



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА  
СПОРТУ УКРАЇНИ**

**ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ХАРЧУВАННЯ ТА ТОРГІВЛІ**

***Ж.В. Воронцова, О.Г. Дьяков***

**КОНЦЕПЦІЇ СУЧАСНОГО ПРИРОДОЗНАВСТВА**

**навчальний посібник**

Харків  
2012

УДК 168.521 (075.8)  
ББК 97

*Рекомендовано до друку вченою радою  
Харківського державного університету харчування та торгівлі  
(протокол № від 27.06.2012 р.)*

*Рецензенти:*

Л.М. Хавкіна – доктор наук із соціальних комунікацій, професор, завідувач  
кафедри журналістики Харківського національного університету імені  
В.Н. Каразіна

**Воронцова Ж.В., Дьяков О.Г.**

Концепції сучасного природознавства : навчальний посібник. – Х. : ХДУХТ,  
2012. – 170 с.

Навчальна дисципліна «Концепції сучасного природознавства» входить до циклу природничо-наукової та загальноєкономічної підготовки студентів за напрямом: 0501 «Менеджмент». Особливостями курсу є широкий діапазон знань із багатьох наукових напрямів, а також системний характер побудови навчального матеріалу. Мета курсу – ознайомити студентів на рівні загальних уявлень з найбільш важливими концепціями походження природи і людини, допомогти їм оволодіти сучасною науково-природничою картиною світу.

Посібник призначений для допомоги студентам денної форми навчання та викладачам під час роботи над курсом «Концепції сучасного природознавства».

© Воронцова Ж.В., Дьяков О.Г., 2012  
© ХДУХТ, 2012

# ЗМІСТ

## Передмова

### Розділ 1. Природознавство від емпіричних знань до розвитку науки

1.1. Зародження рахунку. Перші математичні знання. Вавілонська математика та її застосування у фізиці

1.2. Накопичення астрономічних знань. Астрономія та календар. Астрономічні знання стародавнього Єгипту й Межиріччя

1.3. Металургія

1.4. Розвиток гірничої справи та видобування корисних копалин. Географія та картографія

1.5. Розвиток домашніх просислів і становлення ремесла

1.6. Біологія та медицина

1.7. Зародження і становлення писменності

### Розділ 2. Основні досягнення природознавства XIX століття

2.1. Сучасна фізична картина світу

2.2. Простір і час

2.3. Основні концепції простору й часу

2.4. Поняття простору і часу у філософії і природознавстві XVIII - XIX століть

2.5. Розвиток уявлень про простір і час у XX столітті

### Розділ 3.

## Передмова

Наука – це сфера дослідницької діяльності, що спрямована на виробництво нових знань про природу, суспільство і процеси мислення. Вона містить у собі всі умови і моменти цього виробництва. А саме: учених з їх знаннями і здібностями, кваліфікацією і досвідом, з поділом і кооперацією наукової праці, наукові установи, експериментальне і лабораторне устаткування, методи науково-дослідної роботи, поняття і категоріальний апарат, систему наукової інформації, а також усю суму знань, які виступають як попередні посилення, або засоби чи результати наукового пізнання.

### Характерні риси науки:

- чергування екстенсивних і революційних періодів її розвитку;
- діалектичне поєднання процесів диференціації та інтеграції наукових знань;
- розвиток фундаментальних та прикладних досліджень.

### Функції науки:

- пізнавальна – задоволення потреб людей у пізнанні законів природи, суспільства, мислення;
- практично-дієва – постійне вдосконалення виробництва і системи суспільних відносин як безпосередньої виробничої сили;
- культурно-виховна – розвиток культури, гуманізація процесу виховання та формування нового покоління, сприяння подальшому розвитку і самовдосконаленню людини як індивіда і суспільства в цілому.

В історії людства відбувалися закономірні зміни щодо «спокійних» і революційних періодів розвитку науки, яка знаходилася в єдиному потоці процесів, що відбувалися та відбуваються в суспільстві. Тому слід підкреслити, що наука, її історія, не можуть бути відокремленими від розвитку суспільства в цілому.

Уся історія пізнання свідчить про наявність могутніх струменів знань, ідей, образів, уявлень, спрямованих від природничих наук до гуманітарних і від гуманітарних – до природничих, про найтіснішу взаємодію між науками про природу й науками про суспільство та людину. Особливо важливу роль ця взаємодія відігравала в періоди наукових революцій, тобто глибинних перетворень способів пізнання, принципів і методів наукової діяльності.

Природознавство завжди впливало на розвиток гуманітарних наук як своїми методологічними установками, так і загально-світоглядними уявленнями, образами та ідеями. Особливо могутнім став цей вплив у наш час – в епоху науково-технічної революції, радикальних змін у ставленні людини до світу, до природи, глобальних інтеграційних процесів як у науці, так і в духовній культурі в цілому. Підготовка сучасного фахівця-економіста та гуманітарія із широкою базовою освітою уже немислима без ознайомлення його з філософією, політологією, історією та сучасним станом природничо-наукового пізнання. Через це до навчальних планів підготовки фахівців з економічних та гуманітарних галузей науки введено дисципліну "Концепції сучасного природознавства".

Мета цієї дисципліни створити широку панораму як історії природознавства, так і загальних елементів сучасної природничо-наукової картини світу, світоглядних і методологічних уявлень, які формуються в нашу епоху в надрах природознавства.

Вивчення дисципліни "Концепції сучасного природознавства" сприяє формуванню в студентів орієнтирів, установок і цінностей раціонального ставлення до світу, природи, суспільства, людини. Це дуже важливо саме в наш час, коли

накочується нова чергова історична хвиля міфологізації культури, масова свідомість реміфологізується, у ній усе частіше піддаються сумніву досягнення, цінності й можливості наукового пізнання світу; коли відбувається сплеск інтересу до містицизму, розквіт квазінаукової міфотворчості, паракультурних форм свідомості, окультизму, магії, астрології, спіритизму; коли втеча від матеріалізму до містики, від науки до міфу стала модою для безмежного вітчизняного й зарубіжного скептицизму. За цих умов набуває особливої ваги ствердження ідеалів науково-раціонального ставлення до дійсності, на яких побудована вся наша цивілізація. Адже безмежний скептицизм, так само як і безмежний догматизм, є могутнім гальмом економічного, суспільного й культурного розвитку.

Основні цілі й завдання дисципліни такі:

- розуміння специфіки природничо-наукового й гуманітарного типів пізнавальної діяльності, необхідності їх глибокого внутрішнього узгодження, інтеграції на основі цілісного погляду на навколишній світ;
- більш глибоке розуміння відмінності та єдності науково-раціонального й художньо-образного способів духовного освоєння;
- усвідомлення історичного характеру розвитку наукового пізнання, історичної необхідності в періодичній зміні наукових картин світу, наукових революцій, сутності соціокультурної детермінації пізнавальної діяльності;
- формування чіткого уявлення про сучасну фізичну картину світу як про систему фундаментальних знань, про основи цілісності й різноманітності природи, які визначають сутність сучасного природознавства;
- формування уявлень про сучасну астрономічну картину світу, яка найбільш безпосередньо визначає зміст сучасного наукового світоуявлення й світогляду;
- формування уявлень про сучасну біологічну картину світу, про наступність у розвитку природних систем від неживої до живої матерії (до клітини, організму, людини, біосфери й суспільства);
- усвідомлення змісту сучасних глобальних екологічних проблем у їх зв'язку з основними законами природознавства;
- формування уявлень про принципи універсального еволюціонізму й синергетики та можливості їх застосування до аналізу процесів, що протікають не тільки в природі, а й у суспільстві;
- ознайомлення з методологією природничо-наукового пізнання, принципами теоретичного моделювання об'єкта в природознавстві, можливостями перенесення методологічного досвіду природознавства в економічні та гуманітарні науки.

Ритм нашого життя з кожним днем збільшується, а час на виконання тієї чи іншої роботи зменшується. Нагромадження знань, навичок та сучасних технологій, дозволяє нам майже без помилково виконувати поставлені перед нами завдання. Ми вже не витрачаємо час для переписування текстів. Ми їх форматуємо або копіюємо. Більшість завдань виконує техніка на підприємствах. Не так давно люди на виноградарях чавили сік власними руками, здебільшого навіть ногами (яскраве висміювання технічних пристроїв можна побачити в усім відомому фільмі «Приборкання норавливого»). Наше пряме завдання навчитися працювати з технікою її вдосконалювати та за допомогою знову ж таки техніки винаходити все

нові і нові блага для суспільства.

Оскільки природа надзвичайно різноманітна щодо видів об'єктів, їхніх властивостей і форм руху, то в процесі її пізнання формувалися різні природничі науки: фізика, хімія, біологія, астрономія, географія, геологія і багато інших.

Тож, щоб розуміти концепцію сучасного природознавства, слід звернутися до часів коли зароджалися наука, накопичувалися знання якими ми користуємося в повсякденні для полегшення та комфорту нашого життя.

У посібнику враховані особливості навчального плану, згідно галузевого стандарту вищої освіти Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України відповідно до вимог освітньо-професійної програми підготовки фахівців з напрямку 0501 «Менеджмент».

## **Розділ 1.**

### **Розвиток природознавства від емпіричних знань до розвитку сучасних наук**

#### **1.1. Зародження рахунку. Перші математичні знання. Вавілонська математика та її застосування у фізиці.**

У процесі історичного становлення первісна людина тривалий час орієнтувалася в навколишньому середовищі, відображаючи й фіксуючи лише якісні (а не кількісні) властивості предметів. При цьому, мабуть, важливу роль відігравала образна пам'ять: було цілком достатньо виділити й запам'ятати якісні ознаки речей. Так, первісний оленяр відразу ж помічав відсутність у стаді кількох особин, індивідуальні ознаки яких він добре розрізняв.

Проблема походження первісної здатності людини до рахунку – одна з найцікавіших у проблематиці первісної культури. Рахунок є, власне кажучи, першою теоретичною діяльністю розуму, абстрактною здатністю мислення. Розвиток здатності до рахунку – важливий показник рівня розвитку людської свідомості, її спроможності абстрагувати, узагальнювати, теоретизувати.

Головними передумовами становлення кількісних уявлень, здатності до рахунку були практична діяльність людини, природні ритми, пізнавальна процедура порівняння (виділення кількісно визначених характеристик природних предметів і встановлення співвіднесеності їх між собою).

Найважливіший етап (і умова) у процесі вироблення поняття рахунку пов'язаний із виявленням співвідношення елементів однієї множини однотипних речей з елементами іншої, якісно іншої множини (розподіл усередині общини, міжобщинний обмін).

Значним кроком у розвитку систем рахунку (поняття кількості) стало введення в процедуру співвіднесення між елементами двох різних множин деякої третьої множини, що є ланкою опосередкування між двома вихідними (чотири частини світу, раковини, палички, камінчики й ін.). Для вимірювання часу найбільш зручними виявилися природні ритми.

Наступний історичний етап у розвитку рахунку пов'язаний із заміною природних посередників на штучні. Такими були карби, вузлики, смуги фарби й т.п. Однією з особливостей даного етапу є те, що він безпосередньо сприяв зародженню найдавніших астрономічних уявлень, первісної астрономії.

І, нарешті, завершення становлення системи рахунку пов'язане з розробкою поняття числа. Абстрактне поняття числа виражає кількісні відносини вже незалежно від реального змісту, від конкретних, речовинних ознак сукупностей предметів.

У результаті з великої кількості різноманітних систем рахунку (після тривалого попереднього їх відсіювання) закріплюється переважно десяткова система. Це, безумовно, не можна вважати випадковим збігом: 10 місячних місяців вагітності, то для епохи матріархату було дуже важливим природним ритмом; 10 пальців рук як головного природного знаряддя праці й ін.

Становлення первинних астрономічних уявлень і календарів було нерозривно пов'язане з розвитком математичних уявлень та обчислень, насамперед лічби й вимірювань, які посідали винятково важливе місце у господарській діяльності людини. Прогрес математичних знань наочно відображає хід інтелектуального розвитку людини й суспільства, оскільки "першою теоретичною діяльністю розуму, що ще вагається між чуттєвістю й мисленням, – підкреслював К. Маркс, – є

рахунок". Відомі межі лічби в різних народів спочатку були різними – від 100 до 1000 – і пов'язувалися з процесом розпаду первісного суспільства та активізацією торговельних й інших відносин.

Розширення меж кількісних операцій до десятка тисяч зумовило удосконалення інших розділів математичних знань. Потреба у вимірюваннях та обчисленнях зростала, але її реалізація ставала все більш нерівномірною в умовах майнового й соціального розшарування общини. Процедура лічби набувала настільки різноманітних форм, що важко всі їх перелічити: за допомогою пальців, паличок, соломин, камінчиків, зернят, за допомогою пучків, рахункових бірок і ременив, вузлів, кольорових шнурів, нарізки різної кількості одиниць (5, 10, 20 одиниць) у залежності від системи лічби.

Створення все більш різноманітних форм кам'яних, а пізніше металевих знарядь, керамічних виробів вимагало попереднього практичного вирішення певних задач у сфері просторового співвідношення площин, об'ємів, фігур, вимірювання одних предметів за допомогою інших. Без попереднього проведення горизонтальних і вертикальних (прямовисних) ліній, без побудови з їх допомогою прямих кутів було б неможливо споруджувати різні будівлі. Утвердження приватного землеволодіння потребувало точного вимірювання довжин, відстаней, площ земельних ділянок; звідси і давньогрецький термін "геометрія" (землеміряння) на позначення розділу математики.

Математика Стародавнього Вавилону вже оперувала позиційною системою обчислень (в якій цифра має різне значення залежно від її місця в складі числа). Система обчислень була шестидесятиричною. Жителям Стародавнього Вавилону було відоме наближене значення відношення діагоналі квадрата до його сторони (вони вважали, що воно приблизно дорівнює 1,24).

Вавилонська математика піднялася до алгебраїчного рівня, оперуючи не числом узагалі, а числом як абстракцією. При цьому числа розглядалися як певний символ іншої, вищої реальності (поряд із значною кількістю інших символів такої вищої реальності). Стародавні вавилоняни на відміну від давньогрецьких математиків, очевидно, ще не опанували уявлення про числа як про певну абстрактну реальність, що знаходиться в особливому зв'язку з матеріальним світом. Тому в них не виникало світоглядних проблем, пов'язаних з питаннями про природу неспіввідносних часток та ірраціональних чисел.

