

# Рідкі кристали і життя

Микола ГРИЦЕНКО

## 1. Вступ

Рідкі кристали (мезофаза) поєднують у собі властивості твердого кристала (анізотропія) і звичайної рідини (текучість). Ці властивості зумовлені орієнтаційною упорядкованістю видовжених молекул. З орієнтаційною упорядкованістю пов'язана і унікальна пружність рідкого кристала, що відрізняється своєю природою від пружності твердого тіла. Текучість, анізотропія властивостей і специфічна пружність рідких кристалів пояснюють надзвичайно високу їх чутливість до зовнішніх впливів — температури, механічної дії, домішок, зовнішніх полів та ін. Рідкі кристали існують у досить обмеженому інтервалі температур, близьких до кімнатної температури. Вони здатні самоорганізовуватися в різні упорядковані структури і легко змінювати ці структури залежно від зовнішнього оточення. Мезофаза має унікальні оптичні властивості, найбільш характерними з яких є подвійне променезаломлення (оптична анізотропія) та надзвичайно висока оптична активність (здатність повертати площину поляризації світла), якщо молекули рідкого кристала мають несиметричну форму.

Аналогічні властивості було виявлено в цілої низки біологічних структур, які визначають життя на Землі: вони лабільні (рухливі), надчутливі до зовнішніх подразників, здатні самозаліковуватися, виявляють подвійне променезаломлення та оптичну активність. Біологічні процеси в таких структурах відбуваються у вузькому температурному інтервалі, близькому до кімнатної температури. Це лише зовнішня формальна аналогія між біологічними об'єктами і рідкими кристалами. Але виявилось, і це підтверджують сучасні дослідження, що рідкі кристали дуже поширені в живій природі і становлять її основу. Вони входять як структурні утворення до багатьох біологічних об'єктів і відіграють вирішальну роль у життєвих процесах. Рідкі кристали входять до складу основних речовин мозку, м'язів, крові, органів зору, білків кісток та сухожилів, мієлінових оболонки нервових волокон, мембран біологічних клітин, сперматозоїдів, вірусів та інших біологічних структур. Мезофазу може утворювати біологічна речовина ДНК (дезоксирибонуклеїнова кислота) — носій спадкової інформації живого організму.

Біологічні об'єкти живого світу надзвичайно складні за будовою, тому їх структура та механізми функціонування перебувають лише на початку-

вому етапі вивчення. Для дослідження біологічних структур у наукових лабораторіях використовуються той самий арсенал фізичних методів, що й для дослідження рідких кристалів: поляризаційно-мікроскопічний аналіз, рентгеноструктурний аналіз, електронна і атомна мікроскопія та ін. Дослідження за допомогою поляризаційного мікроскопа виявили в структурах живих організмів подвійне променезаломлення, яке є найбільш характерною ознакою рідкокристалічного стану. Комплексні сучасні дослідження показали, що функціонально важливі біологічні структури живих організмів перебувають у рідкокристалічному стані, і є всі підстави сподіватися, що в недалекому майбутньому біологічні процеси в живих організмах (скорочення м'язів, передача нервових імпульсів, функціонування клітинних мембран, механізми роботи рецепторів органів відчуття та ін.) можна буде пояснити на основі теорій і моделей, розроблених для рідких кристалів.

До складу структур живої матерії входять рідкі кристали іншого класу порівняно з добре дослідженими термотропними мезофазами, які різняться з першими за будовою та властивостями і вже широко застосовуються в науці й техніці. Це так звані **ліотропні рідкі кристали** (від грец. *лио* — розчиняю, *трос* — перетворення). Ліотропні рідкі кристали утворюються при розчиненні деяких органічних речовин у певних розчинниках і існують в обмеженому інтервалі концентрацій. Це досить поширений клас рідких кристалів, які доволі часто трапляються в живій природі. Розчинність органічних речовин, з яких складається жива матерія, залежить від властивостей розчинника. В ліотропній мезофазі біологічного походження розчинником слугує вода, яка є одним із найважливіших компонентів живої матерії. Так, тіло людини приблизно на 70 % складається з води. Будучи полярною, вода є прекрасним розчинником для мінеральних солей та інших полярних (йонних) речовин, у т. ч. й органічних. Але більшість органічних речовин неполярні, тому вони у воді не розчиняються. Ліотропні мезофази живої матерії — це розчини деяких органічних речовин у воді. Механізм утворення ліотропних мезофаз і їх структура на сьогодні в основних рисах відомі. Фізика ліотропних рідких кристалів перебуває лише на початку свого розвитку, але в майбутньому, поза сумнівом, її досягнення відкривають нові можливості для розуміння будови і властивостей живої матерії.

Виправлення. У статті «Фізика рідких кристалів» (див.: «Фізика та астрономія в шк.», 2008 № 5—6) на с. 52 (1-ша колонка внизу) слід читати: «... уможливлуючи управління подвійним променезаломленням».

\* Про основні властивості термоскопних рідких кристалів див.: «Фізика та астрономія в шк.» — 2008. № 3, 4, 5—6.

