

Присвячується моїй матері, Наталії Борисівні Ястребовій

ПЕРЕДМОВА

Як казав відомий біохімік сер Фредерік Гоулленд Гопкінс, життя — це така штука, яка відбувається (*life is a thing that happens*)¹. Інакше кажучи, життя — це процес, що іноді є швидким, а іноді — дуже повільним. Приклад швидкого життєвого процесу — синтез і розпад молекул, які постачають клітині енергію: час їхнього існування вимірюється секундами. Приклад повільного процесу — значні еволюційні зміни, які іноді розтягуються на мільярди років. Царина знань, що охоплює одразу всі ці явища, може декому здатися неосяжною, як паща стародавнього бога смерті, одна губа якого дістає до неба, а інша — до землі². Почасти, так воно і є. Біологія — дуже багатолика наука, до того ж, вона ще й бурхливо розвивається просто у нас перед очима (щоб оцінити це, достатньо будь-коли переглянути, наприклад, розділ наукових новин сайту «Елементи»). Не дивно, що вона зараз багатьох цікавить.

Запитаймо в себе: яку вступну інформацію треба повідомити розумній і зацікавленій людині, яка, проте, є геть недосвідченою в біології, щоб вона почала відносно тямити в цій науці й могла розуміти значення найновіших біологічних відкриттів?

Пропоновану книжку можна вважати спробою відповісти на це запитання. Її ідеальний читач убачається автору як умовний «освічений небіолог», що чудово (хто може мати в цьому сумнів?) знає ті науки, котрі він серйозно вивчав, але не має ніякої біологічної або хімічної «бази». Якщо така людина з будь-якої причини зацікавиться біологією, ця книжка — для неї. Рівня «колись щось вивчав у школі, але все забув», для початку, цілком вистачить.

Звичайно, ідеться не про те, щоб розповісти в одній книжці одразу про всю сучасну біологію. Добір матеріалу — на совісті автора, і, безумовно, він є досить суб'єктивним. Там, де згадується певна суперечлива або нова інформація, стоять посилання на наукові статті, з яких її взято. Важливі

терміни, які знадобляться для розуміння подальшої розповіді, під час першого вживання виділяються курсивом.

Книжка складається з чотирьох частин: «Хімія життя», «Механізм життя», «Дерево життя» та «Історія життя». У першій частині («Хімія життя») повідомляється, з чого, власне кажучи, складається жива матерія. Друга частина («Механізм життя») розповідь про те, як живі істоти поводяться з інформацією та енергією. Третя частина («Дерево життя») — це огляд загального еволюційного дерева. У ній коротко обговорюється, які існують великі групи живих організмів, хто з них кому доводиться родичем, які між ними є важливі відмінності. І нарешті, у четвертій частині («Історія життя») усе життя на Землі розглядається як єдине ціле, і ми простежуємо головні події, що відбулися на нашій планеті за останні чотири з гаком мільярди років.

Тим, хто стикнувся з біологією практично вперше, краще читати цю книжку послідовно, за можливості, не пропускаючи розділів. Просунуті читачі, яких у наш час теж не бракує, вірогідно, визначаться самостійно. Автор сподівається, що деякі розділи можуть бути цікавими і професійним біологам (це переважно стосується другої половини книжки). І третю, і четверту частини свідомо написано так, щоб будь-яку з них можна було читати як самостійний нарис. Тому, якщо ви маєте біологічну «базу», — абсолютно спокійно можете читати книжку від середини, а в початок зазирнути потім, якщо забажаєте.

Коли начерки першої частини книжки викладалися в ЖЖ, автору регулярно ставили те саме запитання: чому там так багато хімії? Відповідь: тому що елементна база живих систем — хімічна. Від цього нікуди не подітися. І, до того ж, хіба не цікаво знати, чим, наприклад, фруктоза, відомий компонент дієтичних солодких продуктів, відрізняється від звичайного цукру, або чому гліцин слугує заспокійливим засобом, або яким є механізм дії кави на нервову систему, або чи насправді глутамат є шкідливим? За допомогою біологічної хімії зрозуміти такі речі легко, а без неї — геть неможливо. У будь-якому разі, про основи хімії тут розповідається від нуля і на такому спрощеному рівні, що автору буде навіть ніяково перед читачами-хіміками, якщо цей твір потрапить їм до рук.

Епіграфом до всієї книжки, напевно, можна було б поставити знамениті слова Феодосія Добржанського: «Ніщо в біології не має сенсу інакше як у світлі еволюції» (*Nothing in biology makes sense except in the light of evolution*)³. Добржанський, звісно, мав рацію. Будь-яка особливість будь-якого біологічного об'єкта, зрештою, є результатом певної еволюційної — а можна сказати й «історичної» — події. Треба лише з'ясувати, якої саме. Автору хотілося спробувати застосувати цей спосіб пояснення абсолютно до всіх предметів розмови, від атомів і молекул до еволюційного дерева (звідси й назва книжки). Наскільки вдало це вийшло, вирішувати читачам.