Вавилонянам були відомі рівняння з одним невідомим; система рівнянь із двома невідомими; додавання арифметичних прогресій; пропорційність для паралельних прямих; теорема Піфагора; площа трикутника й трапеції; площа круга; довжина кола; об'єм призми й циліндра; об'єми зрізаного конуса й піраміди вони визначали за неправильними формулами.

Найсуттєвіша загальна особливість і загальний історичний недолік давньосхідної математики (на думку більшості дослідників) – її переважно рецептурний, алгоритмічний, обчислювальний характер. Математики Стародавнього Сходу навіть не намагалися довести істинність обчислювальних формул, які використовувалися для вирішення конкретних практичних задач. Усі такі формули подавалися у вигляді розпоряджень: "робити так і тільки так". Тому вивчення математики полягало в механічному зазубрюванні й заучуванні способів вирішення типових задач, які не змінювалися протягом століть.

Із цього приводу Р. Фейман ("Зв'язок математики і фізики") відзначає саме позитивні сторони вавилонської математики: "...Можливі два погляди на



математику. Для зручності один з них я назву вавилонською традицією, а інший – грецькою традицією. У вавилонських школах математики учень розв'язував безліч прикладів, поки не вловлював загального правила. Він докладно знав геометрію, багато різних властивостей кола, теорему Піфагора, формулу площ квадратів і трикутників і т.д. Усе було готове, щоб робити обчислення. Але Евклід виявив, що всі теореми геометрії можна вивести з кількох простих аксіом. Сьогоднішня математична традиція полягає в тому, що беруть певні ідеї, які умовилися вважати аксіомами, і, виходячи з них, будують теорію. Математики мають справу тільки зі структурою міркувань, і їм, по суті, байдуже, про що вони говорять. їм навіть не потрібно знати, про що вони говорять, або, як вони самі висловлюються, чи щирі їхні твердження.

Щоб розуміти фізику, потрібна строга рівновага в думках. Ми повинні тримати в голові всі різноманітні твердження й пам'ятати про їхні зв'язки, тому що вплив законів часто сягає далі від їх доказів. Тому фізики вивчають вавилонську математику й приділяють мало часу аксіоматичній побудові своєї науки. Іншими словами, математик готує абстрактні докази, якими ви можете скористатися, приписавши реальному світу певний перелік аксіом. Фізик же не повинен забувати про значення своїх висловлювань. Це дуже важливий обов'язок, яким схильні нехтувати люди, що прийшли у фізику з математики".

## **1.2. Накопичення астрономічних знань. Астрономія та календар.**

### **Астрономічні знання стародавнього Єгипту й Межиріччя.**

Значний обсяг накопиченого археологічного матеріалу дозволяє стверджувати, що ще в палеоліті (додаток 1) відбувалося нагромадження астрономічних знань. На верхньо-палеолітичних стоянках у різних частинах Європи та Азії знайдено наскельні зображення, браслети, пряжки, вироби з бивня мамонта й т.п., що містять ритмічно повторювані нарізки та ямки, їхня структура й розподіл відповідають місячним циклам, тобто вони являють собою найдавніші форми первісного календаря (10 місячних місяців – близько 280 діб). Наприклад, браслет виготовлено так, що особливим чином виділяється число 7 (адже 7 діб – тривалість фази Місяця).

Ще в епоху Мустьє (близько 100-40 тис. років тому) зародилася традиція спостережень за небесними явищами, так як цього потребувала практика сезонних промислів. На стоянках неандертальців (у печерах) результати цих спостережень фіксувалися у вигляді різних астральних малюнків (кола, хреста, групи ямок та ін.). У верхньому палеоліті (40-70 тис. років тому) астральні малюнки ускладнюються, відображаючи досить складні закономірності у поведінці Місяця, Сонця та ін. Близько 20 тис. років тому вже існували певні прийоми рахунку часу за Місяцем і Сонцем. Велике значення у фіксації небесних явищ, які регулярно повторювалися, мав збіг ритмів природних процесів і громадського життя, ритмів природи й фізіології людського організму. При цьому зачатки біологічних, астрономічних і математичних знань виникають у нерозривній єдності.

Таким чином, у системі свідомості первісної родової общини на рівні повсякденного стихійно-емпіричного знання було накопичено значний об'єм початкових відомостей про світ, склалися важливі початкові абстракції (серед них – абстракція кількості), розроблено системи рахунку, календарі, зафіксовано найпростіші біологічні, астрономічні, медичні та інші закономірності. Рациональне знання, накопичене в епоху первісної родової общини, було тим підмурівком, на

якому надбудовувалася й розвивалася протонаука давнього світу.

В епоху формування класів розвиток астрономії й удосконалення сонячного календаря стають основою прогресу у лічбі часу й розвитку уявлень про нього. Відтворююче господарство постійно ускладнювалося, вимагаючи удосконалення вміння орієнтуватися в часі. Більш точні розрахунки, пов'язані із рухом сонячного циклу (добова, річна, сезонна періодичність), витіснили місячний календар. У той же час у різних пережиткових формах продовжували зберігатися уявлення про лічбу часу за Місяцем. Пошуки шляхів удосконалення лічби часу для потреб хліборобсько-скотарського господарства вимагали, зокрема, розробки різних варіантів узгодження місячного календаря із сонячним. Прив'язка встановлених співвідношень до місцевих природних і господарських умов надавала своєрідного етнічного забарвлення знайденим вирішенням у кожному конкретному випадку, не позбавляючи їх внутрішнього, раціонального за своєю сутністю змісту. Яскравим прикладом цього є неолітичні й енеолітичні менгіри та дольмени на території Франції, що демонструють у самій техніці споруд елементи точних знань не тільки з геометрії, арифметики, механіки, але й астрономії, про що свідчить досить високий рівень коректності їх орієнтації на точку сходу Сонця.

Люди давно помітили розбіжність між місячним та сонячним календарями. Багато народів долали ці труднощі, удаючись до різних вузько-спеціалізованих відповідно до господарських потреб конкретних календарних розрахунків.

У деяких народів практичне коректування лічби часу за Сонцем і Місяцем досягалося насамперед завдяки спостереженням за зоряним скупченням Плеяд у сузір'ї Тельця, яке було виділено на карті зоряного неба ще в період ранніх мисливських общин.

У Середземномор'ї в I тис. до н.е. із 48 відомих сузір'їв 25, тобто більше половини, позначалися назвами тварин. Назви Тельця, Овна, Козорога та інших сузір'їв Зодіаку (сама назва якого походить від давньогрецького слова "тварина") є свідченням першорядної ролі первісних мисливців і скотарів у формуванні карти зоряного неба, сприйнятої і розвинутої пізніше в ранньокласовому суспільстві.

У Стародавньому Єгипті зв'язок між небесними явищами й сезонами року був усвідомлений дуже давно, очевидно, ще в період Стародавнього царства. Провісником нового року в давніх єгиптян був Сиріус. Перша видимість Сиріуса на ранковому небі (геліактичний вихід Сиріуса) спостерігалася за кілька тижнів до розливу Нілу (близько 20 липня), виходу його з берегів, повені, тобто найважливішої події в єгипетському сільськогосподарському році. Ці землеробські спостереження були першим кроком на шляху становлення наукової астрономії.

В епоху Середнього царства (2052-1786 рр. до н.е.) були розроблені діагональні календарі (декани) – зоряний годинник, призначений для визначення часу за зірками.

Згодом декани перекочували в астрономічну літературу, де вони виступали в новій формі й новій ролі – богів, які визначають долі людей. Погляди єгиптян значною мірою вплинули на становлення давньогрецької астрономії.

Ще вищого рівня розвитку порівняно із Стародавнім Єгиптом астрономія досягла у Вавилоні й Ассирії. Так, у Месопотамії на початку III тис. до н.е. було створено місячний календар, а через тисячу років – місячно-сонячний. До місячного року час від часу додавався додатковий "високосний" місяць, щоб зрівняти його із сонячним роком. Вавилонянам (халдеям) уже було відомо, що вісім сонячних років приблизно відповідають 90 місяцям. Точність визначення тривалості місяця тут

становила 2 хв., а середня тривалість року лише на 30 хвилин відрізнялася від справжньої тривалості тропічного року в середині V ст. до н.е. У VII ст. до н.е. давньовавилонські астрономи навчилися передбачати місячні затемнення. Астрономи Межиріччя ще не були знайомі з геометричною моделлю Сонячної системи і тому не вміли точно передбачати сонячні затемнення. Вони могли лише прогнозувати можливість цього астрономічного явища.

Найвизначнішим досягненням давньовавилонської астрономії став розвиток математичних методів для попереднього обчислення положень Сонця, Місяця й планет на небосхилі, а також часу настання затемнень та інших небесних явищ. На Давньому Сході розвиток астрономічних знань найтіснішим чином був пов'язаний із цілями й задачами астрології.

### **1.3. Металургія.**

Досить давній осередок металургії існував у Південно-Східній Азії, внутрішні райони якої відомі своїми найбільшими у світі запасами олов'яної руди, зокрема в Північно-Східному Таїланді, а також на Півночі В'єтнаму. У Південному Китаї і Гонконзі бронзовий вік почався пізніше – з 14 ст. до н.е.

Сліди найдавнішої достовірно документованої ковальської обробки міді (14 ст. до н.е.) знайдено в ряді селищ Передньої Азії. Уже тоді цей метал був досить поширеним – від Центральної Анатолії до Південно-Західного Ірану й Західної Сирії. Джерелами постачання металу були найбагатші поклади самородної міді, розташовані в районі Ергамі в Південно-Східній Анатолії. Спосібом холодного кування не можна було виготовляти із самородної міді крупні вироби, і тому серед найдавніших мідних речей переважають, насамперед, намистини, про-низки, голки й шила. У 7 тис. до н.е. з'являється техніка гарячого кування, про що свідчить поява виробів із свинцю.

Починаючи з кінця 6 тис. до н.е., в Ірані з'являються великі вилиті металеві вироби: долота, верхівки булав, плоскі сокири, кинджали, арпи. У 5-6 тис. до н.е. у цих районах поступово поширилося штучне легування міді нікелем і миш'яком, інакше кажучи, виникло найдавніше бронзоливарне виробництво. Розширення металургійного виробництва потребувало могутньої сировинної бази, і вже в другій половині 5 тис. до н.е. видобування руди здійснювався в спеціальних рудниках.

У Єгипті до середини 5 тис. до н.е. з'явилися перші мідні речі – намистини й шпильки, рибальські гачки, гарпуни, долота, сокири, кинджали, тесла.

Найдавніші речі із заліза датовано кінцем 6 тис. до н.е. в Ірані й першою половиною 4 тис. до н.е. у Єгипті. Як правило, вони виготовлялися з метеоритного заліза. І лише невеликий виріб з рудного заліза, датований першою половиною 6 тис. до н.е., знайдено в Іраці.

Вважають, що найдавніше залізорудне виробництво виникло в Анатолії, очевидно, у її північних районах, у другій половині 4 тис. до н.е.

Перехід до масового виробництва заліза в західній частині Старого Світу відбувся наприкінці II тис. до н.е. у Східному Середземномор'ї, де було відкрито процес вуглецювання заліза. Ставши значно твердішим, воно із цього часу стало серйозним конкурентом міді й бронзи як матеріал для виготовлення найрізноманітніших, насамперед господарських, виробів. А суттєві етнокультурні й соціальні зміни, що відбувалися в цей період у країнах Давнього Світу, сприяли поширенню залізобудівного виробництва від Європи до Індії.

У другій половині I тис. до н.е. в Китаї навчилися одержувати настільки високі

температури, що залізо можна було тепер не тільки виплавляти з руди, але й відливати у форми. Так почалося виробництво чавуну.

Нарешті, третій своєрідний технологічний прийом було розроблено в Африці. При цьому первинним продуктом плавки стали не криця й чавун, а високовуглецева сталь. З її виробництвом були пов'язані ще два, як вважають, суто африканські винаходи: високий циліндричний горн і попередній підігрів повітря, що надходить до нього.

На відміну від міді, залізні руди були більш поширеною сировиною; їх родовища розкидані в найрізноманітніших районах світу, вони легкодоступні. Із заліза почали виготовляти різний інвентар, у тому числі й сільськогосподарський, що дозволило освоїти нові недоступні раніше райони. У першу чергу це виявилось в масовому наступі на ліси. Не меншу революцію здійснив і залізний леміш – завдяки йому було створено більш досконалі типи рал. У початковий період із заліза виготовляли також прикраси, художні вироби, ритуальні предмети, багато оздоблену зброю і т.д.

#### **1.4. Розвиток гірничої справи та видобування корисних копалин.**

##### **Географія та картографія.**

Протягом неоліту було освоєно основні прийоми гірничої справи (шахти, забої, штреки, кріпильні стовпи, вентиляційні вікна й т.д.), що використовувалися людьми й у наступні епохи.

Найбільші розробки кременю (IV тис. до н.е.) відомі в Бельгії, Великобританії, Франції, Польщі, на Середній Наддністрянщині, у Донбасі, а також в Узбекистані. У Єгипті шахти з видобутку кременю функціонували вже в другій половині V тис. до н.е. Спочатку кремень видобували відкритим способом, прокладаючи траншеї. У Бельгії такі траншеї досягали 10 м у довжину і 3-4 м у глибину.

Активно розроблялися поклади сланцю, яшми, нефриту; з них виготовляли церемоніальні сокири. Зростало видобування опалу й андезиту, базальту й кіноварі; малахіту й лазуриту. Гірські породи й мінерали спочатку використовували для приготування фарб – їх товкли й розтирали в ступках.

Велику роль у господарському й соціальному житті первісної Європи відігравав обсидіан, який видобували в середземноморських і карпатських родовищах. З другої половини V тис. до н.е. в Західній Європі видобували камінь для спорудження мегалітів. Величезні плити висікали кам'яними знаряддями або за допомогою вогню й води, використовуючи при цьому природні тріщини в камені.