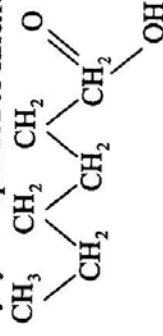
## 2. Ліотропні рідкі кристали

Ліотропні рідкі кристали — це анізотропні розчини певних органічних речовин у деяких розчинниках. Вивчаючи роль ліотропних рідкокристалічних структур у різних проявах життя, розглядатимемо лише ліотропні мезофазу на основі води як розчинника. За зовнішнім виглядом ліотропні рідкі кристали нічим не відрізняються від термотропних мезофаз: вони текучі, мають анізотропію фізичних властивостей, тому виразно виявляють подвійне променезаломлення. Спостереження в поляризаційній мікроскоп свідчать, що вони утворюють текстури, цілком подібні до текстур термотропних рідких кристалів. Відрізнити структуру ліотропного рідкого кристала від термотропного вдалося лише за допомогою методу рентгеноструктурного аналізу. Структура ліотропної мезофазу виявилась значно складнішою, ніж термотропної. Будучи макроскопічно однорідним середовищем, ліотропні рідкі кристали є мікроскопічно неоднорідними (мікротерогенними). Мікротерогенність ліотропних рідких кристалів полягає в утворенні при розчиненні органічних речовин різних регулярних чи напіврегулярних мікроструктур, елементами яких є кульки, циліндричні трубочки, пластинки, які складаються з молекул розчинених компонентів розчину. Мікроструктура ліотропної мезофазу визначається властивостями розчинника і розчиненої речовини і залежить від концентрації розчину. Основу структури всіх ліотропних рідких кристалів, так само, як і термотропних, становлять упорядковані розташовані видовжені молекули.

Видовжені молекули ліотропних рідких кристалів порівняно з молекулами термотропних мезофаз мають одну суттєву відмінність — вони складаються із двох частин: **полярної, яка має постійний дипольний момент, і неполярної, що має вигляд довгого гнучкого вуглеводневого ланцюжка** (інді двох ланцюжків). Полярна група молекули добре розчиняється у воді, оскільки її молекули також є полярними. Вона називається **гідрофільною**, тобто тією, що любить воду (від грец. *філос* — люблю). Неполярна частина молекули у воді не розчиняється, тому називається **гідрофобною**, тобто та, що не любить воду (від грец. *фобос* — страх). Гідрофобні фрагменти молекул ще називають **ліпофільними**, тобто такими, що люблять жир (від грец. *ліпос* — жир). Ліпофільні молекули добре розчиняються в органічних розчинниках (у тому числі в жирі) і зовсім не розчиняються у воді. Молекули ліотропних рідких кристалів складаються з гідро- та ліпофільної частин, тому називаються **амфільними**, тобто такими, що люблять і те, і те (від грец. *амфі* — з двох боків). Речовини з амфільними молекулами називають **амфілами**.

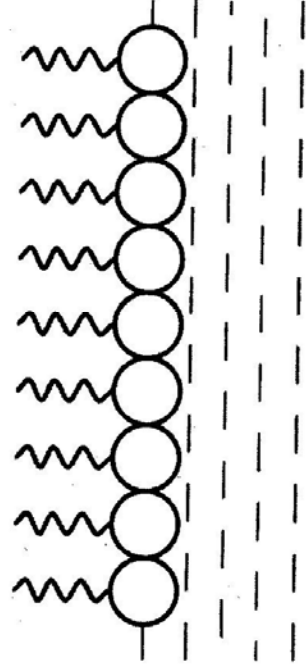
Існує велика кількість амфілів, які можуть утворювати ліотропні мезофазу. Найбільш поширеними з них є жирні кислоти, а також ліпідні, тобто жироподібні речовини, які входять до складу всіх

живих клітин і відіграють важливу роль у життєдіяльності організмів. Серед ліпідів треба виділити холестерин й етери, що він утворює з жирними кислотами, а також фосfolіпіді, найскравішим представником яких є лецитин. Найпростішу будову мають амфільні молекули жирних кислот із загальною формулою  $C_nH_{2n+1}COOH$ . У них полярна  $CO_2H$  зв'язана з більш чи менш довгим неполярним ланцюгом  $C_nH_{2n+1}$ . Для наочності наведемо структурну формулу валеріанової кислоти ( $n = 5$ ):



Схематично амфільну молекулу зображимо у вигляді кільця (гідрофільна головка), з'єданого з хвилястим «хвостом» (гідрофобна частина). Прикладами гідрофільних фрагментів можуть також бути:  $-CO_2Na$ ,  $-CO_2K$ ,  $-SO_3K$  та ін.

