

§ 27. РУХ І ВЗАЄМОДІЯ МОЛЕКУЛ*



«...Швидко пролітають у полі зору мікроскопа дрібні частинки, майже миттєво змінюючи напрямок руху, повільніше рухаються більші, але й вони безперервно змінюють напрямок. Великі частинки практично топчуться на місці <...>. Ніде немає й сліду системи або порядку...» Таким, за словами німецького фізика *Роберта Пола* (1884–1976), постає перед спостерігачем *броунівський рух* — явище, яке пояснюється рухом молекул. Згадаємо, як рухаються молекули і які факти підтверджують їх взаємодію.

1 Що таке броунівський рух*

Броунівський рух — хаотичний рух видимих у мікроскоп малих макрочастинок, завислих у рідині або газі, який відбувається під дією ударів молекул рідини або газу.

Це явище назване на честь шотландського ботаніка *Роберта Броуна* (1773–1858), який першим спостерігав його в 1827 р. Розглядаючи в мікроскоп завислі у воді пилкові зерна, Броун помітив, що вони безперервно рухаються, постійно змінюючи швидкість.

Причина броунівського руху — *хаотичний рух молекул* середовища. Рухаючись, мікрочастинки середовища безперервно бомбардують завислу в ньому макрочастинку (рис. 27.1). При цьому сумарна сила ударів з одного боку може випадково виявитися більшою, ніж з іншого боку. Якщо макрочастинка досить мала (≈ 1 мкм), то внаслідок ударів вона починає рух; потім інші поштовхи спричиняють зміну її швидкості.

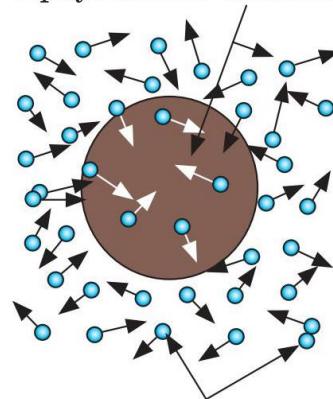
? Чому більші частинки «топчуться» на місці? Чому зі збільшенням температури рідини швидкість руху броунівської частинки збільшується?

Теорія броунівського руху, створена *А. Ейнштейном* і польським фізиком *М. Смолуховським* у 1905–1906 рр. та експериментально підтверджена французьким фізиком *Ж. Перреном* (рис. 27.2), остаточно закріпила перемогу атомістики.

2 Що таке дифузія і де її застосовують

Безперервний хаотичний рух молекул відбувається всередині будь-якого макроскопічного

Броунівська частинка



Молекули середовища

Рис. 27.1. Механізм виникнення броунівського руху

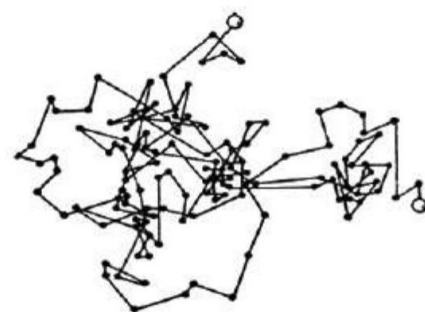


Рис. 27.2. Одна з тисячі схем, отриманих Жаном Перреном, який позначав положення броунівської частинки через рівні (1 с) інтервали часу. Зрозуміло, що справжня траєкторія руху частинки містить ще більше ланок

* Тут і далі терміном «молекула» будемо позначати будь-яку структурну одиницю речовини: молекулу, атом чи йон.

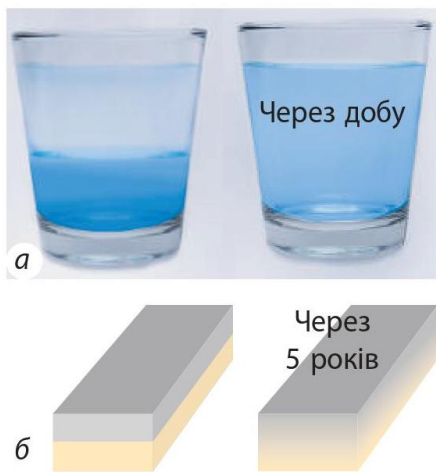


Рис. 27.3. Дифузія в рідинах і твердих тілах. Унаслідок теплового хаотичного руху молекул сироп змішався з водою протягом доби (а), дві відшліфовані та притиснуті одна до одної пластинки свинцю та золота «зрослися» на 1 мм протягом 5 років (б)