Ще одним важливим об'єктом гірських копалин у пізній первісності була сіль. Спочатку її, очевидно, добували двома способами – випаровуванням солоної води й спалюванням солоних рослин. Ці два основних методи існували в багатьох різноманітних варіантах. Деякі народи збирали сіль на морському узбережжі, інші влаштовували штучні водозабірники із солоних джерел, де сіль накопичувалася природним шляхом у результаті випаровування води на сонці, треті випаровували воду за допомогою розпечених каменів, а в Конго люди підігрівали посудини із солоною водою на вогні. Відомий також інший спосіб видобутку солі – спалювання солевмісних рослин. Як сіль використовували також отриманий попіл, іноді – сік. Іноді спалювали шматок звичайного дерева, попередньо вимочений у солоній воді. А подекуди солевмісні рослини не спалювали, а сушили й розтирали. У бронзовому віці в Європі почався видобуток кам'яної солі. Ранні рудні виробки являли собою вузькі, як щілини, кар'єри шириною 50-70 см, довжиною 10 м і більше й глибиною 2-4 м.

Первинну обробку руди здійснювали як безпосередньо біля рудників, так і в поселеннях, іноді на значній відстані – за 100 км від районів видобування, а в Ірані – за 800 км. Відбувається перехід від імпорту злитків металу до імпорту руди. Усе це свідчить про істотні зміни в характері металургійного виробництва й обміну й, очевидно, про відокремлення гірничої справи від металургії.

Процес консолідації племен, розвиток торгових, військових та інших відносин із сусідами розширювали обрії сукупних географічних пізнань.

Потреба доповнювати усне передавання географічних знань наочними поясненнями виникла дуже рано серед корінного населення всіх частин світу. Спочатку це були короткочасні найпростіші схеми місцевості, рельєфно зображені на землі за допомогою каменів, лозин, соломи й інших підручних засобів, накреслені пальцем або палицею на піску, пухкій глині, на снігу.

Потреба в більш довгостроковому наочному приладді, особливо в умовах кочового життя, привела до появи більш довговічних і портативних форм відображення місцевості за допомогою графічних методів. Карти креслили вістрям ножа чи шила на корі дерева, малювали на шкірі й тканині пензликами. Одні карти були призначені для навчання юнаків географії, інші зберігалися в таємниці в старійшин і вождів, їхні секрети передавалися найближчим родичам по чоловічій лінії. Такі карти, доповнені усними переказами, орієнтуванням за Сонцем і зірками, використовувалися в далеких плаваннях на відстані до тисячі миль.

Розширення торговельних зв'язків стимулювало подальший розвиток первісної географії й картографії. У ході трансформації первіснообщинних відносин у ранньокласове суспільство розвиток географічних знань і картографії поступово зосереджувався в руках панівної верхівки й спрямовувався на задоволення її потреб. У класовому суспільстві практична цінність географії вже нерозривно пов'язується з діяльністю державних людей і володарів. Географія Страбона починається з констатації цього факту.

### **1.5. Розвиток домашніх промислів і становлення ремесла.**

Формування ремесла, як писав Ф. Енгельс, підготувало ґрунт для "другого великого поділу праці", що свідчило про значний прогрес у розвитку виробництва і суспільних відносин. Воно мало універсальний характер, виявляючись із заavidною регулярністю практично у всіх районах світу, де відбувався процес формування класів.

Домашні промисли – це виготовлення виробів у самому домогосподарстві для внутрішнього споживання. Ремесло ж обслуговує насамперед зовнішніх замовників та ринок. Домашні промисли були доступними для кожної родини або сімейної групи, а ремеслом займалися окремі фахівці, які володіли певними знаннями й навичками, що нерідко зберігалися в таємниці від інших общинників. Так як за свою працю ремісники одержували певну платню, то рано чи пізно з поглибленням спеціалізації вони повинні були порвати із сільськогосподарською працею – відбувається відокремлення ремесла від землеробства.

Процес становлення ремесла спочатку торкнувся металургії, причому через складність свого заняття металурги із самого початку були ремісниками-професіоналами. На початковому етапі розвитку металургії залізо добували всією або частиною общини. Головною продукцією цього виробництва були зливки металу, призначені для обміну. Металеві вироби, як правило, виготовлялися на замовлення.

Згодом через зростання складності металургійного процесу навчання ремеслу найчастіше відбувалося по родинній лінії, отже, заняття металургією і металообробкою все жорсткіше пов'язувалося з окремими родами. При цьому, як правило, знання передавалися від батька до сина, рідше – від дядька до племінника.

Наступним кроком було перетворення металургів у замкнуту ендогамную касту. Принципово такий же характер мало гончарне виробництво, ткацьке ремесло й т.д.

Еволюція гончарства пов'язана насамперед з удосконаленням гончарних печей (VII тис. до н.е.) і появою гончарного круга (VI тис. до н.е.). Застосування спеціальних гончарних горнів сприяло поліпшенню випалювання посуду й, отже, дозволяло розширити асортимент продукції, а крім того, створювало передумови для розвитку масового виробництва.

Іноді вдається простежити стійкий зв'язок між розвитком ремесел й процесом утворення міст, а, отже, і посиленням контролю за ними з боку знаті. Про великий вплив на ранній розвиток ремесла інтересів знаті, що формувалася в той період, свідчить сам асортимент виробів, пов'язаних насамперед із соціально престижною сферою і релігійними ритуалами (пишні прикраси, дорога зброя, ритуальні предмети, багатий посуд). У цей період багато високомистецьких виробів виготовлялися спеціально як поховальний інвентар або для сховку в скарбах.

Крім майстрів-металургів, у середині III тис. до н.е. виділилися такі фахівці, як майстри з виготовлення стріл, кожум'яки, теслі, косторізи. Це знайшло відображення в особливостях виготовлення й оздоблення поховального інвентарю. Деякі із цих первісних професій набули особливої популярності.

## **1.6. Біологія та медицина.**

У первісній картині світу важливе місце посідали уявлення про єдність людини з природою, її подібність із тваринами. Ці уявлення стали вихідною базою для розвитку біологічних і медичних знань.

З поглибленням спеціалізації галузей відтворюючого господарства закладалися практичні основи для нових видів діяльності: ветеринарії, агротехніки, гідротехніки – нових розділів раціональних знань. Досвід мисливців і збирачів було покладено в основу суспільної й особистої гігієни, санітарії, застосування засобів рослинного походження (трави, корені, квіти, плоди, кора дерев та ін.) з лікувальною метою.

Значне поширення керамічного посуду сприяло використанню лікувальних відварів, які складалися за все більш складними рецептами. З розвитком скотарства пов'язане використання молока не тільки для харчових, але й для лікувальних цілей. Емпіричні пошуки в цій галузі були неможливі без найпростіших експериментів, які стосувалися і біології, і хімії. Так було закладено основи біохімії.

Завдяки удосконаленню процесів виплавки металів, способів їх очищення та виготовлення сплавів з потрібними властивостями первісна хірургія отримала більш досконалі металеві інструменти: скальпель, ланцет, металевий ніж (замість кам'яного), щипці, затискачі (замість дерев'яних). Усе це сприяло прогресу практичної медицини" в активі якої були не тільки найпростіші хірургічні операції, наприклад, кровопускання й зшивання вен, але й голковколювання, масаж, фізіотерапевтичні процедури, дієтика. Основою лікування залишалася народна медицина, але застосування її засобів поступово зосереджувалося в руках вузького кола професійних лікарів.

Становлення професійної медицини в умовах розкладання первісного суспільства поєднувалося з ритуально-магічними діями. У виборі лікарів і шаманів не було істотної переваги тих чи інших – це відповідало, в кінцевому підсумку, загальній атмосфері еволюції духовної культури в ранньокласових суспільствах.

### **1.7. Зародження та становлення писемності.**

Найбільшим культурним досягненням, що утвердилося на рубежі первісного й класового суспільства, є упорядкована писемність.

Серед писемних засобів передачі повідомлень часто згадується так зване "предметне письмо". Цим розпливчастим терміном позначаються дуже різноманітні явища: від купи листя, залишеної мисливцем на стежці з метою орієнтування для тих, хто йде слідом, до різноманітної символіки відносин між ворогуючими сторонами. Серед інших видів зорової символіки до вирішення подібних завдань наближалися перехідні від предметних до образотворчих засоби закріплення й передачі інформації. Наприклад, в Африці плем'я йоруба певним числом і взаємним розташуванням раковин каурі фіксувало й передавало відомості про взаємини людей, у т.ч. про стосунки між кредитором і боржником.

Вирішальне значення для створення специфічних передумов становлення писемності мала поява й розвиток образотворчої діяльності, що використовувала пластику форм, кольори й, найголовніше, – графіку.

У кінцевому підсумку, серед різних концепцій становлення писемності можна виділити три основні чинники, що визначають специфіку цього процесу: виділення графічної символіки серед інших форм первісних комунікацій, вироблення стабільних графічних засобів для передачі загального змісту повідомлень, створення стійкої системи графічних знаків для передавання мовної інформації.

Використання малюнків з метою фіксування й передавання інформації сягає корінням у часи розквіту первісного суспільства. Зачатки піктографії ("рисункового письма") більшість фахівців пов'язують з мистецтвом палеоліту, вбачаючи в його художньо-естетичних і пізнавальних функціях елементи комунікативно-меморіального призначення окремих творів.

На відміну від первісного мистецтва виконання малюнків як піктограм не має на меті створення конкретних художніх образів. Тому піктографічні малюнки порівняно легко стають схематичними, а потім і умовними зображеннями, не втрачаючи при цьому основного змісту переданої з їх допомогою інформації.

Згодом за кожним малюнком закріплювався строго визначений зміст, тобто зображення ставало однозначним; вироблявся єдиний спосіб накреслення малюнка в межах того фонду піктографічних позначень, якими користувалося плем'я.

Поряд із процесами спрощення, схематизації окремих малюнків, наближення їх як за формою, так і за функціями до перехідних "рисунково-знакових" елементів письма, що зароджувалося, відбувалося певне ускладнення в композиційних побудовах піктографічних повідомлень. Цьому сприяло поступове введення в зображувальний арсенал піктограм деяких типів умовних знаків: рахункових, маршрутних, картографічних, знаків власності й т.д., які сформувалися раніше.

Вищі форми розвитку піктографії можна відшукати в рукописах ацтеків. Вони являють собою серії багатоколірних малюнків, майстерно виконаних на оленячій шкірі або на тканині з лубу агави. Малюнки передавали поняття, а не звуки мови, причому важливу роль відігравали дати та інші чисельні позначення. Велике значення мала символіка кольорів, які застосовувалися при створенні піктограм.

Провести чітку межу між піктографією та ідеографією неможливо. Для цього не існує незаперечних підстав ні в графічній формі піктограм та ідеограм, ні в принципах побудови закінчених повідомлень. Протягом декількох тисячоліть піктографічне письмо поступово переростало в ідеографічне, де на зміну малюнкам приходили якісь певні знаки. Ідеограми частково зберігали рисункові накреслення й були пов'язані – прямо чи побічно – зі змістом подібних знаків. На певному етапі суспільного розвитку вони стали основою для створення первинної писемності. Це був період формування держав, коли виникла нагальна потреба в точному, однозначному передаванні управлінської, господарської, статистичної інформації, у фіксуванні законів, історичних подій, релігійних настанов і, разом з тим, з'явилася можливість виділити для виконання цих функцій спеціальну категорію людей (переписувачів, жреців).

Ідеографічне письмо розвивалося в напрямку від зображення певних уявлень (образів, понять), незалежно від їх звучання в усному мовленні, до ієрогліфів. Ієрогліфи одночасно позначали й образ (уявлення, поняття), і ті звуки, з яких складаються слова, що позначають дані образи. Найдавніші письмена Шумеру, Єгипту, Китаю, Еламу, Криту, Урарту вже в IV тис. до н.е. широко використовували ієрогліфи (тобто "священні письмена, висічені на камені" – саме так древні греки називали ранню писемність єгиптян).

Становлення державності вимагало також безпомилкової однозначної фіксації в записах зростаючої кількості власних імен і географічних назв, що сприяло прогресуючій фонетизації письма. На завершальних стадіях розвитку ідеографії письмо стає словесно-складовим.

Найраніше це відбувається в шумерському клинописі близько 2400 р. до н.е.: написи царя Лагаша Еаннатума виконані вже за остаточно сформованими принципами змішаного словесно-складового написання. Клинописне письмо було досить складною системою, що складалася з декількох сотень і навіть тисяч спеціальних знаків. Його засвоєння вимагало значної спеціалізації і професіоналізації. Протягом III тис. до н.е. сформувалася і єгипетська ієрогліфіка. У суспільстві з'явилася ціла соціальна верства – верства переписувачів. Безперечно, переписувачі належали до числа найбільш інформованих та освічених людей свого часу. Саме переписувач був центральною фігурою месопотамської цивілізації.

Вищою формою писемності, що склалася в II тис. до н.е., була фонетична, буквена, в якій знаки позначали не предмети, а склади, звуки й графічно передавали окремі звукові позначення. Перше алфавітне письмо винайшли фінікійці. Фінікійське письмо було покладено в основу давньогрецького, а також арамейського письма, від якого пізніше виникли індійська, перська, арабська системи писемності.

Писемність як можливість зберігання, нагромадження й передавання знань стала найважливішим стимулом для прискорення розвитку духовної культури й визначальною передумовою становлення науки. Один невідомий єгипетський переписувач, розмірковуючи над значенням письма, записав на папірусі понад чотири тисячі років тому: "Людина зникає, тіло її стає прахом, усі її близькі зникають з лиця Землі, але писання змушують згадати її вустами тих, хто передає це у вуста інших. Книга потрібніша за споруджений будинок, вона краща від розкішного палацу, краща за пам'ятник у храмі".



