



КВАНТОВА

МЕХАНІКА КРОВІ

— Знайомтесь, це Василь.
Він вивчає еритроцити.
— Так, я вивчаю еритроцити,
мій батько вивчав еритроци-
ти, мій дід вивчав еритроцити.
Розумієте, еритроцити —
це у нас у крові.

(Анекдот)

Сформульовані у 20-ті роки минулого століття закони квантової механіки дозволили не лише кількісно описати поведінку атомних та молекулярних систем, але й переглянути методологію наукових теорій.

Відтак, провідники квантових уявлень, Нобелівські лауреати з фізики, такі як **Нільс Бор**, **Ервін Шредингер**, **Вольфганг Паулі**, **Вернер Гейзенберг**, неодноразово намагалися використати нову методологію в інших природничих науках, зокрема, в біології. Для багатьох напрямків досліджень така «братня допомога» виявилася доволі корисною та повчальною.

Американський фізик **Стенлі Роуландс** запропонував за допомогою формул квантової механіки описувати деякі особливості поведінки крові. В одній зі своїх пізніх статей він пише, що у молоді роки дуже зацікавився властивістю постійного магнітного поля сприяти швидкому загоєнню переламів кінцівок. Він навіть змінив помешкання — переїхав ближче до клініки, де було впроваджено відповідну методику.

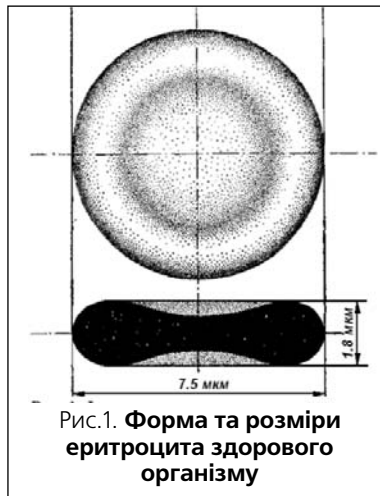


Рис.1. Форма та розміри еритроцита здорового організму

Багато років він спостерігав за цим незвичайним явищем і одночасно вивчав найрізноманітніші літературні джерела, аби пояснити побачене з наукової точки зору. Його увагу привернула, зокрема, концепція когерентних збуджень **Г. Фрьоліха** (див. «Країна знань» №4 за 2008 р.), яка ближче за інші теорії підійшла до з'ясування ключової ролі електромагнітних хвиль у живому світі.

Так сталося, що загадку терапевтичної дії магнітного поля С. Роуландс не розв'язав, про що відверто написав у згаданій статті. Водночас, йому вдалося просунутись у розумінні природи іншого таємничого явища. Йдеться про деякі незвичайні особливості крові. Але все по порядку.

Кров утворюється у кістковому мозку та складається з так званих формених елементів — *еритроцитів*, *тромбоцитів* і

лейкоцитів, що рухаються у рідкій плазмі. Відношення концентрацій цих частинок складає приблизно 700:1:0,02 на користь еритроцитів.

Еритроцит — червоне кров'яне тільце, яке при розгляданні крізь мікроскоп виглядає округлим, увігнутим з обох сторін диском (рис.1). Він є своєрідним маленьким резервуаром для *гемоглобіну* — залізовмісного білка, завдяки якому відбувається перенесення кисню по судинах, тобто, процес дихання.

Гемоглобін надає крові характерного червоного забарвлення. Як і у будь-якій біологічній клітині, в еритроциті його внутрішній вміст відокремлено від зовнішнього оточення мембраною — надзвичайно тонкою плівкою з упорядкованих ліпідних молекул.

Якщо краплину свіжої крові нанести на предметне скло мікроскопа, у полі зору з'явиться величезна кількість еритроцитів (1 мм³ крові містить приблизно 5·10⁶ червоних клітин). Частину їх розкидано хаотично, а частина нагадує розсипані стовпчики з монет (рис. 2).