Кілька слів про те, чого в книжці немає. Насамперед, у ній немає жодної математичної формули: усе викладено на якісному рівні. На перший план виведено класичну подієву історію — історію живих організмів. Огляд хімічних основ життя, що його наведено на початку книжки, потрібен переважно для того, щоб краще зрозуміти цю історію (і її витоки).

Немає і деяких розділів, які традиційно містяться у книжках такого роду і відсутність яких, напевно, помітить критично налаштований читач. Щоб полегшити йому завдання, можна вже в передмові перелічити кілька явних недоглядів. По-перше, майже жодного слова не сказано про сучасну еволюційну теорію. По-друге, проігноровано проблему життєвих циклів та їхньої еволюції (навіть мітоз і мейоз не обговорюються). По-третє, розмова про еволюцію планів будови багатоклітинних тварин закінчується, не розпочавшись. Спочатку автор хотів присвятити кожній із цих тем окремий розділ, але під час роботи стало зрозуміло, що це неможливо зробити, не перетворивши книжку на багатотомне видання. Усі три названі теми — дуже цікаві, і згадувати їх мимохідь не хочеться. Про них треба розповідати окремо.

ПОДЯКИ

Великому письменнику Умберто Еко — за назву. Я вирішив, що «Від атомів до дерева» звучить не гірше, ніж «Від дерева до лабіринту».

Геніальному популяризаторові науки Айзеку Азімову — за заочні уроки, що він щедро розсипав по своїх книжках, і за неймовірну жагу до знань, якою він умів заразити читача.

Памелі Кемп і Карен Армс, авторам чудової книжки «Введення в біологію», яку я вперше прочитав у 13 років і яка є для мене взірцем того, як подібні книжки треба писати.

Численним читачам наукового блогу *caenogenesis.livejournal.com* — за зворотний зв'язок, який був особливо важливим на початку роботи і який я отримав повною мірою.

Колективу Літньої екологічної школи (ЛЕШ) і Весняної екологічної школи (ВЕШ), де я читав лекції, що послужили основою для декількох розділів цієї книжки.

Співробітникам журналу «Хімія і життя», де було попередньо опубліковано як серію статей четверту частину книжки («Історія життя»). Окрема подяка особисто Олені Клещенко, працювати з якою — величезне задоволення.

Асі Казанцевій і Денису Земледельцеву — за те, що вони взяли на себе клопіт прочитати чернетку і висловити корисні зауваження.

Марії Єгоровій — за те, що вона, лінгвіст за фахом, послужила моделлю ідеального читача, і за цікаві коментарі.

Олександрю Володимировичу Маркову — за ретельну наукову редактуру, унаслідок якої книжка стала кращою, і в цілому за підтримку.

Дякую колегам — висококваліфікованим біологам, які погодилися уважно прочитати і прокоментувати окремі розділи книжки: Михайлу Олександровичу Нікітіну, Михайлу Валерійовичу Погорелому, Олексію Вікторовичу Чернишову, Дмитру Андрійовичу Шабанову і особливо Дмитру Вікторовичу Леонтьєву, який дуже допоміг мені з найскладнішою в науковому відношенні третьою частиною.

І нарешті, безмежна вдячність — моїм університетським учителям: Борису Дмитровичу Васильєву, Феліксу Яновичу Держинському, Олександрю Сергійовичу Раутіану, Володимирю Васильовичу Малахову, Андрію Олександровичу Каменському, Юрію Таричановичу Дьякову і Леоніду Степановичу Гузею. З деякими з перелічених фахівців я спілкувався багато й тісно, інших знав тільки за лекціями, але вплинули на мене вони всі. Сподіваюся, що в книжці це відбилосся.

Частина I

ХІМІЯ ЖИТТЯ

КАРБОН

Миша любить мармелад, бо в ньому багато кислот.

Юрій Олеша. «Троє товстунів»

З чого складаються живі організми? Відповісти на це дуже легко: живі організми, як і неживі тіла, складаються з атомів.

Значення цього твердження, як то кажуть, важко переоцінити. Нобелівський лауреат Річард Фейнман говорив на початку своїх знаменитих «Фейнманівських лекцій із фізики»¹:

«Якби внаслідок якоїсь світової катастрофи всі накопичені наукові знання виявилися б знищеними і до прийдешніх поколінь живих істот перейшла б тільки одна фраза, то яке твердження, складене з найменшої кількості слів, принесло б найбільшу інформацію? Я вважаю, що це атомна гіпотеза (можете називати її не гіпотезою, а фактом, але це нічого не змінює): усі тіла складаються з атомів — маленьких тілець, які перебувають у безперервному русі, притягуються на невеликій відстані, але відштовхуються, якщо одне з них щільніше притиснути до іншого».

Те, що сказано Фейнманом,— звісно, правда. Однак будь-яке наукове твердження повинне мати ті чи інші межі застосовності. Пошукаймо їх і тут. Атомна гіпотеза — це велике досягнення людської думки, але чи цілком Усесвіт складається з атомів? І чи всі живі організми складаються лише з них?