## **Розділ 2. Основні досягнення природознавства XIX століття**

### **2.1. Сучасна фізична картина світу**

#### **2.1.1. Від геометричного методу до аналітичної механіки**

У XVIII-XIX ст. багато фізиків і філософів вдавалися до серйозного аналізу й перегляду вчення Ньютона про простір і час. З того часу, як основи класичної механіки" набули завдяки Ньютонові своєї завершеної форми, їх значення продовжувало залишатися предметом суперечок – принаймні до 1905 р. Боротьба розгорталася на найрізноманітніших ділянках науки й життя. Теорія перевірялася в експедиціях, в астрономічних спостереженнях, в обчисленнях математиків, обговорювалася у філософських і наукових дискусіях, викладалася в підручниках і монографіях.

Там, де в Ньютона йшлося про абсолютний простір і час, де він посилався при цьому на експерименти, деякі з його послідовників заявляли, що вони не потребують таких гіпотез і навіть доходило до того, що вони зводили його другу аксіому до простого визначення; через це відмінність між математикою і фізикою як експериментальною наукою сильно зміщувалася за рахунок останньої, від якої було відділено так звану чисту механіку.

Інші, навпаки, наполягали на істотно експериментальному характері цієї аксіоми. Сторони, які брали участь у цих дуже заплутаних суперечках, намагалися навести численні аргументи на підтримку своїх точок зору.

"Начала" Ньютона були викладені важкою геометричною мовою. Доведення були громіздкі та складні. У XVIII ст. в механіку проникають методи диференціального й інтегрального числення, які не наважився застосувати у своїй основній праці один із творців цих методів.

У XVIII ст. відбувалися не тільки перетворення методів ньютонівської механіки. Це століття відзначене пошуками загальних принципів механіки, еквівалентних законам Ньютона, або навіть більш загальних, ніж ці принципи. У результаті цих пошуків було відкрито принципи можливих переміщень у статипі, принцип Даламбера й принцип найменшої дії Мопертюї-Ейлера в динаміці.

#### **2.1.2. Принцип найменшої дії**

Історія цього принципу корінням сягає Герона Александрійського, його твердження про найкоротший час поширення світла, за допомогою якого Герой обґрунтував закон відображення.

Ферма (1601-1665) застосував цей принцип до заломлення світла й сформулював закон заломлення світла, виходячи з постулату: "Природа діє найбільш легкими й доступними шляхами".

Пізніше цю ідею розвинув І. Бернуллі (1667-1748). Він зіставив принцип Ферма із запропонованою ним варіаційною механічною задачею про лінію найкоротшого спуску важкої точки в полі ваги (брахістохрону). Цю задачу Бернуллі сформулював у такий спосіб: "У вертикальній площині дано дві точки: А і В. Визначити траєкторію, рухаючись по якій під впливом власної ваги, тіло М, почавши рухатися з точки А, досягне іншої точки В у найкоротший час". У принципі Ферма й у задачі про брахістохрону мова йде про встановлення мінімального значення інтеграла

$$\int_a^b \frac{ds}{v},$$

"Я, – писав І. Бернуллі, – відкрив дивну схожість між кривизною променя світла в

середовищі, яке постійно змінюється, і нашою брахістохронією кривою". Так уперше було помічено оптико-механічну аналогію, що відіграла важливу роль в історії фізики.

Надалі цю ідею розвивав стосовно Механіки П. Мюпертюї (1698-1759). У статті "Закон спокою" (1740) він поставив за мету вивести принцип рівноваги системи тіл і сформулював його як екстремальний принцип для деякої величини, яка дістала назву "суми сил спокою".

Через чотири роки потому Мюпертюї виступив зі статтею "Узгодження різних законів природи", в якій стверджував, що закони оптики є наслідком "метафізичного закону", який полягає в тому, що "природа, реалізуючи свої дії, завжди вдається до найбільш простих засобів" і що принцип Ферма є принципом найменшої дії. Світло, на думку Мюпертюї, вибирає шлях, "на якому кількість дії є найменшою". При цьому він пояснює, що слід розуміти під "кількістю дії". "Ця дія, – стверджує Мюпертюї, – залежить від швидкості, з якою рухається тіло, і від простору, який долає останнє, але вона не є ні швидкістю, ні простором, узятими окремо. Кількість дії тим більша, чим більша швидкість тіла; вона пропорційна сумі добутків відрізків на швидкість, з якою тіло долає кожний з них". Принцип Ферма-Мюпертюї виражається у вигляді твердження:

$$\sum m \cdot V \cdot S = \min$$

У сучасній редакції принцип Мюпертюї стверджує: коли в природі відбувається якась зміна, кількість дії, необхідна для цієї зміни, є найменшою з можливих.

### **2.1.3. Принцип Даламбера**

Основна праця Ж.Л. Даламбера (1717-1783) – "Трактат про динаміку" – була опублікована в 1743 р.

Перша частина трактату присвячена побудові аналітичної статички. Тут Даламбер формулює "основні принципи механіки", серед яких "принцип інерції", "принцип додавання рухів" і "принцип рівноваги".

"Принцип інерції" сформульований окремо для випадку спокою і для випадку рівномірного прямолінійного руху. "Силою інерції, – пише Даламбер, т я разом з Ньютоном називаю властивість тіла зберігати той стан, в якому воно перебуває".

"Принцип додавання рухів" являє собою закон додавання швидкостей і сил за правилом паралелограма. На основі цього принципу Даламбер вирішує задачі статички.

"Принцип рівноваги" сформульовано у вигляді такої теореми: "Якщо два тіла що рухаються зі швидкостями, оберненопропорційними їхнім масам, мають протилежні напрямки, так що одне тіло не може рухатися, не зрушуючи з місця інше тіло, то ці тіла перебуватимуть у стані рівноваги". У другій частині "Трактату" Даламбер запропонував загальний метод складання диференціальних рівнянь руху будь-яких матеріальних систем, заснований на зведенні задачі динаміки до статички. Він сформулював правило для будь-якої системи матеріальних точок, назване згодом "принципом Даламбера", відповідно до якого прикладені до точок системи сили можна розкласти на "діючі", тобто такі, які спричиняють прискорення системи, і "загублені", необхідні для рівноваги системи. Даламбер вважає, що сили, які відповідають "загубленим" прискоренням, утворюють таку сукупність, яка ніяк не впливає на фактичну поведінку системи. Іншими словами, якщо до системи прикласти тільки сукупність "загублених" сил, то система залишиться в спокої. Сучасне формулювання принципу Даламбера дав М.Є. Жуковський у своєму "Курсі

теоретичної механіки": "Якщо в який-небудь момент часу зупинити систему, що рухається, і додати до неї, крім її рушійних сил, ще всі сили інерції, що відповідають даному моменту часу, то спостерігатиметься рівновага; при цьому всі сили тиску, натягу й т.д., що розвиваються між частинами системи при такій рівновазі, будуть справжніми силами тиску, натягу й т.д. при русі системи в розглянутий момент часу". Слід зазначити, що сам Даламбер при викладі свого принципу не вдавався ні до поняття сили (вважаючи, що воно не є достатньо чітким, щоб входити в перелік основних понять механіки), ні тим більше до поняття сили інерції. Виклад принципу Даламбера із застосуванням терміна "сила" належить Лагранжу, який у своїй "Аналітичній механіці" дав його аналітичне вираження у формі принципу можливих переміщень. Саме Жозеф Луї Лагранж (1736-1813) і особливо Леонардо Ейлер (1707-1783) відіграли істотну роль в остаточному перетворенні механіки на аналітичну механіку.

#### **2.1.4. Аналітична механіка матеріальної точки й динаміка твердого тіла Ейлера**

Леонардо Ейлер – один з видатних учених, який зробив великий внесок у розвиток фізико-математичних наук у XVIII ст. Його творчість вражає проникливістю дослідницької думки, універсальністю обдарування й величезним обсягом залишеної наукової спадщини.

Уже в перші роки наукової діяльності в Петербурзі (Ейлер приїхав у Росію в 1727 р.) він склав програму грандіозного й всеосяжного циклу робіт в галузі механіки. Ця програма міститься в його двотомній праці "Механіка, або наука про рух, викладена аналітично" (1736). "Механіка" Ейлера була першим систематичним курсом ньютонівської механіки. Вона містила основи динаміки точки – під механікою Ейлер розумів науку про рух, на відміну від науки про рівновагу сил, чи статички. Визначальною рисою "Механіки" Ейлера було широке використання нового математичного апарата – диференціального та інтегрального числень. Коротко охарактеризувавши основні праці з механіки, що з'явилися на межі XVII-XVIII ст., Ейлер відзначав синтетико-геометричний стиль їхнього викладу, що створював для читачів надзвичайно багато труднощів. Саме в такій манері написані "Начала" Ньютона і більш пізня "Форономія" (1716) Я. Германа. Ейлер указує, що роботи Германа і Ньютона викладені "за звичаєм стародавніх за допомогою синтетичних геометричних доведень" без застосування аналізу, "тільки завдяки якому й можна досягти повного розуміння цих речей".

Синтетико-геометричний метод не мав узагальнюючого характеру, а вимагав, як правило, індивідуальних побудов стосовно кожної задачі окремо. Ейлер зізнається, що після вивчення "Форономії" і "Начал" він, як йому здавалося, "досить ясно зрозумів вирішення багатьох задач, однак задач, що якоюсь мірою відступають від них, уже розв'язати не міг". Тоді він спробував "виділити аналіз із цього синтетичного методу і ті ж пропозиції для власної користі проробити аналітично". Ейлер відзначає, що завдяки цьому він значно краще зрозумів суть питання. Він розробив принципово нові методи дослідження проблем механіки, створив її математичний апарат і блискуче застосував його до багатьох складних задач. Завдяки Ейлеру диференціальна геометрія, диференціальні рівняння, варіаційне числення стали інструментом механіки. Метод Ейлера, розвинутий пізніше його наступниками, був однозначним й адекватним предмету.

Праця Ейлера з динаміки твердого тіла "Теорія руху твердих тіл" має великий вступ із шести розділів, де знову викладено динаміку точки. У вступ внесено ряд

змін: зокрема, рівняння руху точки записуються за допомогою проектування на осі нерухомих прямокутних координат (а не на дотичну, головну нормаль і нормаль, тобто осі нерухомого природного тригранника, пов'язаного з точками траєкторії, як у "Механіці").

Наступний після вступу "Трактат про рух твердих тіл" складається з 19 розділів. В основу трактату покладено принцип Даламбера. Коротко зупинившись на поступальному русі твердого тіла і ввівши поняття центра інерції, Ейлер розглядає обертання навколо нерухомої осі й навколо нерухомої точки. Тут подано формули для проєкцій миттєвої кутової швидкості, кутового прискорення на осі координат, використовуються так звані кути Ейлера й т.д. Далі викладено властивості моменту інерції, після чого Ейлер переходить, власне, до динаміки твердого тіла. Він виводить диференціальні рівняння обертання важкого тіла навколо його нерухомого центра ваги за умови відсутності, зовнішніх сил і розв'язує їх для найпростішого окремого випадку. Так виникла відома й настільки ж важлива в теорії гіроскопа задача про обертання твердого тіла навколо нерухомої точки. Ейлер працював також над теорією суднобудування, у галузях гідро- та аеромеханіки, балістики, теорії стійкості й теорії малих коливань, небесної механіки й ін.

Через вісім років після виходу "Механіки" Ейлер збагатив науку першим точним формулюванням принципу найменшої дії. Формулювання принципу найменшої дії, які належали Мопертюї, були ще дуже недосконалими. Перше наукове формулювання принципу належить Ейлеру. Він сформулював свій принцип у такий спосіб: інтеграл  $\int m \cdot V \cdot dS$  має найменше значення для справжньої траєкторії, якщо розглядати

останню в групі можливих траєкторій, що мають загальні початкове й кінцеве положення й здійснюються із тим самим значенням енергії. Ейлер надає своєму принципу точного математичного вираження й строгого обґрунтування для однієї матеріальної точки, що зазнає дії центральних сил. Протягом 1746-1749 рр. Ейлер написав кілька робіт про фігури рівноваги гнучкої нитки, де принцип найменшої дії було застосовано до задач, в яких діють пружні сили.

Таким чином, до 1744 р. механіка збагатилася двома важливими принципами: принципом Даламбера й принципом найменшої дії Мопертюї-Ейлера. Спираючись на ці принципи, Лагранж побудував систему аналітичної механіки.

#### **2.1.5. Аналітична механіка системи матеріальних точок і тіл Лагранжа**

Лагранж (1736–1813) остаточно порвав з геометричними методами Ньютона і з гордістю заявляв, що в його "Аналітичній механіці" практично відсутні будь-які креслення. "Я поставив собі за мету, – пише Лагранж, – звести теорію механіки й методи вирішення пов'язаних з нею задач до загальних формул, простий розвиток яких містить всі рівняння, необхідні для вирішення кожної задачі". Сам Лагранж характеризував свої методи в такий спосіб: вони "не вимагають ні побудов, ні геометричних або механічних міркувань; вони потребують тільки планомірного й одноманітного ходу алгебраїчних операцій. Усі прихильники аналізу (аналізу нескінченно малих) із задоволенням переконуються в тому, що механіка стає новою галуззю аналізу". Ця характеристика означає, що аналітична механіка Лагранжа є галуззю аналізу: вона є механікою, позбавленою "механічних міркувань", тому що в ній зазначено загальні методи складання рівнянь для будь-якої задачі механіки, після чого вирішення стає суто математичною проблемою.

Як було зазначено вище, праця Ейлера – це механіка матеріальної точки й динаміка твердого тіла. Лагранж об'єднав механіку системи матеріальних точок і тіл та створив однаковий і загальний метод зведення механічних задач до вирішення відповідних математичних задач. При цьому він, природно, виходив з певних фізичних та експериментальних положень.

"Механіка" Лагранжа поділяється на дві частини: статика й динаміку. Статика Лагранжа базується на принципі віртуальних (можливих) швидкостей. "Під віртуальною швидкістю потрібно розуміти швидкість, яку тіло, що перебуває в рівновазі, здатне набути в той момент, коли рівновага порушена, тобто ту швидкість, яку б тіло фактично мало в першу мить свого руху". Принцип віртуальних швидкостей Лагранж формулює в такий спосіб: "Якщо яка-небудь система, що складається з будь-якої кількості тіл або точок, на кожному з яких діють будь-які сили, знаходиться в рівновазі, і якщо ця система набуває будь-якого малого руху, у результаті якого кожна точка проходить нескінченно малий шлях, що являє собою її віртуальну швидкість, то сума сил, помножених кожна відповідно на шлях, який проходить у напрямку сили точка, в якій цю силу прикладено, завжди дорівнює нулю, якщо малі шляхи, пройдені в напрямку дії сил, вважати позитивними, а пройдені в протилежному напрямку вважати негативними".