Рис. 27.4. Процес насичення поверхневого шару сталі вуглецем називають *цементацією*. Якщо виготовити деталь із низьковуглецевої сталі, а потім помістити її у високотемпературну суміш, яка містить вуглець, то завдяки дифузії поверхневий шар сталі збагатиться вуглецем. Отримана деталь одночасно буде твердою (ззовні — міцний чавун) і не буде руйнуватися внаслідок ударних навантажень (усередині — пружна сталь)

тіла. У курсі фізики 7 класу ви вивчали *дифузію* — ще одне явище, зумовлене таким рухом (від латин. *diffusio* — поширення, розтікання).

Дифузія — процес взаємного проникнення молекул однієї речовини між молекулами іншої, який відбувається внаслідок теплового руху цих молекул.

Якщо в склянку з водою налити підфарбований цукровий сироп, через деякий час уся вода в склянці набуде кольору та стане солодкою (рис. 27.3, а). Дифузія в рідині відбувається досить повільно, проте у твердих тілах дифузія повільніша в сотні й тисячі разів (рис. 27.3). У газах дифузія йде набагато швидше, ніж у рідинах, але все одно: якби не було конвекції, запах парфумів поширювався б у кімнаті протягом годин.

У будь-яких середовищах швидкість дифузії збільшується з підвищенням температури і тиску.

Дифузійні процеси надзвичайно важливі для одержання та оброблення деяких матеріалів. Дифузія у твердих тілах забезпечує з'єднання металів під час зварювання, паяння, нікелювання. За допомогою дифузії поверхневий шар металевих виробів насичують вуглецем, забезпечуючи їх міцність (рис. 27.4).

Різновидом дифузії є **осмос** (від грец. *ōstmos* — поштовх, тиск) — *процес односторонньої дифузії крізь напівпроникну перегородку (мембрану) молекул розчинника в бік більшої концентрації розчиненої речовини*. Наприклад, якщо гострим ножем відрізати скибку лимона, то сік практично не виділиться; якщо ж посипати скибку цукром, то з'явиться сік. Виділяючись із лимона, сік ніби прагне розбавити концентрований розчин цукру, що утворився на зрізі.

У природі завдяки осмосу поживні речовини та вода проникають із ґрунту в корені рослин, із травного тракту — в організми істот і безпосередньо в клітини; кисень із легеневих альвеол надходить у кров тощо. У промисловості осмос використовують для очищення води, виробництва напоїв, отримання деяких полімерів.

3 Як швидко рухаються молекули

Молекули в газах рухаються дуже швидко — зі швидкістю кулі (див. таблицю), але далеко «полетіти» не можуть, бо щосекунди зазнають понад мільярд зіткнень з іншими молекулами. Тому траєкторії руху молекул являють собою складні ламані лінії, подібні до траєкторії руху броунівської частинки.

? Поясніть, чому, незважаючи на величезну швидкість руху молекул, запах у повітрі поширюється досить повільно.

Зверніть увагу! У речовині завжди є молекули, які рухаються повільно, і молекули, швидкість руху яких величезна. Унаслідок зіткнень швидкості руху молекул безперервно змінюються. Описати рух навіть однієї молекули неможливо, та й не потрібно. Нам важливо знати, до якого результату приводить рух усієї сукупності молекул певного об'єкта.

Температура газу, °C	Середня квадратична швидкість руху молекул газу, м/с		
	H ₂	O ₂	CO ₂
0	1693	425	362
20	1755	440	376
100	1980	496	422
200	2232	556	475

Як було виміряно швидкість руху молекул

Уперше швидкість руху молекул виміряв німецький фізик **Отто Штерн** (1888–1969) у 1920 р.

Для досліду Штерн виготовив пристрій (див. рис. 1), що складався з двох жорстко пов'язаних порожніх циліндрів, надітих на спільну вісь; стінка внутрішнього циліндра мала щілину. Уздовж осі була натягнута металева нитка, вкрита шаром срібла. Повітря з циліндрів було відкачано. Коли по нитці пропускали струм, срібло випаровувалось і внутрішній циліндр заповнювався атомами Аргентуму, частина яких проходила через щілину й осідала на внутрішній стінці зовнішнього циліндра. У результаті навпроти щілини утворювалася тонка смужка срібла (А на рис. 2).