Відповідь на перше з цих запитань, як не дивно, буде однозначно негативною. Почнімо з того, що наш Усесвіт виник унаслідок Великого вибуху приблизно 13,8 мільярдів років тому, і відтоді його склад дуже змінився. Наскільки можна судити, у перші 300 000 років у Всесвіті не було жодного атома (хоча були частинки декількох інших типів). Але й після того, як атоми виникли, вони не стали головною складовою космосу. За даними космічної обсерваторії «Планк», нинішній Усесвіт на 4,9 % складається зі звичайних елементарних частинок, що здатні скластися в атоми, на 26,8 % — з темної матерії (яка не виявляє жодних спостережуваних властивостей, крім маси) і на 68,3 % — з темної енергії (про яку взагалі незрозуміло, чи пов'язана

вона хоч із якимись матеріальними тілами)². Кажучи загалом, Усесвіт складається зі звичайних атомів не більше, ніж на 5 %.

Підкреслимо, що ці співвідношення відображають *сучасний* стан речей. Кілька мільярдів років тому вони, певно, були іншими, адже Усесвіт безперервно розвивається; це підтверджується розрахунками на основі загальної теорії відносності і прямими спостереженнями космічного реліктового випромінювання. Отже, дані досліджень показують, що зараз частини Всесвіту, що побудовані зі звичайної речовини, є, по суті, лише островами серед океанів темної матерії і темної енергії, у глибини яких людям ще тільки належить зазирнути. (Між іншим, саме про такі дослідження мріє доктор Хаус у першій серії восьмого сезону знаменитого серіалу.)

А ось на наше друге запитання — чи всі живі системи складаються з атомів? — відповіддю буде впевнене «так». У цьому плані біологічний світ є набагато менш різноманітним, ніж фізичний. Будь-яка жива істота побудована з атомів, і тільки з атомів, у повній відповідності до класичної атомної гіпотези. Приклади інших, неатомних форм життя поки що можна знайти лише в науковій фантастиці. Наприклад, у великому романі Станіслава Лема «Соляріс» згадані живі істоти, що створені не з атомів, а з дуже легких елементарних частинок — нейтрино. Але це не більше ніж уявний експеримент, поставлений письменником. У реальній біології нам доводиться мати справу тільки з атомами та їхніми стійкими поєднаннями, які називають молекулами. А з молекул, своєю чергою, складаються речовини. Як писав той самий Фейнман, будь-яка речовина — це свій тип розташування атомів.

Світ атомів є досить різноманітним. На момент написання цих рядків ученим відомо 118 видів атомів, які прийнято називати хімічними елементами. Щоправда, у живих тілах зустрічаються далеко не всі з них, а ті, що зустрічаються, розподілені там дуже нерівномірно.

Гарна новина полягає в тому, що атоми часто бувають дуже довговічними. У тих процесах, які безпосередньо вивчає біологія, вони майже ніколи не розпадаються, не виникають заново й не перетворюються з одного на інший. Це не означає, що вони не перетворюються з одного на інший узагалі ніколи: дуже скоро ми побачимо: якби не було взаємних перетворень атомів (точніше, їхніх ядер), у Всесвіті не змогло б виникнути життя. Однак для розуміння того, як улаштовані живі тіла, нам буде цілком достатньо враховувати взаємодію готових і незмінних атомів між собою.

Коротко про атоми

Отже, атоми.

Уже досить давно відомо, що вони складаються з трьох типів елементарних частинок: протонів, нейтронів і електронів (рис. 1.1, А). Протони і нейтрони — доволі масивні частинки, будь-який із них приблизно в 1800 ра-

зів важчий за електрон. Із протонів і нейтронів складається атомне ядро, а з електронів — зовнішня оболонка атома, яку зазвичай називають електронною оболонкою. Електрони, що утворюють оболонку, обертаються навколо ядра за надзвичайно складними траєкторіями, але зазвичай не дуже від нього віддаляючись.

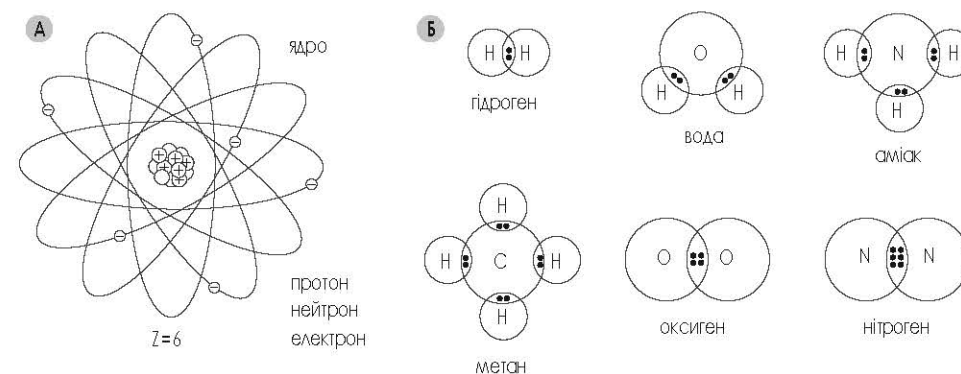


Рис. 1.1. Основи будови молекул. **А** — будова атома (на прикладі атома карбону); **Б** — приклади молекул із ковалентними зв'язками. У молекулах гідрогену, води, аміаку і метану зв'язки одинарні, у молекулі кисню — подвійний, у молекулі нітрогену — потрійний.