Уводячи цей принцип, Лагранж посилався на дані досвіду. Він указував на загальний закон рівноваги машин: відношення сил обернене до відношення швидкостей точок, до яких вони прикладені, причому швидкості повинні вимірюватися в напрямку дії сил. Це положення, узятє в загальному вигляді, і є принципом віртуальних швидкостей, який "можна розглядати як своєрідну аксіому механіки. Утім, Лагранж навів і два докази принципу віртуальних швидкостей, один з яких заснований на "принципі блоків".

У динаміці Лагранж спирається на два закони: закон інерції і закон додавання рухів (за правилом паралелограма). Другий закон механіки Ньютона Лагранж виводить із цих двох законів.

Аналітична динаміка Лагранжа ґрунтується на загальній формулі, яку в наш час називають рівнянням Даламбера – Лагранжа, або загальним рівнянням динаміки. "Розвиток цієї формули, якщо при цьому взяти до уваги умови, які залежать від природи системи, дає всі рівняння, необхідні для визначення руху кожного тіла, після цього потрібно ці рівняння тільки інтегрувати, що є вже завданням аналізу".

Спираючись на своє загальне рівняння динаміки, Лагранж вивів диференціальні рівняння руху у двох виглядах, що відповідають двом видам рівнянь статички. Це відомі рівняння руху Лагранжа першого й другого роду. Рівняння руху другого роду можна скласти, знаючи загальне вираження тільки для двох величин: кінетичної енергії системи і її потенційної енергії. Кількість цих рівнянь мінімальна, вона дорівнює числу ступенів свободи системи. Разом із тим рівняння Лагранжа є дуже загальними; їх можна використовувати для різних фізичних систем, якщо стан таких систем можна описати за допомогою значень їх кінетичної і потенційної енергій. Крім того, рівняння руху у формі Лагранжа другого роду мають визначену структуру з математичної точки зору. Тому завдання їх вирішення (інтегрування) у загальному вигляді є досить визначеним, щоб досліджувати його суто математично.

У перші роки своєї наукової діяльності у зв'язку з роботами, пов'язаними з варіаційним численням, Лагранж багато уваги приділяв принципу найменшої дії. Він формулює цей принцип з повною визначеністю як суто механічну теорему, справедливую за певних умов. Це формулювання приводить до вже знайомого запису:

перетворюється на нуль варіація суми величин виду

$$m \cdot \int V \cdot dS,$$

де  $m$  - маса однієї з точок системи,

$V$  – її швидкість,

$dS$  – елемент шляху, чи, інакше кажучи, нескінченно малий відрізок траєкторії точки  $m$ .

До цього Лагранж додає, що  $dS = V \cdot dt$ , тому замість  $m \cdot \int V \cdot dS$ , можна написати  $\int m \cdot V^2 \cdot dS$  чи тут під знаком інтеграла ми бачимо (подвоєну) живу силу точки, а так як нам потрібно взяти суму таких величин для всієї механічної системи, яка розглядається, то в підсумку під знаком інтеграла виявиться (подвоєна) жива сила всієї системи в будь-який момент. Таким чином, вважає Лагранж, розглянутий принцип зводиться, власне, до того, що сума живих сил усіх тіл від моменту, коли вони виходять із заданих точок, до того моменту, коли вони приходять в інші задані точки, є максимумом або мінімумом. Отже, цей принцип можна було б з повним правом назвати принципом найбільшої чи найменшої живої сили. На думку Лагранжа, таке формулювання мало б ту перевагу, що воно було б загальним як для руху, так і для рівноваги.

Ірландський математик, механік та астроном У. Р. Гамільтон, оцінюючи внесок, зроблений Лагранжем у розвиток механіки після Галілея і Ньютона, писав: "З усіх послідовників цих блискучих учених Лагранж, мабуть, більше, ніж який-небудь інший аналітик, зробив для того, щоб розширити й надати струнності подібним до дедуктивних дослідженням, довівши, що найрізноманітніші наслідки, що стосуються руху системи тіл, можна вивести з однієї основної формули. При цьому краса методу настільки відповідає достоїнству результату, що ця велика робота перетворюється на своєрідну математичну поему". Цією поемою завершився плідний період розробки основ теоретичної механіки. Механіка стає зрілою, цілком сформованою галуззю природознавства.

#### **2.1.6. Розвиток аналітичної механіки. "Механіка без сили" Герца**

У XVII ст. у працях Галілея і Ньютона було закладено принципові основи класичної механіки. У XVIII і XIX ст. Ейлер, Даламбер, Лагранж, Гамільтон, Якобі, Остроградський, спираючись на ці основи, побудували чудову споруду аналітичної механіки й розробили її могутні математичні методи. Здавалося, що механіка – цей "рай математичних наук", як назвав її Леонардо да Вінчі, – досягла високого ступеня досконалості і своєї завершеності. Але завершеність ця була лише видимою, тому що навіть в основних поняттях і законах механіки були помітними численні труднощі, які вдалося тільки тимчасово відсунути, але аж ніяк не подолати у ході могутнього прогресу аналітичної механіки.

Ще до корінного перегляду фізичного змісту основних принципів класичної механіки, пов'язаного із теорією відносності й квантовою теорією, з'явився ряд робіт, які намагалися по-новому осмислити старі принципи. Ці спроби були пов'язані насамперед із тим, що поряд з фізикою дискретних тіл виникла фізика континууму поля, яка потребувала критичного перегляду класичної механіки. Такою спробою була, зокрема, книга Генріха Герца (1857–1894) "Принципи механіки, викладені в новому зв'язку", що відіграла важливу роль не тільки в розвитку класичної механіки, але й в історичній підготовці теорії відносності Ейнштейна.

Граничним поняттям Ньютонової механіки була сила, що діє на дане тіло. Вона була граничним поняттям тому, що питання про її походження виходило за

межі механіки. Поняття потенційного поля ще не означало переходу до інших граничних понять, але наближало такий перехід.

Механіку Герца часто називають "механікою без сили". Хоч Герц і ввів поняття сили, однак воно не є основним, вихідним поняттям його механіки. У цьому полягає насамперед основна відмінність механіки Герца від звичайного її викладу. Складність поняття сили в класичній механіці, абсолютизація її багатьма крайніми послідовниками Ньютона й приваблива можливість пояснити силу рухом якихось (хоча б і прихованих) мас привели багатьох фізиків другої половини XIX ст. до спроби переглянути зміст і місце поняття сили в системі механіки.

Шлях до виключення поняття сили підказує вже сама механіка Галілея-Ньютона. Поруч із власне силами, що є причиною зміни стану руху, ця механіка ввела інший вид сил, що обмежують ступінь свободи руху останніх. Напрямок сил визначається чисто геометричними умовами, а їх величина залишається, чесно кажучи, невідомою.

Елементарна механіка у звичайному викладі плутає ці два види сил, розглядаючи сили умов як власне сили, величина яких спочатку невідома. Вона зводить, таким чином, сили обмеження руху до власне сил. Однак уже в аналітичній механіці розрізнення цих сил виступає дуже різко, набагато різкіше, ніж в елементарній механіці. У рівняннях аналітичної механіки сили умов руху мають зовсім інший вигляд, ніж власне сили, які визначені тільки геометричними умовами руху.

Герц поставив перед собою задачу, зворотну тій, котру так чи інакше вирішує елементарна механіка: чи не можна всі власне сили звести до сил обмеження руху? Можливо, що взагалі всі зміни швидкості, які спостерігаються, котрі начебто є непотрібними з погляду геометричних зв'язків, зумовлені насправді не силами, а саме якимись, можливо, ще не дослідженими, геометричними зв'язками<sup>1</sup>. Сама сила є лише спосіб опису цих зв'язків, що застосовується при відомих допущеннях, але аж ніяк що не є чимось необхідним для однозначного й зрозумілого наукового пізнання світу. Поняття про силу як про причину уповільнення або прискорення в механіці Герца зникає назавжди. Сила, з погляду Герца, є тільки мірою перенесення або взаємоперетворення руху між "напрямую пов'язаними" системами. Загадкова потенційна енергія консервативних систем звичайної механіки виявляється звичайною кінетичною енергією прихованих матеріальних систем. В основі дій, що спостерігаються між віддаленими тілами (наприклад, планетами) лежить матеріальний процес, що протікає в прихованих матеріальних системах, що пов'язують звичайні системи або системи, "що спостерігаються".

Механіка Герца являє собою найвищою мірою зрозумілу, математично обґрунтовану картину механіки. Єдиним недоліком цієї картини є (згідно з А. Т. Григор'яном) її ілюзорність. Герц довів лише, що приховані або адіабатично-циклічні системи, які доповнюють звичайну систему до вільної, мають усі властивості звичайних консервативних систем. Але звідси ще не випливає, що реальні консервативні системи є такими, якими їх зображує механіка Герца.

Носієм прихованих циклічних систем, на думку Герца, є світовий ефір, але так як прихованим системам Герц приписує загальноприйняті властивості механічних рухів, то ефір у механіці Герца має характер суто механічної системи; частинкам ефіру приписуються властивості звичайної інертної матерії, звичайні механічні рухи й кінетична енергія, рухи частинок ефіру підпорядковуються законам класичної механіки й т.д. Механічна теорія ефіру, на якій базується система Герца, виявилася

неспроможною. Головний недолік механіки Герца не в її конкретних механічних конструкціях, а в універсалізації розвинутої ним інтерпретації сил.

Однак у деяких важливих ідеях теорії відносності й механіки Герца є багато спільного. У теорії відносності рух планет навколо Сонця пояснюється без залучення діючих сил за допомогою уявлення про інерцію як про фундаментальну властивість тіл. Планети рухаються аналогічно тілам у механіці Герца по найкоротших лініях у рімановому просторі. У цьому розумінні відмінність теорії відносності від механіки Герца полягає в тому, що в першій матеріальні тіла, що рухаються, визначають метрику простору – часу, його геометрію, у той час як у Герца такий рух визначають кінематичні умови, які створюються завдяки прихованим масам системи. Незважаючи на значну історичну обмеженість, пов'язану з механічною картиною світу, механіка Герца відіграла значну роль у розвитку однієї з основних проблем фізики – проблеми просторово-часової форми руху матерії.

### 2.1.7. Основи класичної механіки

Механіка вивчає рух одних тіл щодо інших. Для спрощення вивчення характеру руху тіл розглядають поступальний і обертальний рух, як окремі види руху, а складні рухи є їхньою суперпозицією. Поступальним називається рух, при якому всі точки тіла мають однакові траєкторії. Основою механіки поступального руху є три основних закони – закони Ньютона.

**Перший закон Ньютона** визначає умови спокою або руху з постійною за модулем і напрямком швидкістю: усяке тіло перебуває у стані спокою або рівномірного прямолінійного руху, доки вплив на нього з боку інших тіл не виведе його з цього стану:

$$\vec{v} = \text{const}, \vec{a} = 0, \text{ якщо } \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = 0,$$

де  $\sum_{i=1}^n \vec{F}_i$  – рівнодіюча всіх сил, що діють на тіло. Зміст першого закону полягає в існуванні інерціальних систем відліку, тобто систем, для яких I закон Ньютона є справедливим.

З великим ступенем точності можна вважати інерціальною геліоцентричну систему відліку.

**Другий закон Ньютона** – закон руху, який вказує на умови зміни швидкості тіла. Другий закон пов'язаний з поняттям маси і сили. Масою ( $m$ ) прийнято називати кількісну характеристику властивості інертності тіла, тобто властивість тіла зберігати свій стан руху. Стан руху тіла в даний момент часу можна цілком охарактеризувати за допомогою добутку  $\vec{p} = m\vec{v}$ , що одержав назву імпульсу. Сила  $\vec{F}$  – це кількісна міра ступеня впливу одного тіла на інше. Сила є векторною величиною, тобто характеризується модулем, спрямованим у просторі і точкою прикладення.

За II законом Ньютона стверджується, що швидкість зміни імпульсу в часі дорівнює рівнодіючій сил, які діють на тіло:

$$\sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \frac{d\vec{p}}{dt}.$$

При  $m = \text{const}$  одержимо відомий зі школи вигляд формули II закону Ньютона:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d(m\vec{v})}{dt} = m \frac{d\vec{v}}{dt} = m\vec{a}.$$



**Третій закон Ньютона** – закон взаємодії. Два тіла взаємодіють із силами, рівними за модулем та протилежними за напрямком:

$$\vec{F}_{21} = \vec{F}_{12}.$$

З третього закону Ньютона випливає, що сили діють попарно.

### **Обертальний рух**

При розгляді обертального руху обмежимося системою, взаємне розміщення частинок якої не змінюється. Така система називається твердим тілом. Обертальним рухом твердого тіла називається такий рух, при якому всі точки тіла рухаються по колах, центри яких розміщені на одній прямій, яка називається віссю обертання.

Швидкість обертання  $\omega$  визначається кутом  $\varphi$ , на який повертається тіло за одиницю часу:

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}.$$

Між кутовою і лінійною швидкостями існує зв'язок, який легко установити для випадку руху точки по колу з радіусом  $R$ . Відповідно до визначення радіальної міри  $S = R \cdot \varphi$ , тоді, продиференціювавши обидві частини цієї рівності за часом, одержимо

$$v = R \cdot \omega.$$

Обертальний рух характеризують частотою  $n$  і періодом обертання  $T$ . Частота – це кількість обертів за одиницю часу:

$$n = \frac{N}{T},$$

$$[n] = \text{с}^{-1} = 1 \text{ Гц}.$$

Період обертання – це час одного повного оберту:

$$T = \frac{t}{N} = \frac{1}{n},$$

$$[T] = 1 \text{ с}.$$

Поняття кутового прискорення вводиться за аналогією з лінійним:

$$\varepsilon = \frac{d\omega}{dt} = \frac{d^2\varphi}{dt^2}.$$

Характер обертального руху залежить як від сили, так і від її напрямку та точки прикладення до твердого тіла. Обертальний аналог сили називається моментом сили  $\vec{M}$  і вводиться як векторний добуток радіуса-вектора  $\vec{r}$  і сили  $\vec{F}$ :

$$\vec{M} = \vec{r} \times \vec{F}$$

чи в скалярній формі

$$M = rF \cdot \sin\alpha = Fl,$$

де  $l = r \cdot \sin\alpha$  є плечем сили щодо точки  $O$ .