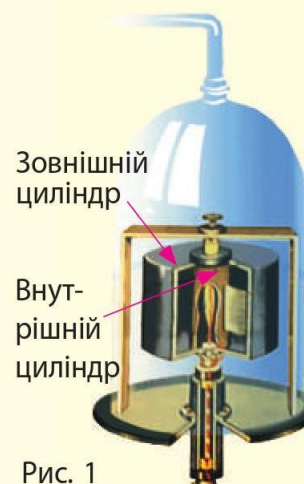


Рис. 1

Коли циліндрам надавали обертання, смужка срібла ставала розмитою й утворювалася не навпроти щілини, а на певній відстані s від смужки А (смужка А'). Адже поки атоми проходили відстань l (див. рис. 2), циліндри поверталися на певний кут. Чим швидше рухалися атоми, тим ближче до смужки А вони осідали.

Знаючи радіуси циліндрів, кутову швидкість ω їхнього обертання та вимірявши відстань s , Штерн визначив швидкості v руху атомів Аргентуму.

Справді, час руху атомів від щілини до зовнішнього циліндра дорівнює $t = \frac{l}{v} = \frac{R_2 - R_1}{v}$. За цей час точка на поверхні зовнішнього циліндра проходить відстань s , тому $t = \frac{s}{v_{\text{ц}}} = \frac{s}{\omega R_2}$. Таким чином,

$$\frac{R_2 - R_1}{v} = \frac{s}{\omega R_2} \Rightarrow v = \frac{\omega R_2 (R_2 - R_1)}{s}$$

Швидкість руху атомів, виміряна Штерном, збіглася зі швидкістю, розрахованою теоретично.

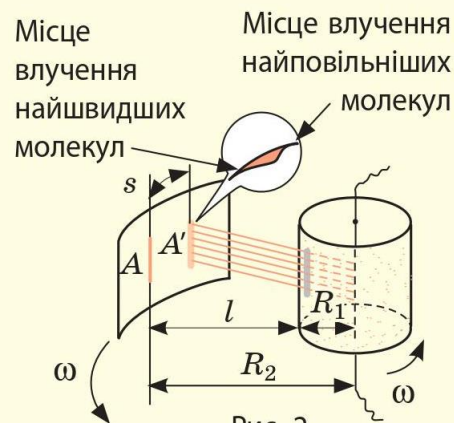


Рис. 2

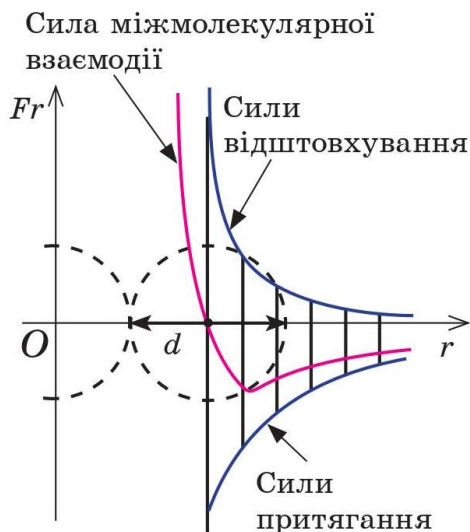


Рис. 27.5. Графіки залежності сил притягання, сил відштовхування та сил міжмолекулярної взаємодії (F_r) від відстані r між молекулами. Сила міжмолекулярної взаємодії обчислюється як алгебраїчна сума сил відштовхування та сил притягання

4 Як і чому взаємодіють молекули

Переконатися в тому, що молекули притягуються одна до одної, досить просто. Спробуйте, наприклад, розірвати сталевий дріт або розламати цеглину — це буде складно, хоча вони й складаються з окремих частинок. Той факт, що тверді тіла й рідини не розпадаються на окремі молекули, перетворюючись на газ, теж говорить про те, що між молекулами існують сили притягання. Разом із тим молекули відштовхуються одна від одної. У цьому легко переконатися, спробувавши стиснути той самий дріт або ту саму цеглину, — навряд чи вам це вдасться.