Найважливіша для нас властивість елементарних частинок — навіть не маса, а електричний заряд. Тут діють абсолютно чіткі й дуже прості закономірності.

- Протон електрично заряджений позитивно, електрон — негативно, а нейтрон не має ніякого заряду.
- Негативний заряд електрона за величиною суворо дорівнює позитивному заряду протона. Прийнято вважати, що протон має заряд +1, а електрон –1.
- Кількість електронів в атомі, за замовчуванням, дорівнює кількості протонів, отже, заряд цілого атома дорівнює нулю. Якщо ж кількість електронів відрізняється від кількості протонів, виходить, що перед нами не просто атом, а заряджена частинка — *іон*.

Фізики ще у XVIII столітті з'ясували, що електричні заряди бувають двох типів: позитивні й негативні. Також вони виявили, що різнойменні заряди притягуються, а однойменні відштовхуються. Цей закон називають основним законом електростатики, або *законом Кулона* (насправді, він записується формулою, що дає змогу точно визначити силу тяжіння або відштовхування, але ми тут обійдемося без математики). Закон Кулона діє

де завгодно, зокрема й усередині атома. Власне кажучи, електрони і протони тому й утворюють єдиний атом, що електростатично притягуються один до одного. Задля довідки, додамо, що протони і нейтрони «склеюються» в атомне ядро тяжінням геть іншого роду — так званою сильною ядерною взаємодією, яка на маленьких відстанях є набагато потужнішою за електростатичну. Саме тому протони в ядрі тримаються разом попри кулонівську силу, що відштовхує їх один від одного.

Найголовніший параметр будь-якого атома — це кількість протонів, або *атомний номер* (Z). Величина Z однозначно визначає положення даного атома в періодичній системі елементів, тобто в таблиці Менделєєва. Як ми вже знаємо, кількість електронів зазвичай дорівнює кількості протонів. А ось щодо кількості нейтронів, то вона може за тієї самої кількості протонів бути різною. Атоми, що мають однаковий атомний номер, але різну кількість нейтронів, називають ізотопами. Якщо слово «ізотопи» не згадано, виходить, що кількість нейтронів нам у цьому випадку неважлива. Усі атоми, що мають однакову кількість протонів, за визначенням, належать до одного *хімічного елемента*.

Найпростіший з усіх можливих атомів — водень ($Z = 1$). Він складається з одного протона і одного електрона. Нейтронів у ньому може не бути зовсім (хоча, можуть і бути, залежно від того, який це ізотоп). Якщо позбавити звичайний найпростіший атом водню його єдиного електрона, від нього залишиться позитивно заряджений іон, що в цьому випадку — не що інше, як «голий» протон.

Іще на початку XIX століття англійський хімік і лікар Вільям Праут висунув гіпотезу, яка випередила свій час. У ній йшлося про те, що атоми рештки хімічних елементів утворюються внаслідок об'єднання тієї чи іншої кількості атомів водню³. І він був не таким уже й далеким від істини. Усі атоми справді складаються з однотипних частинок, найпростіший можливий набір яких дає не що інше, як атом водню ($Z = 1$). Другий за складністю атом — гелій ($Z = 2$), третій — літій ($Z = 3$), ну, а далі в нашому розпорядженні вся таблиця Менделєєва. Найважчі атоми містять понад сотню протонів і близько двох сотень нейтронів. Але з такими чудовиськами ми в біології не зустрінемося.

Хімічні зв'язки

Найважливіший для нас спосіб взаємодії атомів називають *ковалентним зв'язком* (див. рис. 1.1Б). Це зв'язок утворено спільною парою електронів — по одному від кожного з двох атомів. Можна вважати, що електрони цієї пари належать обом атомам одразу. На графічних формулах, що відображають будову молекул, ковалентний зв'язок позначають простою рискою між символами хімічних елементів. Саме такими зв'язками і з'єднані атоми

в більшості звичайних молекул. Приклад — молекула водню. Вона складається з двох атомів водню (H), що утворюють між собою єдиний ковалентний зв'язок: H–H, або скорочено H₂.

Іноді ковалентні зв'язки бувають *подвійними* — такими, що утворені одразу двома парами електронів, або навіть *потрійними* — такими, що утворені одразу трьома парами. Що вищою є кратність зв'язку, то міцнішим він є, за інших рівних умов. Подвійні ковалентні зв'язки зустрічаються в біології дуже часто. Потрійні — набагато рідше, але знати про їхнє існування все ж таки не завадить. На графічних формулах подвійні та потрійні зв'язки позначають, відповідно, подвійними або потрійними рисками між символами атомів. Наприклад, між атомами кисню (O) цілком може утворитися подвійний зв'язок. Як наслідок вийде молекула O=O, або скорочено O₂. До речі, це і є той самий атмосферний кисень, яким ми дихаємо.