В обертальному русі аналогом імпульсу є момент імпульсу  $\vec{L}$ . Згідно з визначенням:

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}, \quad \frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}.$$

Даний вираз є обертальним аналогом II закону Ньютона і називається основним законом обертального руху, тобто результируючий момент сил, що діють на тіло, дорівнює швидкості зміни моменту імпульсу.

Та обставина, що в обертальному русі маса тіла не зосереджена в одній точці, а розподілена відповідно до геометричних параметрів твердого тіла, вимагає введення обертального аналога маси – моменту інерції тіла  $I$  сил відносно до будь-

якої осі:

$$I = \int r^2 dm.$$

З використанням виразу, момент імпульсу набуде вигляду:

$$\vec{L} = I\vec{\omega}.$$

і основний закон динаміки обертального руху

$$\vec{M} = I\vec{\varepsilon}.$$

### **2.1.8. Виникнення й розвиток електродинаміки**

Коли в грудні 1801 р. Алессандро Вольта вперше демонстрував на урочистих зборах Французького інституту джерело електричного струму, яке він винайшов, ні сам доповідач, ні присутні при цьому найвідоміші французькі вчені навіть не підозрювали, що головним напрямком подальших досліджень у цій галузі стане електромагнетизм. Утім, цей новий напрямок виявив себе лише через двадцять років тому в потоці надзвичайних нових відкриттів, які ще через півстоліття спричинили могутній технічний переворот.

#### **Перетворення електрики на магнетизм**

Перші важливі кроки в цьому напрямку зробив датський фізик Х. К. Ерстед (1777-1851). Перебуваючи під впливом ідей Шеллінга про єдність "усіх сил природи", Ерстед вважав, що повинен існувати зв'язок між електричними й магнітними явищами. Цей зв'язок йому вдалося продемонструвати в 1820 р. у дослідах, які підтвердили вплив електричного струму на магнітну стрілку. Досліди справили на сучасників сильне враження; їх негайно повторили в Німеччині, Швейцарії, Франції.

У тому ж 1820 р. французький фізик А. Ампер (1775-1836) виступив з повідомленням про нове явище – взаємодію двох провідників, по яких тече струм. У цьому ж повідомленні Ампер уперше висловив думку про електричну природу магнетизму. Протягом дуже короткого часу він виконав ряд важливих досліджень, які блискуче підтвердили його думку. Усі отримані результати Ампер систематизував у книзі "Теорія електродинамічних явищ, виведена винятково з досліду", опублікованій у 1826 р. Відтепер з магнітними рідинами було покінчено, тепер у них не було необхідності. Магнітні явища, як виявилось, обумовлені електричними струмами. Магніт потрібно було розглядати, виходячи із сукупності кругових електричних струмів, площини яких перпендикулярні до прямої, проведеної через полюси магніту. Спіраль зі струмом (соленоїд) уподібнювалася магніту. З повним правом Ампер міг заявити: "Таким чином, усі магнітні явища я звів до чисто електричних дій". Розробляючи основи електродинаміки нового напрямку, який об'єднав електрику й магнетизм, учений запропонував вираз для сили, з якою взаємодіють два елементи струму; цей вираз є в усіх сучасних підручниках з електродинаміки. Зокрема, він звернув увагу на те, що електродинамічні сили, на відміну від відомих на той час гравітаційних та електростатичних, не є центральними.

#### **Перетворення магнетизму на електрику**

У 20-х роках XIX ст. проблемами електромагнетизму зацікавився геніальний англійський учений-самоук М. Фарадей (1791-1867). Ерстед та Ампер перетворили електрику на магнетизм; Фарадей поставив перед собою завдання – перетворити магнетизм на електрику. З 1831 р. він почав систематичну публікацію своїх досліджень, у результаті чого виникла багатотомна праця під загальною назвою

"Експериментальні дослідження з електрики". У першій серії цієї праці (1831) описані знамениті досліди Фарадея, які привели до відкриття явища електромагнітної індукції. Фарадей довів, що зміна магнітного потоку в часі породжує електрорушійну силу індукції, і, отже, приводить до виникнення електричного струму в замкнутому контурі. Напрямок цього струму визначається правилом, яке встановив молодий професор Петербурзького університету Е. Х. Ленц (1804-1865).

У другій серії своїх "Експериментальних досліджень" (1832) Фарадей продовжує вивчення електродинамічної індукції. У третій серії (1833) він довів, що різноманітність видів електрики є удаваною. Вивчаючи дії, виконані звичайною, вольтовою, "тваринною", термічною, магнітною електрикою, він дійшов висновку: "Усі види електрики ідентичні за своєю природою". Правда, сама ця природа не була ще зрозумілою на той час. Фарадей обережно зауважив з цього приводу: "Під струмом я маю на увазі щось таке, що рухається поступально – усе одно, що при цьому перебуває в русі: електрична рідина чи дві рідини, які рухаються в протилежних напрямках".

П'ята серія присвячена електролізу. Тут, а також у наступних трьох серіях Фарадей досліджує "хімічні дії" електричного струму. Усього вийшло двадцять серій. У дев'ятнадцятій серії розглядається відкрите Фарадеем явище обертання площини поляризації світла в намагніченому середовищі. "Таким чином, – зробив висновок учений, – уперше, на мою думку, встановлено справжній безпосередній зв'язок і залежність між світлом і магнітними й електричними силами і тим самим зроблено велике доповнення до фактів і міркувань, що служать для доведення того, що всі природні сили пов'язані між собою і мають єдине спільне походження".

#### **2.1.9. Ідея поля**

##### **Фізичне поле Фарадея**

Фарадей відмовився від ньютонівської концепції дальньої дії; він увів у фізику зовсім новий об'єкт – фізичне поле. Відповідно до нової концепції вплив одного струму на інший пояснюється тим, що перший струм створює навколо себе в просторі магнітне поле, а це поле діє на другий струм, що знаходиться в ньому. Аналогічно: другий струм створює своє магнітне поле, яке діє на перший струм. Із цього приводу Д. К. Максвелл писав Фарадею (1857): "Тепер, наскільки мені відомо, Ви є першою людиною, в якій виникла ідея про те, що тіла діють одне на одне на відстані за допомогою приведення навколишнього середовища в стан напруги, ідея, в яку справді варто повірити. У нас були колись потоки гачечків, що літають навколо магнітів, і навіть картинки, на яких зображено оточені ними магніти; але немає нічого більш зрозумілого, ніж Ваш опис. Мені здається, що Ви чітко бачите, як силові лінії огинають перешкоди, женуть сплески напруги в провідниках, повертають уздовж визначених напрямків у кристалах і несуть із собою все ту ж саму кількість здатності до притягання, розподілену розрідженіше чи густіше в залежності від того, розширюються ці лінії чи згущуються".

Властивості самого поля є істотними для опису явища. Відмінності між джерелами поля не є принциповим питанням. Значення поняття поля виявляється в тому, що воно приводить до нових експериментальних фактів. Поле виявилось дуже корисним поняттям. Воно виникло як щось таке, що перебуває між джерелом і магнітною голкою для того, щоб описати діючу силу. Його сприймали як "агента" струму, через який виконувалися всі його дії. Але агент діє і як перекладач, котрий перекладає закони на просту, зрозумілу мову.

Перший успіх опису за допомогою поля показав, що воно може бути зручним для вивчення всіх дій струмів, магнітів і зарядів. Поле можна розглядати як щось, що завжди пов'язане зі струмом. Воно існує, навіть якщо відсутній магнітний полюс, за допомогою якого можна встановити його існування. Якщо електричний заряд і магнітний полюс перебувають у стані спокою, то між ними немає ніякої взаємної дії: ні притягання, ні відштовхування. Виражаючи подібний факт мовою поля, ми можемо стверджувати: електростатичне поле не впливає на магнітостатичне й навпаки. Поняття "статичне поле" означає, що мова йде про поле, яке не змінюється в часі. Магніти й заряди могли б вічно залишатися поруч, якби ніяка зовнішня сила не порушувала їхнього стану. Електростатичні, магнітостатичні й гравітаційні поля мають різний характер. Вони не змішуються: кожне зберігає свою індивідуальність незалежно від інших.

### **Дві основи теорії поля**

Перша основа теорії електричного й магнітного поля це зв'язок між електричним полем, що змінюється, і магнітним полем. Друга пов'язує магнітне поле, що змінюється, з індукційним струмом і ґрунтується на досліді Фарадея. Обидві вони лежать в основі кількісного опису поля.

Необхідно згадати ще про один наслідок теорії поля. Нехай ми маємо контур, по якому тече струм, джерелом якого є, наприклад, батарея Вольта. Раптово зв'язок між провідником і джерелом струму розривається. Тепер, звичайно, ніякого струму немає. Але в момент цього короткого розриву спостерігається складний процес, який знову-таки можна було б передбачити за допомогою теорії поля. Перед розривом потоку струму навколо провідника існувало магнітне поле. Воно перестало існувати в момент, коли потік струму перервався. Отже, через розрив потоку струму магнітне поле зникло. Кількість силових ліній, що проходять через поверхню, оточену контуром, дуже швидко змінилася. Але така швидка зміна, як би вона не відбувалася, повинна спричинити виникнення індукційного струму. Що дійсно має значення, – так це зміна магнітного поля, яка збуджує індукційний струм, сила якого тим більша, чим значнішою була зміна поля. Розрив потоку струму повинен супроводжуватися виникненням сильного короточасного індукційного струму – при цьому спостерігається іскра. Ця іскра вказує на величезну різницю потенціалів, викликану швидкою зміною магнітного поля.

Той же самий процес можна розглядати з іншого погляду, з погляду енергії. Магнітне поле зникло, але з'явилася іскра. Іскра має деяку енергію, тому і магнітне поле повинно мати енергію. Щоб послідовно застосовувати поняття поля і його мову, ми повинні сприймати магнітне поле як запас енергії. Тільки на цьому шляху ми зможемо описати магнітні й електричні явища згідно із законом збереження енергії. Приписування полю енергії є подальшим кроком у розвитку, у якому поняття поля стає все більш істотним, а субстанціональні концепції, властиві механістичній точці зору, усе більше відходять на задній план.

### **2.1.10. Теорія електромагнітного поля Максвелла**

#### **Основні передумови**

Уявлення Фарадея про поле дуже зацікавили Д. К. Максвелла (1831-1879). Він не тільки розвинув їх, але й надав їм математичної форми – так з'явилися знамениті рівняння Максвелла.

Максвелл, який на відміну від математиків континенту, котрі вважали Фарадея простакуватим експериментатором, поставився до його праць як до джерела премудрості з електрики, почав свої дослідження в цій галузі зі спроби

подати ідеї Фарадея в математичній формі, іншими словами, зі спроби описати чіткою мовою, зрозумілою для математиків, те, що, як він вважав, відкрив Фарадей. "З мого викладу, сподіваюся, зрозуміло, що я не ставлю собі за мету встановити яку-небудь фізичну теорію в тій галузі науки, в якій я не зробив майже жодного досліду, а маю намір тільки показати, яким чином завдяки безпосередньому застосуванню ідей і методів Фарадея до руху уявної рідини можна наочно пояснити все, що стосується цього руху, а звідси одержати теорію притягання електричних і магнітних тіл і провідності електричних струмів".

Теорія електрики й магнетизму, відкрита Фарадеєм у 1830 р., ґрунтувалася на таких положеннях:

1. Електричні заряди спричиняють сили, що діють між цими зарядами і й описуються законом Кулона або електричними полями.
2. Провідники, що несуть струми, спричиняють сили, що діють між цими провідниками і й описуються законом Ампера або магнітними полями.
3. Магнітні заряди не існують.
4. Змінні магнітні поля збуджують електричні поля – закон Фарадея.
5. Електричний заряд зберігається: повний заряд у будь-якій частині простору залишається незмінним, якщо в цю частину не входять (і з неї не виходять) інші заряди.

Максвелл, який першим записав рівняння електрики й магнетизму, зауважив, розглядаючи зазначені вище твердження як постулати, що вони внутрішньо суперечливі, незважаючи на те, що всі твердження про електрику й магнетизм були ретельно відібрані в результаті експериментальних спостережень. Чому ж тоді вони суперечать один одному і як їх можна змінити? Будь-яке спостереження, експериментальне чи яке-небудь інше, торкається лише частини того, що є доступним з досліду. Записані ж рівняння або правила набувають універсальності, що виходить за межі цієї "ділянки" досліду. В неочевидній формі вони містять у собі твердження ще й про дослід, який не перевірений, і про явища, що не спостерігалися. Якщо ж ми хочемо змінити свої постулати, не вступаючи при цьому в суперечність з дослідом, то повинні це зробити так, щоб ті висновки, що описують явища, які вже спостерігалися, залишилися незмінними; ті ж висновки з постулатів, що описують нові явища, можуть після модифікації постулатів змінитися.

Максвелл відшукав суперечність серед постулатів електромагнетизму в законі Ампера. Якщо цей закон, записаний у відомій тоді формі, справедливий, він суперечить закону збереження заряду. Відповідно до цього закону, магнітні поля збуджуються тільки струмами, що, чесно кажучи, при правильному формулюванні може видатися досить дивним. Так як електричні поля збуджуються як зарядами, так і (відповідно до закону Фарадея) змінними магнітними полями. Якщо дбати до симетрії, то можна було б припустити, що й магнітні поля збуджуються не тільки струмами, але й змінними електричними полями. Саме це уточнення до закону Ампера дозволило Максвеллові усунути суперечність щодо закону збереження електрики.