Ці, так звані «монетні стовпчики» спостерігали вже давно, однак, тривалий час не було відповіді на питання, яку роль вони відіграють у фізіології, а головне: як вони утворюються.

Загадку «монетних стовпчиків» частково розв'язав ра-

дяньський фізик **О.Л. Чижевський** у своїх книгах «*Структурний аналіз рухомої крові*» (1959) та «*Електричні та магнітні властивості еритроцитів*» (1973). Утворення стовпчиків під час руху по судинах він пояснив гідродинамічними, електричними та магнітними властивостями червоних клітин.

За Чижевським, кожен еритроцит подібний до крихітного колеса, яке розташовується у судині найзручнішим для себе чином — поперек потоку, паралельно стінці судини. У її центрі та по краях шари рідкої плазми, згідно законів гідродинаміки, рухаються з різною швидкістю — чим ближче до стінки, тим повільніше. Різниця у швидкостях «закручує» еритроцит, і він наче котиться вздовж судини. Для зменшення опору рідини клітини рухаються «тісною колоною» (Рис. 3). Пригадайте, як їдуть велосипедисти у командних перегонках: попереду — тимчасовий лідер, а інші члени команди, аби зменшити опір повітря, підлаштовуються під лідера — колесо до колеса.

Зовнішня поверхня мембрани еритроцита несе надлишковий негативний заряд, що призводить до електростатичного відштовхування між клітинами. Оскільки еритроцити обертаються, заряди утворюють круговий струм, в результаті чого виникає магнітне поле, яке взаємно притягує клітини.

За розрахунками Чижевського, сили електростатичного відштовхування та магнітного притягання приблизно однакові. Разом вони сприяють упорядкованості руху еритроцитів по судинах здорової людини. Якщо людина хвора, рух червоних клітин стає більш хаотичним, неупорядкованим. За деяких умов може навіть виникнути тромб — незворотній згусток еритроцитів, що, як ві-

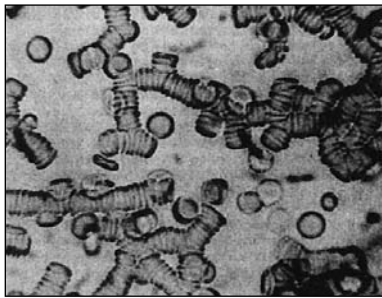


Рис.2. Кров під мікроскопом

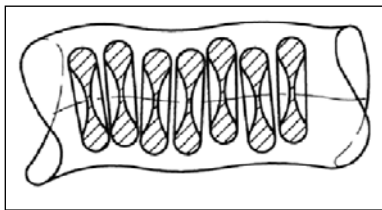


Рис.3. Колективний рух еритроцитів по судині

домо, може призвести до закупорки судин та негативних наслідків.

Зауважимо, що здатність кров'яних клітин до злипання (*адгезії*), з'явлене взаємодією вбудованих у мембрани білкових молекул, використовується в медичному аналізі як показник РОЕ (реакція осадження еритроцитів). Наразі О.Л. Чижевського вважають засновником *динамічної гематології* — нового розділу медицини. Однак, не на всі питання щодо структуроутворення крові вчений дав відповідь.

Отже, утворення «монетних стовпчиків» під час руху по судинах знайшло пояснення: гідродинамічні сили сприяють упорядкуванню еритроцитів у напрямку руху, а їх власні електричні та магнітні поля забезпечують загальну стійкість системи клітин.

Що ж тоді збирає їх у стовпчики поза судинами, на предметному склі мікроскопа?

З позиції фізики, питання можна сформулювати таким чином: *які сили в масивах розмірів еритроцита ($\sim 10^3$ - 10^4 нм) можуть призводити до їх достатньо сильної взаємодії?*

Саме цю проблему почав вивчати С.Роулендс. Він виходив з простих положень. *По-перше*, сили не можуть мати хімічну природу, оскільки хімічна взаємодія розповсюджується лише на розміри порядку атома або молекули ($\sim 10^{-1}$ нм).