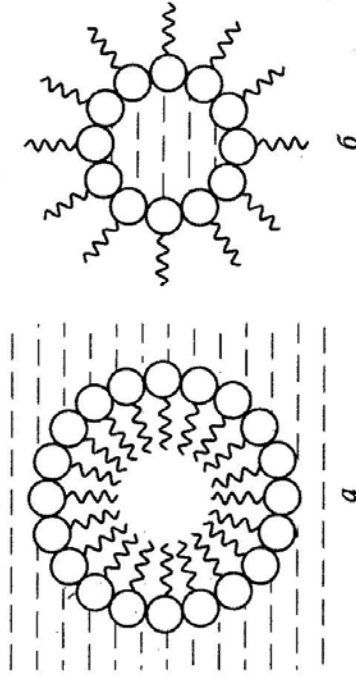
Поведінка амфільної молекули при контакті з водою визначається диполь-дипольною взаємодією гідрофільного фрагмента з полярними молекулами води та дисперсійною взаємодією вуглеводневих ланцюгів, виштовхнутих водою. Розчинник (вода) «розчиняє» лише гідрофільний фрагмент амфільної молекули, не приймаючи її гідрофобний ланцюг. Тому розчинення амфільних молекул у воді в класичному розумінні не відбувається: гідрофільна головка «розчиняється» лише в поверхневому шарі води, а гідрофобний вуглеводневий ланцюжок вода не приймає, і тому він установлюється перпендикулярно до поверхні води. Таке «розчинення» радше слід назвати гідратацією, ніж розчиненням. Якщо концентрація амфільних молекул (далі — концентрація розчину) є достатньою для покриття всієї вільної поверхні розчинника полярними головками молекул амфілу, то утвориться поверхневий молекулярний орієнтований шар амфільних молекул, який називають ліпідним шаром (мал. 1). Отже, механізм упорядкованості



Мал. 1

ліпідного шару в мезоморфній фазі є результатом двоїстої природи взаємодії амфільних молекул з водою. Значимо принагідно, що існують методи перенесення ліпідного шару з поверхні води на тверду поверхню. Такі молекулярні орієнтовані шари на твердій поверхні називають *ленгмюр'євськими плівками*, що становлять основу сучасної молекулярної електроніки.

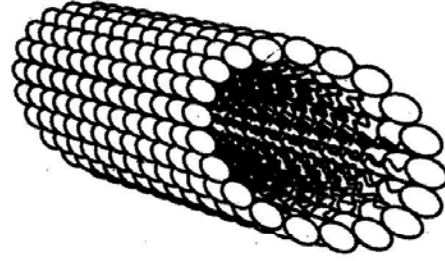
Якщо вільної поверхні води не вистачає для всіх молекул амфіфілу, то додаткову поверхню води полярні головки «шукають» у водяних бульбашках всередині рідини, розташовуючись відносно цієї поверхні аналогічно — головками до води. Енергетично вигіднішою є сферична форма бульбашки, що має мінімальну поверхню. У цьому разі з амфіфільних молекул утворюється сферична упорядкована структура, яка називається **міцелюю** (від лат. *мица* — крихта). Полярні головки амфіфільних молекул у звичайній сферичній міцелі покривають внутрішню поверхню сфери, контактуючи з водою, а неполярний ланцюг повернутий всередину бульбашки (мал. 2, а).



Мал. 2

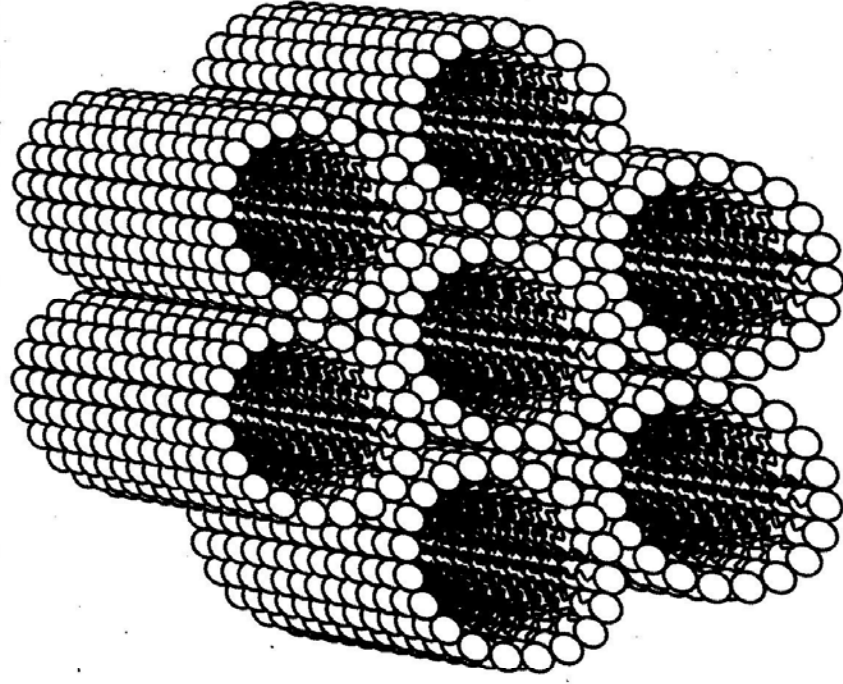
Розміри сферичних міцел — порядку 100 А. При збільшенні концентрації розчину сферичні міцели утворюються доти, доки не займуть весь об'єм розчину, утворивши щільну упаковку. Для сферичних міцел такою упаковкою буде кубічна гране- чи об'ємноцентрована. Таким чином, сферичні міцели стають будівельними блоками, з яких утворюється ліотропний рідкий кристал. Простір між міцелами заповнюється тонким прошарком води. Утворена кубічна ґратка з далеким тривимірним трансляційним порядком є ліотропним рідким кристалом. Така високовпорядкована структура є текучою, як і рідина, але внаслідок високого ступеня симетрії (сферичні міцели, кубічна ґратка) — оптично ізотропна. Це випадок, коли рідкий кристал як високовпорядкована рідина не виявляє подвійного променезаломлення, характерного для всіх рідких кристалів. Кубічну структуру ліотропного рідкого кристала з тривимірним трансляційним порядком підтвердив рентгеноструктурний аналіз.