### **Струм зміщення**

Спостерігаючи перезарядження двох куль, з'єднаних провідником, Максвелл виразно побачив, що даний випадок істотно відрізняється від тих явищ, з якими мав справу Ампер у своїй лабораторії. Ампер вимірював силу, з якою діє один провідник на інший, коли по них протікають постійні струми. У розглянутому прикладі струм не буде постійним. Заряд буде перетікати від однієї кулі до іншої, а потім назад, і

його рух нагадуватиме рух маятника, який здійснює коливальні рухи. Максвелл зрозумів, що закон Ампера справджується для замкнутих струмів, і порушив питання про те, що відбуватиметься, якщо струм буде незамкнутим. Описуючи так званий "електротонічний стан" Фарадея, Максвелл використовує рівняння нерозривності для замкнутих струмів і пише: "Тому наше дослідження обмежується поки що замкнутими струмами, і ми мало знаємо про дію незамкнутих струмів, що мають здатність до намагнічування".

У наш час ми могли б упевнено стверджувати, з'ясувавши протиріччя у вихідних постулатах теорії, що закон Ампера справджується тільки стосовно постійних і замкнутих струмів. Максвелл припустив, що в закон Ампера потрібно додати ще один член, що відіграє істотну роль, лише коли струми змінюються дуже швидко. Цей член, який Максвелл назвав струмом зміщення і який зникає за тих умов, при яких Ампер проводив свої вимірювання, усуває протиріччя між законом Ампера й законом збереження заряду, надаючи рівнянню електрики й магнетизму симетричного вигляду, тому що цей член описує виникнення магнітного поля під дією змінного електричного поля.

Максвеллівська модифікація закону Ампера привела до того, що рівняння електромагнетизму стали несуперечливими й симетричними: із закону Фарадея випливає, що змінне магнітне поле породжує електричне поле, а тепер, після введення Максвеллом струму зміщення, можна стверджувати, що і змінне електричне поле збуджує магнітне поле.

З різних чисто технічних причин ефекти струму зміщення дуже важко спостерігати, поки швидкість зміни полів не стає дуже великою; знадобилося 20 років, перш ніж Герцу, уже після смерті Максвелла, вдалося одержати перше експериментальне підтвердження теорії Максвелла.

Роботи Максвелла дали можливість сформулювати рівняння для електричних і магнітних полів у вигляді, еквівалентному таким шести твердженням:

1. Електричне поле, що відповідає якому-небудь розподілу зарядів, визначається за законом Кулона.
2. Магнітні заряди не існують.
3. Закон Фарадея: змінне магнітне поле збуджує електричне поле.
4. Закон Ампера: струми й змінні електричні поля збуджують магнітне поле.
5. Заряд зберігається.
6. Електричне й магнітне поля діють на заряди із силою, яка визначається за формулою Лоренца.

### **Реальність поля**

Кількісне, математичне формулювання законів поля знаходимо в так званих рівняннях Максвелла. їх проста форма приховує глибину й багатий зміст, які стають зрозумілими тільки при ретельному вивченні. Формулювання цих рівнянь є найважливішою подією з часів Ньютона не тільки з погляду цінності їхнього змісту, але й тому, що вони є зразком нового типу законів. Характерну рису рівнянь Максвелла, що виявляється й у всіх інших рівняннях сучасної фізики, можна висловити одним реченням: рівняння Максвелла виражають закони структури поля.

До рівнянь Максвелла приводять два істотних кроки. Перший крок: у розглянутих дослідах Ерстеда колові лінії магнітного поля, що замикаються навколо струму, повинні сходитися в точці; у досвіді Фарадея – колові лінії електричного поля, що замикаються навколо змінного магнітного поля, теж повинні сходитися в точку. Стягування силових ліній електричних і магнітних полів у точку дає

можливість виражати структуру поля диференціальними рівняннями в частинних похідних.

Другий крок полягає в трактуванні поля як чогось реального. Створене один раз електромагнітне поле існує, діє і змінюється відповідно до законів Максвелла. Рівняння Максвелла описують структуру електромагнітного поля. Аrenoю дії цих законів є весь простір, а не одні тільки точки, в яких знаходяться речовина або заряди, як це справедливо для механічних законів.

У механіці, знаючи положення й швидкість частинок у початковий момент часу, знаючи діючі сили, можна передбачати всю траєкторію, яку частинка опише в майбутньому. У теорії Максвелла, якщо тільки ми знаємо поле в який-небудь момент часу, ми можемо вивести з рівнянь, установлених цією теорією, як буде змінюватися все поле в просторі і в часі. Рівняння Максвелла дозволяють нам прямувати за історією поля так само, як-рівняння механіки дозволяють прямувати за історією матеріальних частинок.

За допомогою законів Ньютона ми можемо обчислити рух Землі, знаючи силу, що діє між Сонцем і Землею. Ці закони пов'язують рух Землі з дією віддаленого Сонця. І Земля, і Сонце, хоч і віддалені одне від одного, обоє беруть участь у грі сил.

У теорії Максвелла немає речовинних учасників дії. Математичні рівняння цієї теорії виражають закони, що керують електромагнітним полем. Вони не пов'язують, як це було в законах Ньютона, дві широко розділені події, вони не пов'язують подію тут з умовами там. Поле тут і тепер залежить від поля безпосередньо по сусідству в момент, що тільки що минув. Рівняння дозволяють нам передбачати, що відбудеться трохи далі в просторі й трохи пізніше в часі, якщо ми знаємо, що відбувається тут і тепер. Вони дозволяють нам поглиблювати наші знання про поле малими кроками. Ми можемо вивести те, що відбувається тут, з того, що відбувається далеко, шляхом додавання цих дуже малих кроків. У теорії ж Ньютона, навпаки, припустимі тільки великі кроки, що пов'язують віддалені події. Тому електродинаміку Максвелла слід вважати першою послідовною теорією близької дії, тому що вона виводить із принципу близької дії інші кількісні співвідношення, відмінні від тих, до яких приводить принцип дальньої дії. Відповідно, реальність поля можна довести експериментально. В основі лежить "чотиривимірний" характер близької дії. Близькодія тут означає, що дія поля на матеріальну точку (точковий заряд) визначається не миттєвим розміщенням зарядів, а станом поля в просторовій точці в той момент, коли в ній знаходиться цей заряд. Близькодія означає також, що заряд передає свою енергію або імпульс не іншим зарядам, а полю. Відповідно енергія й імпульс є предикатами поля. Таким чином, у фізиці перемогла ідея близькодії, причому не в картезіанській, а в зовсім іншій формі. Картезіанська близькодія через абсолютно твердий стрижень – це тривимірна близькодія, що передається миттєво, еквівалентна дальнодії, якщо говорити про рівняння поля. Близькодія в класичній електродинаміці – це чотиривимірна близькодія, нееквівалентна дальнодії, тому що вона пов'язана зі скінченною швидкістю поширення деформацій поля. Чотиривимірний характер близькодії безпосередньо впливає з рівнянь Максвелла, з механізму електромагнітних коливань, зі змісту електромагнітної теорії світла. Тут не йдеться про який-небудь безпосередній зв'язок між віддаленими точками, уявлення про електромагнітні хвилі є чисто диференціальним, виникнення електричного поля при зміні магнітного й виникнення магнітного при зміні електричного виражаються диференціальними

рівняннями, що пов'язують вихори полів, і поширюються від точки до точки. Але вони – це впливає з рівнянь Максвелла – протікають і від миттєвості до миттєвості. Виникнення магнітного поля залежить від похідної електричного поля за часом, тобто від швидкості його зміни в часі. І навпаки, виникнення електричного поля залежить від зміни в часі магнітного поля.

Вивчення рівнянь Максвелла в математичному аспекті показує, що з них можна зробити нові й по-справжньому несподівані висновки, а всю теорію можна випробувати на набагато більш високому рівні, тому що теоретичні наслідки тепер мають кількісний характер і обґрунтовуються завдяки всьому ланцюгу логічних аргументів. За допомогою математичного висновку з рівнянь Максвелла ми можемо встановити характер поля, яке оточує заряд, що зазнає коливальних рухів, його структуру поблизу й удалині від джерела і його зміну в часі. Результатом такого висновку є уявлення про електромагнітну хвилю. Від коливного заряду випромінюється енергія, що поширюється в просторі з певною швидкістю; але передавання енергії, зміна стану є властивістю всіх хвильових процесів. У випадку електромагнітної хвилі поширюються зміни електромагнітного поля. Усяка зміна електричного поля створює магнітне поле; усяка зміна цього магнітного поля створює електричне поле... і так далі. Так як поле несе енергію, усі ці зміни, що поширюються в просторі з певною швидкістю, утворюють хвилю. Електричні й магнітні силові лінії завжди лежать, як це випливає з теорії, у площині, перпендикулярній до напрямку поширення хвилі. Хвиля, що утворюється, є, отже, поперечною. Електромагнітна хвиля поширюється в порожньому просторі. Такий висновок цієї теорії. Якщо коливний заряд перестає рухатися, то його поле стає електростатичним. Але серія хвиль, створених коливанням заряду, продовжує поширюватися. Хвилям властиве незалежне існування, і історію їх змін можна простежити так само, як історію будь-якого іншого матеріального об'єкта. Спираючись на деякі дані, отримані з простих дослідів, які не мають нічого спільного із справжнім поширенням хвиль, теорія Максвелла показує, що швидкість електромагнітних хвиль дорівнює швидкості світла. Теоретичне відкриття електромагнітної хвилі, яка поширюється зі швидкістю світла, є одним з найбільших досягнень в історії науки й таїть у зародку радикальну відмову від механічних концепцій ефіру.

Експеримент підтвердив те, що передбачала теорія. М. Герц уперше довів існування електромагнітних хвиль й експериментально підтвердив, що їх швидкість дорівнює швидкості світла.

### **Поле та ефір**

Старий механістичний погляд намагався звести всі явища природи до сил, що діють між частинками речовини. У своїх ранніх роботах Максвелл також розвивав електромагнітну теорію за допомогою наочних механічних моделей, інтерпретуючи різні електротехнічні явища як напруги, натяги й вихори в пружному середовищі, тобто в деякому флюїді, що заповнює весь простір, – одному з різновидів знаменитого ефіру. Він писав: "Я маю намір тепер розглянути магнітні явища з механічної точки зору й досліджувати, які напруги чи рухи середовища здатні викликати явища, які я спостерігаю".

Але одні тільки вихори існувати не могли, тому що відразу ж виникало запитання: яким чином ці вихори можуть існувати, стикаючись один з одним й одночасно обертаючись в одному напрямку? Щоб вирішити цю проблему, Максвелл увів між вихорами своєрідні "шестірні холостого ходу": "Вихори розділені шаром



частинок так, що кожна обертається навколо власної осі в напрямку, протилежному напрямку вихорів, так що дотичні поверхні частинок і вихорів мають однаковий напрямок руху". Імовірно, це була одна з найбільш складних моделей, коли-небудь запропонованих у науці. Однак пізніше Максвелл пояснив, що його теорія фактично не залежить від якої-небудь механічної інтерпретації. Як пізніше сказав Герц: "Головне в теорії Максвелла – це рівняння Максвелла".

Спочатку поняття поля було не більш, як прийомом, який полегшував розуміння явищ з механічної точки зору. Поле розглядали як щось таке, що згодом можна буде витлумачити механістично за допомогою ефіру. Пізніше стало зрозуміло, що цю програму не можна зреалізувати, що досягнення теорії поля стали вже занадто різючими й важливими, щоб їх можна було замінити механістичними догмами. Визнання нових понять поступово утверджувалося, поки субстанція не була відтісна полем на задній план. Стало зрозуміло, що у фізиці відбулося щось дуже важливе. Було створено нову реальність, нове поняття, для якого не було місця в механістичному описі. Завдання придумування механічної моделі ефіру ставало все менш і менш цікавим, а результат через вимушений і штучний характер припущень усе більш і більш дивним.

Єдиний вихід – це припустити, що простір має фізичну властивість передавати електромагнітні хвилі, і не занадто перейматися через зміст цього твердження. Можна ще вживати слово "ефір", але тільки для того, щоб виразити згадану фізичну властивість простору. Слово "ефір" у процесі розвитку науки змінювало свій зміст багато разів. У даний момент воно вже не вживається для позначення середовища, побудованого з частинок.

## **2.2. Простір і час**

Дослідження в галузі електромагнетизму визначили цілий ряд серйозних технічних винаходів. Уже в першій половині XIX століття було винайдено електричний телеграф. Електродвигун Б.С. Якобі в 1839 р. вже рухав невелике річкове суденце. На зміну хімічним джерелам струму в 60-х роках прийшли електрогенератори. Широко застосовувався створений З. Грамом у 1869 р. генератор самозбудження. У 70-х роках з'явилися електроосвітлювачі: "свічка Яблочкова" (1876), лампа розжарювання Т. Едісона (1879). Починаючи з 80-х років, генератори й електродвигуни постійного струму стали поступово витіснятися генераторами й електродвигунами змінного струму. Дослідження Г. Герца, А. С. Попова і Г. Марконі сповістили про народження радіо.

Одне з головних досягнень природознавства XIX ст. – істотний прогрес у розумінні електричних, магнітних та оптичних явищ. Якщо на початку століття вони розглядалися порізно, то наприкінці століття поєдналися в єдиний комплекс. Перетворення електрики на магнетизм, і навпаки – магнетизму на електрику – означало фактично об'єднання електрики й магнетизму; було створено єдину теорію електричних і магнітних явищ – теорію електромагнітного поля. З'явилося якісно нове фізичне поняття – поле; почала формуватися електромагнітна картина світу, яка повинна була замінити стару механічну картину. Процес інтеграції фізичного знання не обмежився об'єднанням електрики й магнетизму в рамках теорії електромагнітного поля; було встановлено електромагнітну природу світла, що фактично означало включення оптики в електромагнетизм.

Один за одним почали сходити зі сцени різні флюїди. Першим зник світловий флюїд; уже в першій половині XIX ст. теорія "витікання" в оптиці була цілком

витіснена хвильовою оптикою Т. Юнга (1773-1829) та О. Френеля (1788-1827). Спочатку це були світлові хвилі, які поширювалися в деякому ефірі, що має механічну природу; до кінця століття їх замінили електромагнітні хвилі. Дослідження Ампера змусили відмовитися від магнітних флюїдів. Довше від усіх інших зберігалися уявлення про електричні флюїди, але й вони зійшли зі сцени наприкінці століття в результаті відкриття електрона.