Набагато рідше за ковалентний (принаймні, у живій матерії) зустрічається *іонний зв'язок*, що є електростатичним тяжінням заряджених частинок. Ми вже знаємо, що за законом Кулона однойменні електричні заряди відштовхуються, а різнойменні — притягуються. Тому позитивно заряджена частинка (*катіон*) і негативно заряджена (*аніон*) обов'язково притягнуться одна до одної. Уже згадувалося, що іоном називають будь-яку частинку, яка існує самостійно й у якій кількість електронів відрізняється від кількості протонів. Сам цей термін, який було запропоновано Майклом Фарадеєм, походить від грецького слова, що означає «той, що йде»: у розчині, крізь який пропущено електричний струм, позитивно заряджені іони рухаються до негативного полюса, а негативні — до позитивного. Атом стає іоном, якщо він набув зайвий електрон або, навпаки, частину своїх електронів десь загубив.

Чудовий приклад іонного зв'язку демонструє всім відома кухонна сіль NaCl (натрій хлор), формулу якої можна переписати як [Na⁺] [Cl⁻]. Це означає, що кристал солі складається з позитивно заряджених іонів натрію і негативно заряджених іонів хлору в співвідношенні один до одного. У цьому випадку, кожен атом хлору нібито забирає один електрон у сусіднього атома натрію.

Елементи життя

Хімічний склад живої матерії є досить одноманітним. Для того щоб бодай приблизно розібратися в побудові живої клітини, достатньо знати лише п'ять хімічних елементів. Це водень (H), кисень (O), нітроген (N), карбон (C) і фосфор (P). На атомні номери цих елементів ми поки що не звертатимемо уваги: по-перше, їх дуже легко знайти в таблиці Менделєєва, а по-друге, для нас зараз набагато важливішим є інший показник. Найголовніше, що нам потрібно знати про будь-який хімічний елемент,— це

його валентність, тобто кількість ковалентних зв'язків, які може утворити його атом.

Отже, валентність водню дорівнює 1, кисню — 2, нітрогену — 3, карбону — 4 і фосфору — 5. Ці числа треба просто запам'ятати. Іноді в деяких із перелічених елементів бувають й інші валентності, але в біології це можна ігнорувати у всіх випадках, крім небагатьох, які обумовлено особливо. Одновалентний водень, двовалентний кисень, тривалентний нітроген, чотиривалентний карбон і п'ятивалентний фосфор — головні хімічні складові життя (рис. 1.2).

Іноді під час розмови нам зустрічатимуться й інші атоми — наприклад, сульфур (S), натрій (Na), хлор (Cl), калій (K) або ферум (Fe). Але постійно пам'ятати про них не треба. П'яти головних біогенних (тобто таких, що утворюють життя) хімічних елементів для початку цілком достатньо.

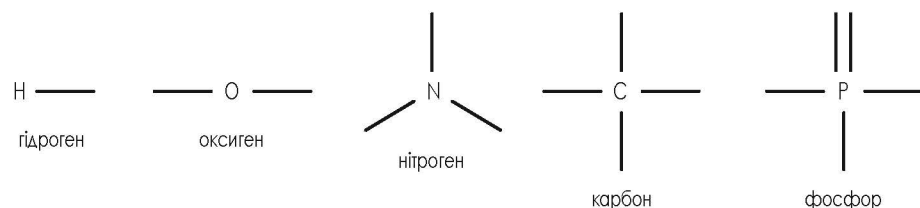


Рис. 1.2. Хімічні «складові» життя

Наднові та життя

Не підлягає сумніву, що більшість атомів у нашому Всесвіті — це атоми водню та гелію. Астрофізики стверджують, що 13 мільярдів років тому, тобто «лише» за кількості мільйонів років після Великого вибуху, співвідношення було таким: приблизно 75 % усіх атомів у Всесвіті становили атоми водню, приблизно 25 % — атоми гелію, а на атоми всіх разом узятих важчих елементів припадало 0,00007 %⁴. Звісно, відтоді Всесвіт змінився. Але й зараз усі елементи, крім водню та гелію, складають загалом не більше 2 % тих атомів, що існують. Очевидно, що з водню, валентність якого дорівнює одиниці, та гелію, який узагалі неохоче утворює хімічні зв'язки, ніяких складних молекул не побудуєш.