Якщо і далі збільшувати концентрацію розчину, то додаткову вільну поверхню гідрофільні фрагменти амфіфільних молекул «шукатимуть» у циліндричних об'ємах всередині води, які мають більшу вільну поверхню. Утворюються циліндричні міцели невизначеної



Мал. 3

довжини, які можуть бути або відкритими, або закритими. Полярні головки амфіфільних молекул у звичайній циліндричній міцелі покривають внутрішню поверхню циліндра, а неполярні ланцюги повернуті всередину циліндра (мал. 3). Перебудова структури при збільшенні концентрації розчину відбуватиметься доти, доки циліндричними міцелами не заповниться весь об'єм розчину. Щільна упаковка циліндричних міцел відповідає гексагональній структурі з двовимірним далеким трансляційним порядком. При такій упаковці кожна циліндрична міцела оточена шістьма аналогічними циліндрами, які є будівельними блоками для утворення гексагональної кристалічної ґратки (мал. 4). Простір між



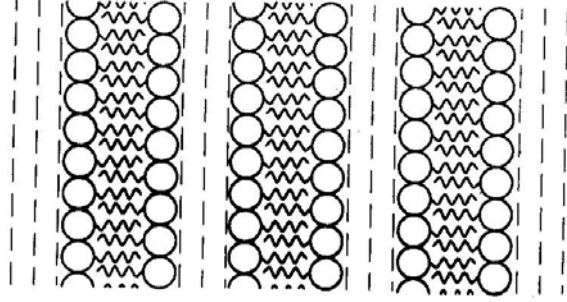
Мал. 4

циліндричними міцелами заповнений тонким прошарком води. Ця високовпорядкована структура є текучою й оптично анізотропною з оптичною віссю, направленою вздовж осі циліндрів. У ній спостерігається сильне подвійне променезаломлення. Згідно з класичним визначенням мезофази така структура є типовим ліотропним рідким кристалом.

Перебудова структури триватиме і в разі подальшого збільшення концентрації розчину. Вільна поверхня для полярних фрагментів амфіфільних молекул збільшиться внаслідок утворення шаруваті структури, коли циліндри розгорнуться в плоскі поверхні по всьому об'єму розчину. Утворюється подвійні шари амфіфільних молекул, що їх розділено тонкими прошарками води (мал. 5). У бімолекулярних шарах вуглеводневі «хвости» молекул амфіфілу повернуті назустріч один одному, а полярні головки — до прошарків води. Товщина бімолекулярних шарів

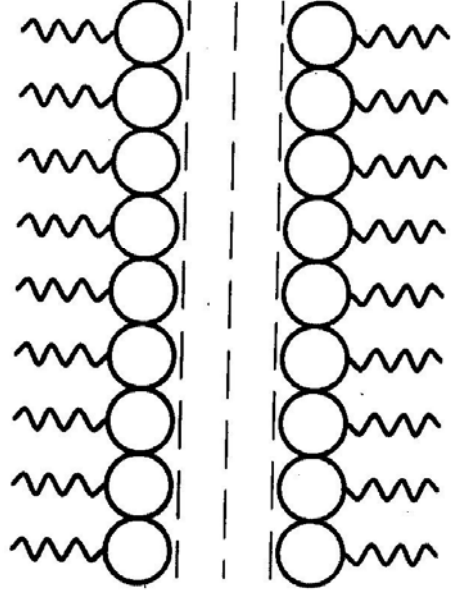


дівное приблизно подвійній довжині молекули і становить 50—100 Å. Шарувату структуру ліотропних рідких кристалів називають **ламельярною**. Ламельярна структура є енергетично найбільш вигідною, тому і найбільш стійкою, і реалізується в досить широкому інтервалі концентрацій амффілу у воді. Вона частіше інших трапляється серед ліотропних рідких кристалів. Ламельярна структура ліотропних рідких кристалів практично збігається зі структурою термотропних рідких кристалів смектичного типу. Звідси і назва цих рідких кристалів (від лат. *смегма* — мило). Шарувату структуру має розчин мила ( $C_{17}H_{35}CO_2K$ ) у воді, а структура мильної півки складається із двох шарів упорядкованих амффільних молекул, розділених тонким прошарком води (мал. 6).



Мал. 5

тично збігається зі структурою термотропних рідких кристалів смектичного типу. Звідси і назва цих рідких кристалів (від лат. *смегма* — мило). Шарувату структуру має розчин мила ( $C_{17}H_{35}CO_2K$ ) у воді, а структура мильної півки складається із двох шарів упорядкованих амффільних молекул, розділених тонким прошарком води (мал. 6).

