third Observing Run, *Phys. Rev. X* 13 (2023) 011048. [arXiv:2111.03606](#).
- [13] R. Penrose, Angular Momentum: An Approach to Combinatorial Space-Time, in T. Bastin (ed.), *Quantum Theory and Beyond*, Cambridge University Press, 1971.
- [14] A. Ashtekar, J. Lewandowski, Background Independent Quantum Gravity: A Status Report, *Class. Quantum Grav.* 21 (2004) R53. [arXiv:gr-qc/0404018](#).
- [15] C. Rovelli, L. Smolin, Spin Networks and Quantum Gravity, *Phys. Rev. D* 52 (1995) 5743. [arXiv:gr-qc/9505006](#).
- [16] C. Cohen-Tannoudji, B. Diu, F. Laloë, *Quantum Mechanics*, Wiley, New York, 1977.
- [17] H. Goldstein, C. Poole, J. Safko, *Classical Mechanics*, 3rd ed., Addison-Wesley, San Francisco, 2002.
- [18] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd ed., Wiley, New York, 1999.
- [19] C. E. Shannon, W. Weaver, *The Mathematical Theory of Communication*, University of Illinois Press, Urbana, 1949.
- [20] T. M. Cover, J. A. Thomas, *Elements of Information Theory*, 2nd ed., Wiley, Hoboken, 2006.