МКТ стверджує, що між молекулами одночасно існують як сили притягання, так і сили відштовхування. Основна причина виникнення цих сил — електричне притягання та відштовхування заряджених частинок, які утворюють атом: позитивно заряджене ядро одного атома притягується до негативно зарядженої електронної хмари іншого атома; разом із тим ядра цих атомів відштовхуються одне від одного, відштовхуються і їх електронні хмари.

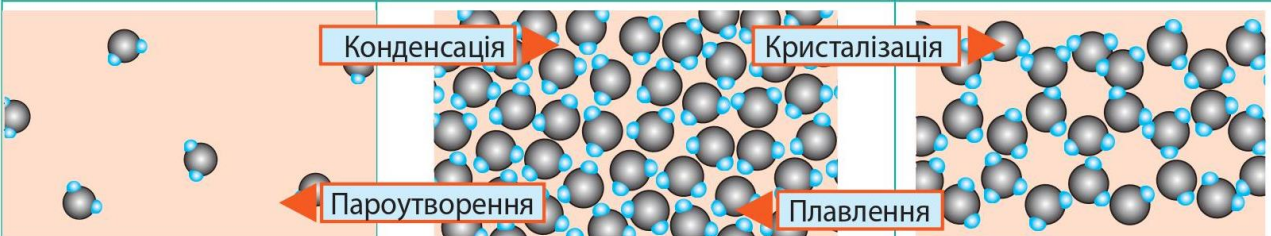
Якщо відстань r між молекулами менша від розмірів d самих молекул ($r < d$), то переважають сили відштовхування, тому молекули відштовхуються одна від одної (рис. 27.5). У міру збільшення відстані r і сили притягання, і сили відштовхування зменшуються, але сили відштовхування зменшуються швидше. За відстані $r = d$ сили притягання і сили відштовхування врівноважуються. У разі подальшого збільшення відстані між молекулами ($r > d$) починають переважати сили притягання й молекули притягуються одна до одної.

Таким чином, на відстані d молекули перебувають у стані стійкої рівноваги: в разі будь-яких відхилень молекули від цього положення міжмолекулярні сили прагнуть повернути її в стан рівноваги.

? Чи помітною буде сила взаємодії між двома молекулами, якщо відстань між ними буде вдесятеро більша за розмір молекул? вдесятеро менша (див. рис. 27.5)?

5 Фазові стани речовини

В МКТ розрізняють три фазові (агрегатні) стани речовини: рідкий, кристалічний, газоподібний (існує і четвертий стан — плазма, він найпоширеніший у Всесвіті, адже саме у стані плазми перебуває речовина в зорях). Змінення фазового стану називають фазовим переходом. Розглянемо різні стани речовини і з'ясуємо особливості руху та взаємодії молекул речовини в різних фазових станах.

Фазові (агрегатні) стани речовини		
Газоподібний	Рідкий	Твердий кристалічний
		
<p>Слово «газ» походить від грецького слова <i>chaos</i> («хаос»). Молекули газів розташовані безладно й на відстанях, які в десятки разів більші за розміри самих молекул. На таких відстанях молекули практично не взаємодіють одна з одною. Тому, безперервно зіштовхуючись, молекули газів розлітаються в усі боки доти, доки не зустрінуть якусь перешкоду, наприклад стінки посудини. Саме тому <i>гази не мають форми та займають увесь наданий об'єм</i>. Великими відстанями між молекулами пояснюється й той факт, що <i>гази легко стискаються</i>.</p>	<p>Молекули рідини в цілому розташовані хаотично, однак у розташуванні найближчих молекул зберігається певний (ближній) порядок. Середня відстань між молекулами приблизно дорівнює розмірам самих молекул, тому міжмолекулярні сили втримують їх біля положення рівноваги. Кожна молекула рідини певний час (порядку 10^{-11} с) здійснює рух, подібний до коливального, потім перескакує в інше місце і знову коливається біля нового положення рівноваги. Час «осідлого життя» молекули в сотні разів більший за час «переходу». Перескакування (переходи) молекул з одного рівноважного стану в інший відбуваються переважно в напрямку зовнішньої сили, тому <i>рідина плинна: під дією зовнішніх сил вона набуває форми тієї посудини, в якій міститься, при цьому об'єм рідини залишається незмінним</i>.</p>	<p>У речовині, що перебуває в твердому кристалічному стані, молекули розташовані в певному порядку (утворюють кристалічну ґратку) на відстанях, що приблизно дорівнюють розмірам самих молекул, тому сили міжмолекулярної взаємодії втримують їх біля положення рівноваги. На відміну від рідин, перескакування молекул у твердих тілах відбуваються дуже рідко — кожна молекула зберігає положення рівноваги досить довго, а її рух зводиться до коливання біля положення рівноваги. Тому <i>тверді тіла зберігають і об'єм, і форму; як і рідину, їх дуже важко стиснути</i>.</p>