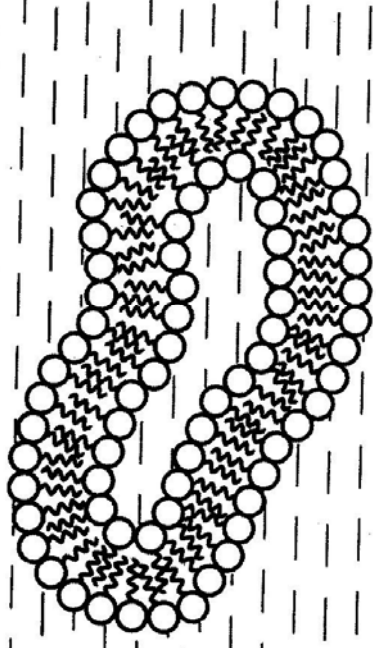


Мал. 6

Якщо води в розчині залишиться зовсім мало, то можуть утворитися так звані **інвертовані міцели** — вивернуті відносно звичайних міцел. У цьому випадку воду вже не можна вважати розчинником — вона заповнює внутрішній об'єм циліндричних чи сферичних міцел, а полярні фрагменти амффільних молекул орієнтовано всередину міцели (див. мал. 2, б). Такі розчини вже важко назвати рідкими кристалами. При повному випаровуванні води з розчину може утворитися шаруватий твердий кристал амффілу. Інвертовані міцели можна одержати і при менших концентраціях, якщо розчиняти амффіли в органічних розчинниках. У цьому разі прошарки між інвертованими міцелами заповнюються органічним розчинником.

Теоретично ліотропний рідкий кристал, залежно від концентрації, може переходити крізь усі розглянуті структури, які можна вважати окремими мезофазами. І справді, реальним ліотропним рідким кристалом, так само як і термотропним, притаманний **поліморфізм** — властивість існувати в декількох мезофазах. Параметром, який визначає фазові переходи в ліотропних рідких кристалах, є концентрація. Температура також впливає на фазові переходи, але вона не є визначальним параметром, до того ж інколи навіть руйнує мезофазу.

Реальні ліотропні рідкі кристали мають одну або декілька названих мезофаз. Надмолекулярна структура ліотропних мезофаз залежить не лише від концентрації, а й від властивостей розчинника та молекулярної будови амффільних молекул. Наприклад, водний розчин фосфоліпідів не може утворювати міцелярних структур. Це пояснюється тим, що молекули фосфоліпідів мають по два гідрофобних ланцюжки, приєднаних до однієї гідрофільної головки. З таких молекул міцели не утворюються через геометричний чинник — гідрофобні ланцюжки не вмщаються в об'ємі міцели. Тому фосфоліпіді утворюють різні за формою подвійні шари, розділені тонкими прошарками води. Замкнуті структури, утворені подвійними шарами, називають **ліпосомами** (мал. 7). Як фосфоліпіді, так і утворені на їх основі ліпосоми, відіграють надзвичайно важливу роль у живій природі. Як ми побачимо пізніше, ліпосоми є дуже близькими за структурою до біологічних мембран.



Мал. 7

Слід зазначити, що міцели та інші надмолекулярні агрегати ліотропних мезофаз внаслідок тепловото руху постійно змінюють свою форму і взаємне розташування, тому не є жорсткими геометричними об'єктами. Вони є статистичними утвореннями, але мають високий ступінь стабільності, який легко змінюється зі зміною зовнішніх умов (температури, концентрації та іншого).

### 3. Рідкі кристали — елементи живої матерії

Першоосновою живої природи є клітина. Клітини — це найменші біологічні утворення з яких побудований весь живий світ — від найпростіших мі-

короорганізмів до людини. Клітини різних організмів дуже різняться між собою як за складністю будови, так і за формою та розмірами, але всі вони складаються з однакових структурних елементів: ядра і біологічної мембрани, яка його оточує. В ядрі клітини містяться так звані органели — біологічні структурні утворення, які відповідають за окремі важливі функції клітини. Всі органели відділено від внутріклітинної рідини також біологічними мембранами.

На сьогодні встановлено основні функції клітини як самоорганізуючої і самовідтворюваної динамічної системи: обмін речовин, забезпечення різних біосинтезів, здійснення регуляторних механізмів усіх біологічних процесів, генерація і трансформація енергії, яка забезпечує життєдіяльність організму, його ріст і самовідтворення, збереження генетичної інформації, що забезпечує спадкові ознаки кожного організму та ін. Характерною властивістю живої клітини є її активна реакція на зовнішні дії: світло, звук, температуру, гравітаційні та електромагнітні поля, на хімічні речовини з навколишнього середовища тощо. Ключову роль у забезпеченні всіх життєво важливих процесів, які відбуваються в клітині, відіграють біологічні мембрани. Тому вивчення структури і біофізики мембран, як і інших біологічних утворень, є важливим з погляду встановлення механізмів життєдіяльності організмів.

Структуру клітинного ядра та біологічних мембран успішно вивчає наука, але механізми біологічних процесів, які забезпечують життєдіяльність організмів, на сьогодні ще не з'ясовано. Проте достеменно встановлено, що ряд структурних елементів клітин перебувають у рідкокристалічному стані, а саме — в ліотропній мезофазі. Структуру, властивості і механізми функціонування біологічних структур вивчає молекулярна біологія — галузь науки, яка межує з фізикою, хімією і біологією. Завдяки об'єднанню зусиль учених різних наукових напрямів молекулярна біологія розкрила чимало таємниць живої природи.