Порівнявши кількість різних видів атомів у сучасному Всесвіті, ми одразу побачимо, що найпоширеніші в ній (після водню та гелію) елементи — кисень ($Z = 8$), карбон ($Z = 6$) і нітроген ($Z = 7$). Це можна наочно показати на графіку, що зображує відносно велику кількість хімічних елементів у нашій Галактиці Чумацький Шлях (рис. 1.3). За горизонтальною віссю там можна відкласти атомний номер (Z), а за вертикальною — відносно наявність елемента, причому бажано в логарифмічному масштабі (прос-

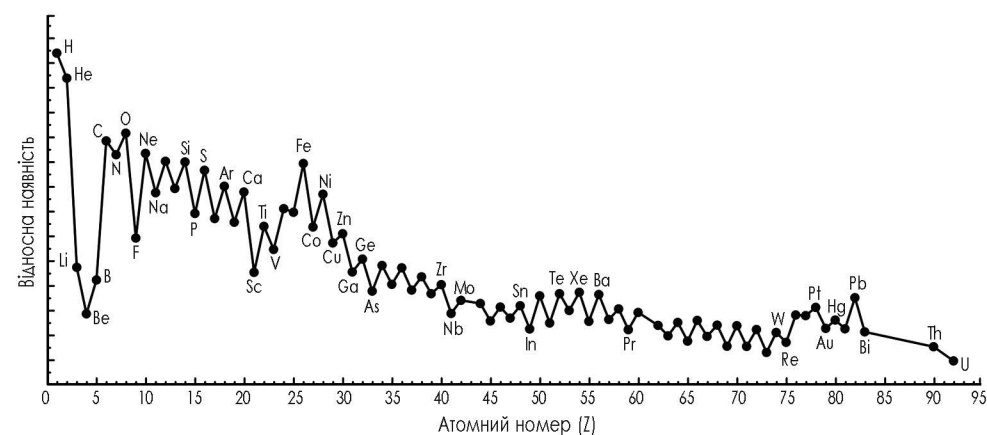


Рис. 1.3. Графік поширеності хімічних елементів у нашій Галактиці

тіше кажучи, це означає, що кожна «сходінка» на вертикальній осі відповідає різниці не на одиницю, а в 10 разів). На такому графіку насамперед упадає в очі вже відомий нам факт: водню та гелію в галактиці в багато разів більше, ніж решти хімічних елементів разом узятих. Ці два елементи — поза конкуренцією. На ділянці літію ($Z = 3$), берилію ($Z = 4$) та бору ($Z = 5$) спостерігається явний спад, тому що ядра цих атомів є відносно нестійкими: у системі ядерних реакцій, що відбуваються в зорях, вони легко синтезуються, але так само легко й розпадаються. Ядро феруму ($Z = 26$), навпаки, є надзвичайно стійким. Багато ядерних реакцій, що відбуваються в надрах зір, на ньому закінчуються, тому ферум дає на графіку високий пік. Але найпоширенішими після водню та гелію елементами в Чумацькому Шляху, безсумнівно, є кисень, карбон і нітроген — саме ті, що стали хімічними «цеглинками» життя. Навряд чи це випадковість.

Крім того, не можна не помітити, що графік наявності хімічних елементів у галактиці — чітко «зубчастий». Елементи з парними атомними номерами в середньому трапляються у Всесвіті набагато частіше, ніж елементи «приблизно того самого стибу» з непарними. Іще сто років тому на це, незалежно один від одного, звернули увагу двоє хіміків — італієць Джузеппе Оддо й американець Вільям Гаркінс. Їхні статті вийшли друком у 1914 і 1917 роках відповідно⁵. А правило, згідно з яким елементи з парними номерами, за інших рівних умов, переважають над елементами з непарними номерами, досі називають на їхню честь правилом Оддо—Гаркінса. Це правило обов'язково доводиться брати до уваги, наприклад, під час аналізу хімічного складу земної кори⁶.

Розгадка правила Оддо—Гаркінса була запропонована вже його першовідкривачами. Річ у тім, що атомні ядра важких елементів утворюються

переважно за рахунок злиття більш легких ядер. Отже, під час злиття двох однакових атомних ядер у будь-якому разі вийде ядро елемента з парним числом протонів, тобто з парним атомним номером.

А потім ядра, що утворилися, зливаються одне з одним, даючи, першою чергою, знову ж таки елементи з парними номерами. Наприклад, «горіння» гелію ($Z = 2$), під час якого його ядра об'єднуються одне з одним із великим виходом енергії, дає спочатку нестійкі короткоживучі ядра берилію ($Z = 4$), потім — ядра карбону ($Z = 6$), а потім — і кисню ($Z = 8$).

До початку зореутворення у Всесвіті були тільки водень, гелій і слідові кількості літію. Наскільки ми зараз знаємо, усі елементи, що є важчими за літій, синтезуються лише в зорях і поширюються внаслідок вибухів наднових⁷. Це означає, що живим організмам просто не було з чого утворитися, поки не закінчився життєвий цикл хоча б першого покоління зір і вони не вибухнули.