По-друге, ці сили не можуть бути ані електростатичними, ані магнітними, оскільки еритроцити несуть однакові заряди і поза судинами не обертаються.

По-третє, чисельні значення цих сил мають бути узгоджені з фізіологічним станом організму.

С. Роулендс спостерігав крізь мікроскоп утворення стовпчиків досить довго, доки не зрозумів, що не всі деталі спостережуваної картини він може зафіксувати візуально. Вчений застосував мікрофотозйомку.

З'ясувалося, що більшу частину часу клітини рухаються повільно, відповідно до законів Броунівського руху. Але, час від часу, коли клітини підходять достатньо близько, вони наче кидаються одна до одної зі швидкістю, значно більшою за повільний Броунівський рух.

Вдалося помітити, що клітини крові, перебуваючи поза судинами, часто зв'язані між собою ледь помітними білковими нитками, які досягають довжини 10^4 - 10^5 нм. Можна було б припустити, що саме ці нитки сприяють швидкому злипанню і утворенню стовпчиків. Але це мав би бути активний процес, такий, що вимагає витрат енергії. Без цього, навіть високо еластичні нитки не можуть забезпечувати достатніх сил притягання при малих відстанях.

Кількісний аналіз експериментальних даних вимагав залучення фізичної моделі, яка була б у змозі описати поведінку еритроцитів у плазмі. С.Роу-

лендс обрав *теорію коагуляції колоїду*, яку розробив на початку XX століття видатний польський фізик-теоретик **Маріан Смолуховський** (1872-1917), і яку згодом було поширено на еластичні, великі за розмірами частинки несферичної форми.

Згідно теорії, коефіцієнт дифузії окремої частинки дорівнює $D = kT / 6\pi\eta r$, де: k — стала Больцмана, T — температура, а знаменник є коефіцієнтом Стокса повільного руху жорсткої сфери радіуса r у середовищі з в'язкістю η . Цей коефіцієнт дає зв'язок між силою F та швидкістю V частинки: $F = 6\pi\eta r V$ (Рівняння, відоме у студентських колах, як «*Шість піруетів*»). Швидкість V , у свою чергу, визначає деяку константу часу — τ , що є характерним параметром для системи у цілому. У розширеній теорії схожі співвідношення можна записати для системи, яка моделює еритроцит в оточенні плазми крові.

Спостерігаючи та аналізуючи рух окремої частинки, можна визначити як параметри середовища, так і сили, що діють між частинками. Врахування взаємодії частинок призводить до виникнення поняття *кластер* — структурного утворення, у якого з'являються нові властивості, відсутні у ізольованої частинки.

Одним із яскравих явищ, яке супроводжує формування кластерів, є так звана *обмежена дифузійною агрегація* — ОДА (*Diffusion Limited Aggregation — DLA*). У цьому процесі частинки здійснюють випадкове блукання доти, доки не досягнуть деякої нерухомої поверхні. Поверхня у точці приєднання частинки відповідним чином збільшується. При комп'ютерному моделюванні ОДА отримують красиві кластери (Рис. 4), які часто можна зустріти на обкладинках наукових журналів.

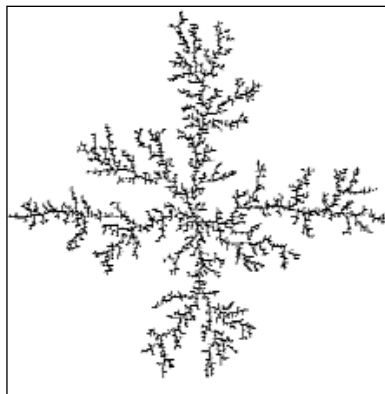


Рис. 4. Кластер, який отримано шляхом комп'ютерного моделювання ОДА

Комп'ютерна обробка кінцевого кластера дозволяє відтворити параметри системи: температуру, в'язкість, константу часу, тип та характер взаємодії частинок.