Зазначимо, що молекули деяких твердих тіл у цілому розташовані безладно. Такий стан речовини називають **аморфним**. Речовини в аморфному стані нагадують дуже в'язкі рідини. Якщо покласти в посудину кристалики солі, вони ніколи не зберуться в один великий кристал. А от якщо покласти в посудину шматочки смоли, яка є аморфною речовиною, то через кілька днів смола зіллється і набуде форми посудини.

На відміну від кристалічних, *аморфні речовини не мають певної температури плавлення*, а переходять у рідкий стан поступово розм'якшуючись.

Аморфний стан речовин є порівняно хитким — поступово відбувається кристалізація. Так, скло має аморфну структуру, але згодом у ньому утворюються помутніння — дрібні кристалики кварцу. Цукор — це молекулярний кристал. Якщо його розплавити та остудити, утвориться льодяник — аморфний стан цукру. А через якийсь час у льодянику почнуть рости кристалики цукру. Саме з цієї причини зацукровується варення, яке довго простояло.



Підбиваємо підсумки

- Молекули, атоми, йони перебувають у безперервному хаотичному русі. Саме рухом частинок речовини можна пояснити такі явища, як броунівський рух (видиме в мікроскоп хаотичне переміщення малих макрочастинок, завислих у рідині або газі) та дифузія (взаємне проникнення дотичних речовин одна в одну).
- Частинки речовини взаємодіють одна з одною. Основна причина міжмолекулярної взаємодії — електричне притягання та відштовхування заряджених частинок, що утворюють атом. На відстанях, які більші за розміри молекул, молекули притягуються одна до одної; на відстанях, які незначно менші за розміри молекул, — відштовхуються.
- Речовина може перебувати у твердому, рідкому та газоподібному фазових (агрегатних) станах залежно від того, як розташовані, як рухаються та як взаємодіють її частинки.



Контрольні запитання

1. У чому причина броунівського руху?
2. Що таке дифузія? Наведіть приклади проявів і застосування дифузії в науці, техніці, природі, житті людини.
3. Чи є правильним твердження, що швидкості руху молекул певного газу за однакової температури є однаковими?
4. У чому причина міжмолекулярної взаємодії?
5. За яких умов між молекулами виявляються сили міжмолекулярного притягання? відштовхування?
6. Поясніть фізичні властивості речовин у різних фазових станах із точки зору МКТ.
7. У чому відмінності аморфного і кристалічного станів речовини?



Вправа № 27

1. Чому вуглекислий газ, який ми видихаємо, не залишається біля нас, а розсіюється в просторі?
2. Яким фізичним явищем пояснюється процес засолювання огірків? Як відбувається цей процес? У якому приміщенні — теплому чи холодному — огірки засолюються швидше?
3. З'ясовано, що через стінки капілярів в організмі людини переміщується 60 л рідини за хвилину. Завдяки якому фізичному явищу це відбувається?
4. Є два способи підживлення рослин: поливання спеціальними розчинами (прикореневе підживлення); обприскування (позакореневе підживлення). Поясніть обидва способи.
5. Якщо покласти одне на одне два віконних скла, їхні поверхні злипнуться (саме тому під час зберігання між ними кладуть папір). Якщо притиснути одну до одної дві дерев'яні лінійки, вони не злипнуться. Чому?
6. Чи буде горіти свічка в космічному кораблі? Якщо буде, то як довго? Обґрунтуйте свою відповідь.
7. Скористайтеся додатковими джерелами інформації та дізнайтеся, яке значення мають процеси дифузії (зокрема, осмосу) в кулінарії. Чому технологія приготування їжі потребує розуміння сутності цих процесів?



Експериментальне завдання

Продумайте та проведіть досліди зі спостереження дифузії та осмосу в домашніх умовах. З'ясуйте, від яких чинників залежить швидкість дифузії.