Нас цікавить лише фізичний аспект цієї проблеми, коли біологічні системи розглядаються з погляду принципів надмолекулярної організації цих систем, тобто як рідкокристалічні структури. Такий підхід при поясненні механізмів біологічних процесів дасть змогу використовувати як добре досліджені фізичні властивості мезофаз (надмолекулярну структуру, рухливість, анізотропію, специфічну пружність), так і методи досліджень та теоретичні підходи фізики рідких кристалів, яка є досить розвинутою галуззю сучасної фізики. До того ж виявилось, що рідкі кристали є унікальними модельними системами для низки біологічних структур. Усе це дає підстави сподіватись, що в недалекому майбутньому буде досягнуто певного прогресу щодо розуміння біологічних процесів на клітинному і молекулярному рівні.

Користуючись фізичними моделями та сучасними досягненнями фізики рідких кристалів, фізики близько підійшли до зрозуміння і пояснення механізмів функціонування деяких біологічних структур: самозаліковування дрібних пор у мембранах, скорочення м'язів, поширення нервових імпульсів, дію йонного насоса та ін. Рідкокристалічний аспект

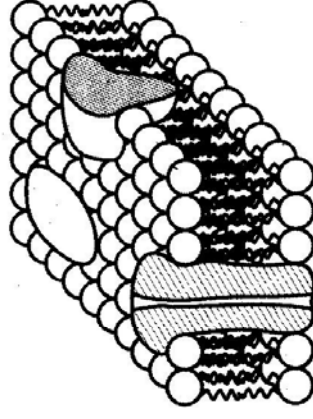
вивчення біологічних структур відкриває додаткові можливості для дослідження біологічних процесів на молекулярному рівні.

Найкращим прикладом, коли виявляється рідкокристалічний аспект будови і функціонування біологічних структур, є біологічна мембрана. Реальна будова і механізми функціонування біологічних мембран є досить складними, до того ж ще й недостатньо вивченими. Проте сучасними фізичними методами вдалося встановити склад і структуру мембран і штучно створити її модель з ліпідів, води і білків у вигляді ламелярного утворення, яке може виконувати деякі функції природних біологічних мембран. Для змодельованих штучних мембран використувувались фосфоліпіди, виділені з біологічних структур. Така штучна мембрана за структурою дуже нагадує ліпосому (див. мал. 7) — замкнуті подвійні шари фосфоліпідів, які перебувають у ліотропній мезофазі і є антиподом мильної півки (див. мал. 6).

За сучасними уявленнями, підтвердженими рентгенівськими та електронно-мікроскопічними дослідженнями, основою біологічної мембрани є тонкий (~80 Å) подвійний шар, який складається з фосфоліпідів, води та білків. Молекули фосфоліпідів досить рухливі в межах подвійного шару і мають високій ступінь орієнтаційної упорядкованості за браком трансляційного порядку. В поляризованому світлі мембрани виявляють подвійне променезаломлення. Це підтверджує, що біологічна мембрана перебуває в мезоморфному фазовому стані, тобто є ліотропним рідким кристалом. Мезоморфний стан є ідеальним станом для перебігу біологічних процесів: він лабільний, чутливий до зовнішніх впливів, легко поглинає чи пропускає крізь себе речовини різної структури та ін. Мембрана в мезоморфному стані швидко реагує на внутрішньоклітинні процеси і процеси, які відбуваються в навколишньому середовищі. Молекули білків по-різному вмонтовані в подвійний шар: вони можуть бути на поверхні шару, можуть занурюватися або навіть пронизувати його. Білкові молекули, будучи великими за розмірами, в подвійному шарі малорухливі. Вони слугують катализаторами біохімічних процесів, а також виконують інші важливі функції. Рідкокристалічна модель мембрани наведена на мал. 8.

Встановлено найважливіші функції біологічних мембран. Будучи механічною оболонкою, яка захищає ядро клітини і утримує його в певному об'ємі, мембрана відіграє роль електричного ізолятора клітини. Вона також виконує роль фільтра, який регулює введення в клітину чи виведення із неї в навколишнє середовище різних речовин,

у тому числі йонів ( $K^+$ ,  $Na^+$ ), а також відіграє роль йонного насоса (натрієво-калієвого). Мембрани можуть «впізнати» свої клітини і відчувати всі



Мал. 8

інші, захоплювати і поглинати необхідні структури. Мембрани нервових клітин відіграють вирішальну роль у процесі поширення електричних імпульсів нервовими волокнами. Мембрани, будучи напівпроникиними бар'єрами для різних речовин, поділяють клітину на відсіки і регулюють процеси обміну речовин. Біологічні мембрани відіграють важливу роль у багатьох інших життєво важливих процесах, які відбуваються у клітинах. Принципово важливим є те, що мембрана виконує всі свої функції, коли вона перебуває в рідкокристалічному стані. При кристалізації (твердненні) мембрани, спричиненій, наприклад, пониженням температури, вона припиняє виконувати свої функції.

Зв'язок між будовою живої матерії і рідких кристалів прослідковується і на інших біологічних структурах. Одним з перших утворень живих організмів, у яких виявлено ліотропну мезофазу, були так звані **мієлінові фігури**. Це подвійні трубки, які оточують нервові волокна та інші біологічні об'єкти. У поліризovanому світлі мієлінові оболонки виявляють сильне подвійне променезаломлення. Рентгеноструктурним аналізом було встановлено, що мієлінові оболонки мають гексагональну структуру з інвертованими міцелами, тобто є високовпорядкованими структурами. Вони складаються з бімолекулярного шару радіально орієнтованих ліпідних молекул і концентричних шарів білка. Структури, аналогічні мієліновим фігурам, удалося змодельовати. Розчинені у воді фосфоліпіди під дією ультразвуку утворюють ліпосоми, які є рідкокристалічними системами і дуже подібні до мієлінових фігур нервових волокон.