У С. Роулєндса не було можливості проводити комп'ютерний аналіз (дослідження виконувались у 70-і роки XX ст.). Він вручну проаналізував величезну кількість мікрофотознімків формування «монетних стовпчиків» і дійшов висновку, що рух еритроцитів може бути описаний в термінах *аномальної дифузії*.

На відміну від *нормальної* дифузії, аномальній притаманні кілька констант часу. Стосовно еритроцитів, таких констант виявилось три: «*повільна*» характеризувала звичайну дифузію без урахування взаємодії частинок, «*швидка*» та «*проміжна*» були зумовлені осьовою та позаосьовою взаємодією еритроцитів. Несиметричний розподіл сили є характерним, наприклад, для диполів. Як зазначалося раніше, електростатичні сили із розгляду виключаються. Однак, може йтися про частинки зі *змінним у часі дипольним моментом*. Тобто, якби еритроцити могли генерувати змінне електричне поле, воно спричинило б взаємодію на достатньо великих відстанях.

Саме тоді С. Роулєндс і пригадав концепцію Г. Фрьоліха про біологічну когерентність. Нагадаємо коротко її положення.

Жива система характеризується нелінійністю, нерівноважністю і наявністю значних електричних потенціалів. За Г.Фрьоліхом, у такій системі за певних умов можуть виникнути узгоджені (когерентні) електропружні коливання ділянок мембран, молекулярних комплексів чи інших внутріклітинних елементів. Схоже колективне збудження величезної кількості частинок спостерігається, наприклад, у лазерах. Ці міркування було підкріплено розрахунками на простих моделях.

Наприклад, було показано, що за умови постійного притоку енергії метаболізму можуть виникнути повздовжні електричні коливання ділянок біологічної мембрани, яка, як відомо, має дуже високу напруженість внутрішнього поля ($\sim 10^5 \text{ В/см}$). Характерні частоти таких коливань мають, за оцінками, порядок 10^{11} Гц .

Спеціально поставлені експерименти підтвердили, що взаємодія між еритроцитами узгоджується з головними постулатами концепції Г.Фрьоліха. Так, позбавлення клітин джерел енергії або зменшення до нуля мембранного потенціалу одразу унеможливило формування «монетних стовпчиків».

У 1985 р. польським фізиком вдалося поміряти спектр поглинання еритроцитів в області частот поблизу 10^{11} Гц . Для цілих кров'яних клітин і для їх «тіней» — мембранних оболонки — спектр містить чітку смугу на частоті $0.367 \cdot 10^{11} \text{ Гц}$ (Рис. 5), що свідчить на користь модельних розрахунків. Існування у мембрани резонансних властивостей підтверджує можливість взаємодії еритроцитів через високочастотні коливання.

Відтак наведені факти мали б вселяти оптимізм.

Разом з тим, концепція біологічної когерентності базується на квантових уявленнях. Отже, обираючи її для пояснення взаємодії між еритроцитами, необхідно приписати останнім квантові властивості. Еритроцити, незважаючи на малі — мікроскопічні — розміри, поза всяким сумнівом є *макроскопічними системами*. А для макроскопічних систем фізика на сьогодні знайшла лише два приклади застосування квантового підходу: надпровідність і надплинність, тобто, явища, які відбуваються за дуже низької температури.

Коректність застосування квантових рівнянь для макроскопічних систем в інших умо-

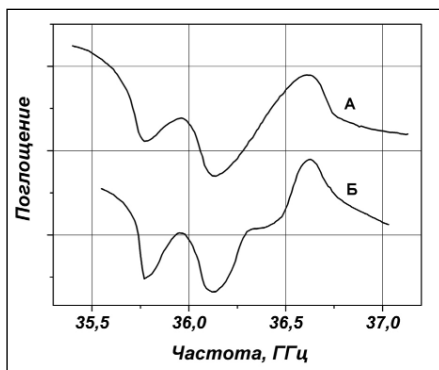


Рис.5 Спектри поглинання еритроцитів (А) та їх «тіней» (Б), Phys.Lett. 109A, № 3 (1985)

вах є методологічною проблемою, яку і намагалися розв'язати свого часу великі фізики ХХ ст. — Н. Бор, Е. Шредінгер, В. Гейзенберг та ін. Ця проблема залишилася каменем спотикання для С. Роуландса та

його послідовників. Їх висновки щодо квантової природи формування «монетних стовпчиків» сприймаються науковою спільнотою неоднозначно.