Авторами найзнаменитішої статті, що описала механізм синтезу хімічних елементів у зорях, були четверо вчених: Маргарет Бербідж, Джеффі Бербідж, Вільям Фаулер і Фред Хойл. Цю статтю часто називають за ініціалами авторів «B²FN» («бе-квадрат-еф-аш»). Ініціатором дослідження був астрофізик Хойл: саме він першим здогадався, що в зорях може синтезуватися не лише гелій, але й карбон. Завдяки йому до роботи підключилися спершу фаховий фізик-ядерник Фаулер (що спочатку був налаштований скептично, але Хойл його переконав), а потім — астрономи Бербіджи. У мережі легко знайти чудову світлину: усі четверо відзначають 60-й день народження найстаршого з них — Фаулера, який радіє робочій моделі паровика, що йому подарували колеги.

Стаття «B²FN» спростувала попередню гіпотезу Георгія Гамова, який уважав, що ядра всіх елементів синтезувалися просто під час Великого вибуху і відтоді їхні концентрації залишаються приблизно незмінними. Насправді набагато ймовірніше, що в перші мільярди років після Великого вибуху Всесвіт був суто воденно-гелієвим. І тільки потім він почав збагачуватися важкими елементами за допомогою наднових зір («важкими елементами» ми називаємо всі, що є важчими за гелій або, принаймні, літій).

Космічна еволюція

Отже, важкі елементи синтезуються всередині зір і розпорошуються в просторі, коли ці зорі вибухають як наднові. Отже, вплив наднових зір на елементний склад Усесвіту дійсно величезний. Важкі елементи, що розсіяні їхніми вибухами, містяться у космічному пилу, а він конденсується в зорі наступного покоління — уже з повноцінними системами, що містять землеподібні планети. Цієї теми ми ще торкнемося пізніше, у розділі 13.

Перетворення водню та гелію на більш важкі елементи було одним із проміжних етапів космічної еволюції, яка привела до виникнення Сонячної системи, життя і людини. Теорія B²FN (якщо вона є правильною) сама собою показує, що цієї еволюції не могло не бути. У прадавньому воденно-гелієвому Всесвіті ніколи б не виникли ані Земля, ані життя. Сама можливість їх появи стала результатом довгого ланцюжка подій космічного масштабу, під час яких увесь світ неодноразово якісно змінювався (наприклад, виникали хімічні елементи, яких раніше не існувало, а разом із ними — нові типи зір). Ось таку якісну зміну ми й називаємо еволюцією. Це — єдиний процес, що охоплює фізичні, хімічні та біологічні явища.

Тут варто пригадувати, щоб уточнити значення слова «еволюція». Традиційно існує два розуміння цього терміна — «вузьке» та «широке». Еволюцію у «вузькому» сенсі різні автори визначають дещо по-різному, але в будь-якому разі вона обмежується суто біологічними процесами і факторами (як-от зміна частот генів у популяціях або перебудова життєвих циклів). Еволюція в «широкому» сенсі містить у собі не лише історичні процеси, що вивчає біологія, але й історичні процеси, що вивчають інші науки — фізика, хімія, астрономія, геологія, соціальна історія. «Широке» розуміння еволюції можна зустріти у Феодосія Григоровича Добржанського, знаменитого генетика, одного з найвидатніших біологів ХХ століття.

«Загальноприйнятого визначення еволюції не існує, — писав Добржанський. — Еволюція — це зміна, але не будь-яка зміна є еволюцією. Найвужче визначення визнає тільки біологічну еволюцію, елементарні події якої — зміни частот генів у популяціях живих організмів. Накопичення й об'єднання таких генетичних подій протягом тривалих періодів часу приводить до великих біологічних змін: амеба або примітивний вірус можуть перетворитися на людину або могутній дуб. Коли приблизно три мільярди років тому на планеті Земля виникло життя, це було результатом складної серії процесів, що відбувалися в неорганічній природі. А приблизно два мільйони років тому біологічна еволюція породила людину — істоту, що здатна до абстрактного мислення, комунікації мовою символів, яка має самосвідомість і усвідомлення своєї смертності. Зрозуміло, що між Великим вибухом, який започаткував утворення хімічних елементів, і появою умов, що придатні для виникнення життя, у Всесвіті відбулося безліч подій. Ці події складаються в космічну (неорганічну) еволюцію. З іншого боку, людина — головний герой історичного процесу, під час якого біологічні зміни її організму перекриваються культурною спадковістю, що діє за допомогою навчання. Історія людства пов'язана, насамперед, з еволюцією культури. Три еволюції — космічна, біологічна і культурна — складають єдиний грандіозний процес універсальної еволюції»⁸.

За визначенням палеонтолога Валентина Абрамовича Красилова, *еволюція — це серія послідовних змін з історично значущим результатом*⁹. Це

визначення не суперечить «широкому» розумінню еволюції за Добржанським, і саме воно буде, за замовчуванням, прийняте в цій книжці. Синтез важких елементів у зорях — це частина процесу *космічної* еволюції, про який ми час від часу говоритимемо й надалі (у розділах 3, 4, 7, 13, 16). Потім ми перейдемо до *біологічної* еволюції, розмові про яку буде присвячено майже всю другу половину книжки (розділи 12–17). І лише *культурну* еволюцію в цій книжці майже не розглянуто, за винятком короткої згадки наприкінці розділу 17.