Рідкокристалічну структуру мають так звані спеціалізовані рецептори — приймачі зорової, слухової та іншої інформації. Рецептори не лише вловлюють, переносять і зберігають енергію, а й перетворюють її. Наприклад, світлова енергія може перетворюватися у хімічну, електричну чи механічну енергію. Найважливішими для життя на Землі є фоторецептори, які є перетворювачами сонячної енергії. Вони виконують не лише зорову функцію, а й здійснюють фотосинтез. Світлопоглинально речовиною при фотосинтезі є хлорофіл. Поліризаційно-мікроскопічний аналіз та електронно-мікроскопічні дослідження показали, що хлорофіл у живих клітинах виявляє подвійне променезаломлення і має ламелярну структуру, тобто є ліотропним рідким кристалом.

Зорова функція фоторецепторів здійснюється за участю паличок і колбочок сітківки ока. Експериментальні дослідження показують, що елементи цих структур виявляють подвійне променезаломлення і є високовпорядкованими утвореннями, які складаються із ліпідів та білків, організованих у ламелярні шари товщиною близько 250 Å. Ламелярні шари розділено прошарками води.

Ламелярні рідкокристалічні структури входять також до складу роговиці ока. Оптичні та електронно-мікроскопічні дослідження показують, що ці біологічні структури є закрученими і за оптичними властивостями нагадують холестеричні рідкі кристали. Крок спіралі цих структур відповідає довжині хвилі

видимого світла. Закрученість ламелярних структур пов'язана з несиметричністю видовжених молекул, які ці структури утворюють.

Подвійне променезаломлення в поляризованому світлі виявляють м'язові волокна. Рентгеноструктурні дослідження показують, що структура м'язових клітин може перебувати в декількох рідкокристалічних фазових станах і близька до структури смектичних рідких кристалів. Жорсткість м'язових волокон при скороченнях для передачі сил і статичних моментів надає рідкокристалічна ґратка.

Ми розглянули лише найхарактерніші біологічні структури, які мають певну впорядкованість і яскраво виявляють рідкокристалічні властивості. Щоб зрозуміти механізми процесів, які в них відбуваються, необхідні подальші дослідження. Але найважливіший результат проведеного порівняння ліотропних рідких кристалів з біологічними структурами полягає у тому, що в їх будові і властивостях є багато спільного. Ціла низка властивостей притаманна як ліотропним рідким кристалам, так і живим організмам: висока чутливість до зовнішніх впливів, орієнтаційна впорядкованість структурних елементів і пов'язана з нею анізотропія властивостей, стабільність цієї впорядкованості (навіть у стані течії). Ліотропні рідкі кристали складаються з тих самих компонентів, що й живі організми — з біологічних молекул (ліпіди, білки, нуклеїнові кислоти та ін.). Для багатьох біологічних структур характерною є закрученість надмолекулярної структури, подібна до закрученості структури холестеричних рідких кристалів. Багато біологічних молекул (білків, РНК, ДНК та ін.) мають форму спіралей, а речовини з такими молекулами можуть перебувати в рідкокристалічному стані.

Біомолекули живих організмів синтезуються у природних умовах, проте їх синтез вдалося здійснити і в лабораторних умовах. Біомолекули, будучи амфільними, мають унікальну здатність утворювати у водних середовищах орієнтовані моно- та бімолекулярні шари у складі клітинних рідкокристалічних структур. Так формуються структури біологічних мембран, мієлінових фігур та інших біологічних утворень. В лабораторних умовах удалося створити штучні біологічні структури на основі ліотропних рідких кристалів, які близькі за будовою з аналогічними природними біологічними структурами і виконують окремі їх функції. Виявляється, що рухливі структури з орієнтаційною впорядкованістю є ідеальним середовищем для перебігу біологічних, біофізичних, біохімічних чи хімічних процесів, які й забезпечують як самовідтворення, так і ріст живих клітин.

#### 4. Рідкі кристали і патологія живого організму

Умовою нормальної життєвості організму є стабільність функціонування біологічних структур, які забезпечують умови саморегуляції обмінних процесів у живих клітинах. Практично всі біохімічні процеси, які відбуваються в живих клітинах і забезпечують організм речовинами та енергією, необхідними для його життєвості, росту і самовідтворення, відбуваються і в структурах з рідкокристалічним



упорядкуванням. Тому зміна ліпідного складу біологічних мембран, структурна перебудова мезофази, кристалізація окремих компонентів біологічних систем спричинятимуть зміну текучості і пружних характеристик мезофази, що порушує саморегуляцію обміну речовин і призводить до патологічних змін у живому організмі. Зміна властивостей мембран при патології залежить також від вмісту води в мезофазі.