Ідеї Г. Фрьоліха не є загальноприйнятими. Його концепція і досі не перетворилася на теорію. Однак, це не заважає все новим і новим дослідникам Живого використовувати його ідеї у своїй роботі.

А.В. Якунов,

кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри оптики
фізичного факультету
Київського національного
університету
імені Тараса Шевченка
yakunov@univ.kiev.ua

ЗАДАЧІ ДЛЯ КМІТЛИВИХ

Щоб навчитися вирішувати різні задачі, потрібна тривала практика і часто така дотепність, якій не можна навчитись. *«Дотепність — це квітка, яка росте не на всякому ґрунті і розпускається так, що ніхто не знає як»*, — говорив відомий автор книги *«Життя комах»* Жан Анрі Фабр (1823-1915), який дуже високо цінував математику і застосовував її у своїх описах життя досліджуваних ним істот.

Сьогодні ми пропонуємо вам такі старовинні задачі:

3.1. У батька було три сини. Усі вони вчилися добре.

Щоб перевірити, хто з них найдотепніший, батько зробив так: взяв п'ять однакових кашкетів і попросив хлопчиків прикріпити на них три червоні і дві білі емблеми. Зав'язавши синам очі, він надів кожному на голову кашкет, а два, що залишилися, сховав. Знявши синам пов'язки з очей, попросив відгадати: яка емблема — червона чи біла — у кожного на кашкеті?

Подумавши трохи, один з

хлопчиків відповів, правильно обґрунтувавши свою відповідь. Спробуйте і ви сказати, яка емблема була на кашкеті цього хлопчика, як він це визначив, які емблеми були на кашкетах інших хлопчиків.

3.2. В одному оповіданні Артура Конан-Дойля про Шерлока Холмса є задача.

Доктор Ватсон і його гість Шерлок Холмс сидять біля відкритого вікна, в саду чути веселі голоси дітей.

Ш.Х. Скільки у Вас дітей?

Д.В. Там діти 4-х сімей: найбільше з усіх — моїх, трохи менше — дітей брата, ще менше — сестриних, а менше всіх дядькових. Вони шумлять, тому що їх не вистачає для 2-х команд по 9 чоловік. Що цікаво, якщо перемножити ці 4 числа, то отримаємо номер нашого будинку ...

Ш.Х. Спробую обчислити число дітей у кожній родині. Але (подумавши трохи) даних мало. Скажіть, у Вашого дядька одна дитина чи більше?

(Отримавши відповідь) Тепер відповідь у мене є.

ПИТАННЯ: Скільки дітей у кожній родині і який номер будинку Доктора Ватсона?

3.3. Льву Миколайовичу Толстому дуже подобалася наступна задача: *«Артілі косарів треба було скосяти дві ділянки, одну вдвічі більшу за іншу. Половину дня вся артіль косила велику ділянку. Після цього артіль розділилася навпіл: перша половина залишилася на великій ділянці і докосила її до вечора; друга ж половина артілі косила малу ділянку, на якій до вечора ще залишився куточок, який за наступний день скосяв один косар»*.

Скільки косарів було в артілі?

3.4. Чи наздожене Ахіллес (швидконогий казковий герой греків) черепаху, якщо він пересувається в 10 разів швидше за черепаху, але черепаху в момент старту була на деякій відстані попереду Ахіллеса?

3.5. В які моменти протягом 12 годин, починаючи з 0 годин 0 хвилин, хвилинна стрілка покриває годинну?