Найголовніший атом

Хімія відомих нам живих систем заснована на одному головному елементі — карбоні.

Прояснимо деякі терміни. Будь-яку сукупність атомів і молекул у хімії (і в біології) називають *речовиною*. Речовини можуть бути простими (що складаються з одного елемента) або складними (що складаються з різних елементів). Складну речовину, у якій атоми різних елементів з'єднані між собою хімічними зв'язками, називають *сполукою*. Будь-яка сполука зазвичай має сталий склад, який можна описати простою формулою, що вказує кількість атомів кожного елемента в його молекулі. Наприклад, молекула води складається з двох атомів гідрогену (H) і одного атома кисню (O). Відповідно, формула води — H_2O .

Однак зараз нас цікавлять сполуки карбону (C). Вони є настільки різноманітними, що їх вивчає ціла галузь хімії — *органічна хімія*. Спочатку, у XIX столітті, органічною хімією назвали хімію речовин, що утворюються в рослинних і тваринних організмах, з яких їх і одержують. Поступово стало зрозуміло, що до складу майже всіх цих речовин входить карбон. Зрештою органічною хімією почали називати хімію будь-яких відносно складних сполук карбону, безвідносно до того, чи є вони в живих тілах, чи ні. Скорочено такі сполуки прийнято називати просто «органічними речовинами». Багато які з них дійсно мають певний стосунок до живих (або мертвих) організмів, але далеко не всі. Хімічний склад організмів — предмет окремої науки, яку називають *біохімією*.

Карбон — шостий за ліком елемент таблиці Менделєєва. Це означає, що його атом містить шість протонів ($Z = 6$). Чистий карбон відомий нам як алмаз, графіт або вугілля. А валентність карбону в органічних сполуках завжди дорівнює 4. Це — найважливіший факт, без знання якого зрозуміти будову живих організмів просто неможливо.

Крім того, карбон має три хімічні особливості, які почасти пояснюють, чому органічних сполук так багато. По-перше, атом карбону здатен утворювати стійкий ковалентний зв'язок майже з будь-яким іншим елементом менделєєвської таблиці; далеко не про кожен атом можна таке сказати.

По-друге, атоми карбону чудово утворюють ковалентні зв'язки один з одним, створюючи внаслідок цього довгі ланцюжки (зокрема розгалужені), кільця й інші складні структури. І по-третє, ковалентний зв'язок «карбон — карбон» легко може стати кратним, тобто подвійним або потрійним. Зв'язків карбону з деякими іншими елементами це теж стосується. Схильність карбону до утворення кратних зв'язків є дуже важливою і в органічній хімії, і в біохімії.

Вуглеводні

Найпростішу у світі органічну сполуку називають метаном. Молекула метану складається з одного атома карбону й чотирьох атомів гідрогену, що з'єднані з карбоном ковалентними зв'язками. Мовою хімічних символів це має такий вигляд: один карбон (C) і чотири гідрогени (H) утворюють молекулу CH_4 (формула метану). У більш докладній формулі — графічній — кожен ковалентний зв'язок позначають рискою, у цьому разі — між символами C і H.

Хімічні сполуки, що складаються тільки з карбону та гідрогену, цілком логічно називаються *вуглеводнями* (див. рис. 1.4). Метан — це найпростіший можливий вуглеводень. Приклади вуглеводнів, що йдуть слідом за ним за складністю: етан (C_2H_6), пропан (C_3H_8), бутан (C_4H_{10}), пентан (C_5H_{12}), гексан (C_6H_{14}). Основу будь-якої з цих молекул утворює ланцюжок атомів карбону, що з'єднані між собою ковалентними зв'язками. А всі валентності, що вільні від карбон-карбових зв'язків, там займають атоми гідрогену. Знаючи ці принципи, накреслити структуру вуглеводню з будь-якою заданою кількістю карбових атомів можна дуже легко. На графічних формулах видно, що декілька знайомих нам тепер вуглеводнів — етан, пропан, бутан, пентан і гексан — відрізняються один від одного тільки кількістю абсолютно однакових груп $-CH_2-$.

Ланцюжки атомів карбону, що з'єднані ковалентними зв'язками, утворюють основу не тільки вуглеводнів, а й багатьох інших органічних речовин. Довжина цих ланцюжків нічим не обмежена, до них цілком можуть входити десятки, сотні, а іноді й тисячі атомів. Крім того, вуглецеві ланцюжки не обов'язково є лінійними. Вони можуть розгалужуватися, а можуть і замикатися в кільця.

Але й це ще не все. Бувають такі вуглеводні, у яких деякі карбон-карбові зв'язки в ланцюжку є подвійними або потрійними, тобто утвореними двома або трьома парами електронів. Нагадаємо, що валентність карбону в органічних молекулах завжди дорівнює чотирьом. Тому атом карбону, що бере участь в утворенні подвійного зв'язку, може приєднати на один атом гідрогену менше, а в потрійному зв'язку — на два атоми гідрогену менше порівняно з атомом карбону, усі зв'язки якого є одинарними. Зрозуміло, це