У нормі ліпідні локалізуються лише в мембранах і мають рідкокристалічну структуру. В патології ліпідна фракція може переходити в саму клітину, що порушує процеси транспорту йонів крізь мембрану. Вихід ліпідів з бішару мембрани порушує її селективну проникність і може спричинити розвиток патологічних станів і навіть загибель клітини. Зміна фазового складу мембран еритроцитів може призводити до анемії, лейкозу, бронхіальної астми, гіпертонічної хвороби та інших захворювань. При патології може змінюватися форма еритроцитів, що супроводжується втратою рідкокристалічності речовини мембрани і робить її нестабільною.

Процеси трансформації ліотропної мезофази, викликані зміною температури чи зменшенням концентрації води, також відіграють певну роль у виникненні різних патологічних процесів у живих організмах, наприклад при атеросклерозі чи жовчнокам'яній хворобі, утворенні пухлин, у процесах старіння. На дослідах було встановлено, що в атеросклеротичних ураженнях містяться холестерин, етери холестерину і фосфоліпіді, але переважну більшість відкладень на артеріальних стінках становлять етери холестерину, які є термотропними рідкими кристалами. Атеросклеротичні бляшки перебувають у рідкокристалічному стані. В лабораторних умовах, досліджуючи чотирикомпонентні системи (холестерин, етери холестерину, лецитин, вода), вчені змоделювали процеси, які відбуваються при атеросклерозі. Результати досліджень показали, що на ранніх стадіях хвороби атеросклеротичні зміни можуть бути зворотними, якщо підібрати відповідний розчинник для холестерину і його етерів. Є позитивні результати щодо можливості лікування атеросклерозу лікарськими засобами. Так, введення олеїнової кислоти сприяє розчиненню атеросклеротичних бляшок.

Рідкокристалічна фаза була виявлена в жовчі людини. Дослідження показали, що рідкі кристали є передвісниками жовчнокам'яної хвороби. За деяких умов з рідкокристалічної фази можуть утворюватися тверді кристали моногідрату холестерину. Є всі підстави сподіватися, що жовчнокам'яну хворобу можна буде лікувати за допомогою лікарських препаратів.

Деякі хвороби організму спричиняють структурні зміни клітини. Прослідковується зв'язок між різними захворюваннями і рідкокристалічним станом біологічних структур клітини. При зміні орієнтаційної впорядкованості змінюється перебіг біохімічних реакцій у клітині, що може призвести до неконترولованого росту злоякісних клітин. Уявлення про рідкокристалічний стан допоможе краще зрозуміти

природу цих складних біологічних процесів.

При зміні концентрації води в ліотропній мезофазі біологічних структур можуть відбуватися зворотні перетворення:  $\leftrightarrow$  ламелярна структура  $\leftrightarrow$  гексагональна  $\leftrightarrow$  кубічна  $\leftrightarrow$  міцелярна  $\leftrightarrow$  істинний розчин. З такими перетвореннями пов'язують процес старіння організму. Механізм старіння ще повністю не з'ясовано, але є дані, що він пов'язаний зі структурними змінами мезофази в живому організмі. Деяко спрощене уявлення про процес старіння пов'язують зі зменшенням концентрації води в клітині, що супроводжується переходом гексагональної структури в ламелярну, а потім — у кристалічну, тобто припускають, що під час старіння відбувається зміна мембран у бік збільшення їх кристалічності. Якщо це так, то процес старіння можна буде уповільнити, змінюючи ступінь гідратації хімічним способом. Це питання також вивчає наука.

Використання уявлень про рідкокристалічний стан деяких біологічних структур і вивчення процесів у них наближає нас до розуміння природи багатьох захворювань живих організмів і може вказати раціональні шляхи їх лікування.

## 5. Заключення

Описані біологічні структури і процеси в них — це спрощені схеми порівняно з реальними біологічними об'єктами, що є надзвичайно складними утвореннями, в яких відбуваються складні біологічні процеси. Це вказує на те, що ця галузь знань є далеко не завершеною, а цей напрям наукових досліджень перебуває лише на початку свого розвитку. Наша задача полягала в тому, щоб на основі результатів наукових досліджень багатьох учених показати, що біологічні структури є досить упорядкованими системами і за структурною організацією належать до ліотропних рідких кристалів, що для раціонального пояснення механізмів функціонування живих організмів до цих структур можна використувати досягнення фізики рідких кристалів. Предмет цього аналізу вказує на добрі потенціальні можливості використання рідкокристалічних підходів при дослідженні біологічних явищ. Ми сподіваємося, що цей матеріал дасть змогу читачам скласти уявлення про стан досягнень у цій галузі, зацікавить їх, особливо молодь, майбутніх учених, і вони в майбутньому зроблять свій вагомий внесок у розвиток цієї галузі науки.

1. Браун Г., Уолкен Дж. Жидкие кристаллы и биологические структуры. — М.: Мир, 1982. — 198 с.

2. Жидкие кристаллы в морской медицине / Под ред. А. А. Лобенко. — К.: Наук. думка, 1992. — 95 с.

3. Сонин А. С. Кентавры природы. — М.: Атомиздат, 1980. — 192 с.

4. Пикин С. А., Блинов Л. М. Жидкие кристаллы. — М.: Наука, 1982. — 208 с.

5. Белиловский В. Д. Эти удивительные жидкие кристаллы. — М.: Просвещение, 1987. — 112 с.