Простір і час є загальними формами існування матерії. Вони не існують поза матерією й незалежно від неї.

Просторовими характеристиками є положення тіла щодо інших тіл (координати тіла), відстані між тілами, кути між різними просторовими напрямками (окремі об'єкти характеризуються довжиною і формою, що визначаються відстанями між частинами об'єкта та їх орієнтацією). Часові характеристики – "моменти", коли відбуваються явища, тривалість (час тривання) процесів. Співвідношення між цими просторовими величинами називаються метричними. Із власне просторовими співвідношеннями мають справу лише в тому випадку, коли можна абстрагуватися від властивостей і руху тіл та їхніх частин; із власне часовими – у випадку, коли можна знехтувати різноманітністю співіснуючих об'єктів.

Однак у реальній дійсності просторові й часові співвідношення пов'язані між собою. Їх єдність безпосередньо виявляється в русі матерії; найпростіша форма руху – переміщення – характеризується величинами, що являють собою різні співвідношення між простором і часом (швидкість, прискорення). Усі ці співвідношення і вивчає кінематика. Сучасна фізика виявила більш глибоку єдність простору й часу, що виражається в спільній закономірній зміні просторово-часових характеристик систем залежно від руху останніх, а також у залежності цих характеристик від концентрації мас у навколишньому середовищі.

Поняття простору й часу є необхідними складовими картини світу в цілому, тому становлять предмет філософії. Учення про простір і час поглиблюється й ускладнюється разом з розвитком природознавства і, насамперед, фізики. З інших наук про природу значну роль у прогресі вчення про простір і час відіграла астрономія, особливо космологія.

Просторово-часові співвідношення підпорядковуються не тільки загальним закономірностям, але й специфічним, які властиві об'єктам того чи іншого класу, оскільки ці співвідношення залежать від структури матеріального об'єкта і внутрішньої взаємодії між його складовими. Тому такі характеристики, як розміри об'єкта і його форма, тривалість існування, ритми процесів, типи симетрії є істотними параметрами об'єкта даного типу, що залежать також від умов, в яких він існує. Особливо специфічними є просторові й часові співвідношення в таких складних, здатних до розвитку об'єктах, як організм або суспільство. У цьому випадку можна говорити про індивідуальний простір і час для таких об'єктів (наприклад, про біологічний або соціальний час).

### **2.3. Основні концепції простору й часу**

Найважливіші філософські проблеми, що стосуються простору й часу, – це питання про сутність простору й часу, про взаємозв'язок цих форм буття з матерією, про об'єктивність просторово-часових співвідношень і закономірностей.

Протягом майже всієї історії природознавства й філософії існували дві основні концепції простору й часу. Одна з них сягає корінням учень стародавніх атомістів – Демокріта, Епікура, Лукреція, які обґрунтували поняття порожнього простору й розглядали його як однорідне (однакове у всіх точках) і нескінченне (Епікур, однак,

вважав, що простір не є ізотропним, тобто він неоднаковий у різних напрямках). Поняття часу тоді було розроблене вкрай слабо й розглядалося як суб'єктивне сприйняття дійсності. У Новий час у зв'язку з розробкою основ динаміки концепцію часу й простору розвинув І. Ньютон, очистивши її від антропоморфізму. За Ньютоном, простір і час – суть особливі начала, що існують незалежно від матерії й одне від одного. Простір сам по собі (абсолютний простір) є порожнім "умістилищем тіл", абсолютно нерухомим, безперервним, однорідним та ізотропним, проникним, нескінченним; він не впливає на матерію й не піддається її впливам; має три виміри. Від абсолютного простору Ньютон відрізняв довжину тіл – їх основну властивість, завдяки якій вони займають визначені місця в абсолютному просторі, збігаються з цими місцями. Довжина, за Ньютоном, якщо йдеться про найпростіші частинки (атоми), є початкова, первинна властивість, яка не потребує пояснення. Абсолютний простір унаслідок нерозрізненості своїх частин непізнаваний і такий, який неможливо виміряти. Положення тіл і відстані між ними можна визначати тільки стосовно інших тіл. Іншими словами, наука й практика мають справу тільки з відносним простором. Час у концепції Ньютона сам по собі є чимось абсолютним і ні від чого не залежним, чистою тривалістю як такою, що рівномірно тече від минулого до майбутнього. Він є порожнім "умістилищем подій", що можуть його заповнювати, але можуть і не заповнювати; хід подій не впливає на перебіг часу. Час універсальний, одновимірний, неперервний, нескінченний, однорідний (скрізь однаковий). Від абсолютного часу, який також не можна виміряти, Ньютон відрізняв відносний час. Вимірювання часу здійснюється за допомогою годинника, тобто рухів, які є періодичними. Простір і час у концепції Ньютона незалежні один від одного. Незалежність простору й часу виявляється насамперед у тому, що відстань між двома даними точками простору й проміжок часу між двома подіями зберігають свої значення незалежно один від одного в будь-якій системі відліку, а співвідношення цих величин (швидкості тіл) можуть бути будь-якими.

Ньютон піддав критиці ідею Декарта про заповнений світовий простір, тобто про тотожність протяжної матерії і простору.

Концепція простору й часу, яку розробив Ньютон, була панівною в природознавстві протягом 17–19 століть, тому що відповідала науці того часу – евклідовій геометрії, класичній механіці й класичній теорії тяжіння. Закони ньютонівської механіки справджуються лише для інерційних систем відліку. Ця специфіка інерційних систем пояснюється тим, що рух у них відбувається поступально, рівномірно й прямолінійно саме стосовно абсолютних простору й часу і щонайкраще відповідає останнім.

Згідно з ньютонівською теорією тяжіння, дія від одних частинок речовини до інших передається миттєво через порожній простір, що розділяє їх. Ньютонівська концепція простору й часу, таким чином, повністю відповідала фізичній картині світу тієї епохи, зокрема уявленню про матерію як споконвічно протяжну й незмінну за своєю природою. Істотним протиріччям у концепції Ньютона було те, що абсолютні простір і час залишалися в ній непізнаваними шляхом досліду. Відповідно до принципу відносності класичної механіки, усі інерційні системи відліку є рівноправними, і неможливо виявити, рухається система відносно абсолютних простору й часу чи перебуває в стані спокою. Це протиріччя стало аргументом для прихильників протилежної концепції простору й часу, вихідні положення якої сягають корінням ще часів Арістотеля. Це уявлення про простір і

час сформулював Г. Лейбніц, спираючись частково на деякі ідеї Декарта. Особливість Лейбніцевої концепції простору й часу полягає в тому, що вона заперечує уявлення про простір і час як про самостійні начала буття, які існують поряд з матерією і незалежно від неї. На переконання Лейбніца, простір – це порядок взаємного розташування безлічі тіл, що існують незалежно одне від одного, час – порядок у зміні явищ або станів тіл. При цьому Лейбніц пізніше включав у поняття порядку й поняття відносної величини. Уявлення про протяжність окремого тіла безвідносно до інших, за концепцією Лейбніца, не має змісту. Простір є відношення ("порядок"), яке стосується лише багатьох тіл, "ряду" тіл. Можна говорити тільки про відносні розміри даного тіла порівняно з розмірами інших тіл. Те ж саме можна сказати про тривалість: поняття тривалості застосовне щодо окремого явища постільки, по скільки воно розглядається як ланка в єдиному ланцюгу подій. Протяжність будь-якого об'єкта, за Лейбніцем, не є первинною властивістю, а спричинена силами, що діють усередині об'єкта; внутрішні її зовнішні взаємодії визначають і тривалість стану; що ж стосується самої природи часу як порядку явищ, що змінюють одне одного, то вона відображає причинно-наслідкові зв'язки між ними. Логічно концепція Лейбніца пов'язана з усією його філософською концепцією в цілому.

Однак, Лейбніцева концепція простору й часу не відіграла значної ролі в природознавстві XVII-XIX століть, тому що вона не могла дати відповіді на питання, поставлені наукою тієї епохи. Насамперед, погляди Лейбніца на простір, здавалося, заперечували існування вакууму (тільки після відкриття фізичного поля в XIX столітті проблема вакууму постала в новому світлі); крім того, вони явно суперечили загальному переконанню про одиничність та універсальність евклідової геометрії; нарешті, концепцію Лейбніца вважали непомітною з класичною механікою, оскільки здавалося, що визнання чистої відносності руху не може задовільно пояснити визначальну роль інерційних систем відліку.

Таким чином, у той час, коли жив і творив Лейбніц, природознавство ще не могло сприйняти його концепцією простору й часу, яка базувалася на набагато ширшій філософській основі. Тільки два століття потому почалося нагромадження наукових фактів, які показали обмеженість уявлень про простір і час, що панували в той період.

#### **2.4. Поняття простору й часу у філософії і природознавстві XVIII -XIX століть**

Філософи-матеріалісти XVIII–XIX століть вирішували проблему простору й часу в основному в дусі концепцій Ньютона або Лейбніца, хоч, як правило, повністю не сприймали жодну з двох. Більшість філософів-матеріалістів виступили проти ньютона і всього порожнього простору. Ще Дж. Толанд зауважив, що уявлення про порожній простір пов'язане з поглядом на матерію як на інертну, бездіяльну. Такої ж думки дотримувався і Д. Дідро. Ближче до концепції Лейбніца стояв Г. Гегель. У концепціях суб'єктивних ідеалістів та агностиків проблеми простору й часу зводилися, головним чином, до питання про співвідношення між категоріями простору й часу та свідомістю, сприйняттям. Дж. Берклі відкидав ньютонівський абстрактний простір і час, але розглядав просторові й часові відносини суб'єктивно, як порядок сприйняття; про об'єктивні геометричні й механічні закони не могло бути й мови. Тому беркліанська точка зору не відіграла істотної ролі в розвитку наукових уявлень про простір і час. Інакше було з поглядами І. Канта, який спочатку підтримував концепцію Лейбніца. Суперечність між цими уявленнями й

природничо-науковими поглядами того часу привела Канта до прийняття ньютонівської концепції і прагнення філософськи обґрунтувати її. Головним тут було оголошення простору й часу апіорними формами людського споглядання, тобто обґрунтування їх абсолютизації. Погляди Канта на простір і час знайшли чимало прихильників наприкінці XVIII – у першій половині XIX століття. Неспроможність цих поглядів було доведено лише після створення й прийняття неевклідової геометрії, яка, власне кажучи, суперечила ньютонівському розумінню простору. Відкинувши його, М. І. Лобачевський і Б. Ріман стверджували, що геометричні властивості простору як найбільш загальні фізичні властивості залежать від загальної природи сил, які формують тіла.

Погляди діалектичного матеріалізму на простір і час сформулював Ф. Енгельс. За Енгельсом, знаходитися в просторі – значить бути у формі розташування одного біля іншого, існувати в часі – значить бути у формі послідовності одного після іншого. Енгельс підкреслював, що "обидві ці форми існування матерії суть ніщо, порожні уявлення, абстракції, що існують тільки в нашій голові".

Криза механічного природознавства на межі XVII I–XIX століть спричинила відродження на новій основі суб'єктивістських поглядів на простір і час. Критикуючи учасників дискусії, Е. Мах розвинув погляд на простір і час як на "порядок сприйняття", підкреслюючи походження аксіом геометрії із досвіду. Але Мах сприймав досвід суб'єктивістських, тому і геометрію Евкліда, і геометрії Лобачевського й Рімана він трактував як різні способи описування однакових просторових співвідношень.

### **2.5. Розвиток уявлень про простір і час у XX столітті**

Наприкінці XIX – початку XX століття відбулися глибокі зміни в наукових уявленнях про матерію і, відповідно, радикальна зміна понять простору й часу. Фізичну картину світу доповнила концепція поля як форми матеріального зв'язку між частинками речовини, як особливої форми матерії. Усі тіла, таким чином, являють собою систему заряджених частинок, пов'язаних полем, що передає дії від одних частинок до інших з кінцевою швидкістю – швидкістю світла. Припускали, що поле – це стан ефіру, абсолютно нерухомого середовища, що заповнює світовий абсолютний простір. Пізніше було встановлено (Х. Лоренц та ін.), що коли рух тіл відбувається з дуже великими швидкостями, близькими до швидкості світла, то поле змінюється, що призводить до зміни просторових і часових властивостей тіл; при цьому Лоренц вважав, що довжина тіл у напрямку їхнього руху скорочується, а ритм фізичних процесів, що відбуваються в них, сповільнюється, причому просторові й часові величини змінюються узгоджено.

Спочатку здавалося, що таким шляхом можна буде визначити абсолютну швидкість тіла щодо ефіру, а отже, стосовно абсолютного простору. Однак уся сукупність дослідів спростувала цей погляд (більш детально це питання буде обговорюватися в розділі "Теорія відносності"). Було встановлено, що в будь-якій інерційній системі відліку всі фізичні закони, включаючи закони електромагнітних (і взагалі польових) взаємодій, однакові. Спеціальна теорія відносності А. Ейнштейна, заснована на двох фундаментальних положеннях, – про граничну швидкість світла й рівноправність інерційних систем відліку, стала новою фізичною теорією простору й часу. З неї випливає, що просторові й часові відносини – довжина тіл (узагалі відстань між двома матеріальними точками) і тривалість (а також ритм) процесів, що відбуваються в ньому, є не абсолютними величинами, як стверджувала механіка Ньютона, а відносними. Частинка (наприклад, нуклон) може

виявляти себе стосовно частинки, яка повільно рухається щодо неї, як сферична, а щодо частинки, яка налітає на неї з дуже великою швидкістю, – як сплющений у напрямку руху диск. Відповідно, тривалість існування зарядженого  $\pi$ -мезона, який повільно рухається, а того, який рухається з величезною швидкістю (близькою до швидкості світла), – у багато разів більша. Відносність просторово-часових характеристик тіл повністю підтверджується за допомогою дослідів. Звідси випливає, що уявлення про абсолютність простору й часу є хибними. Простір і час є загальними формами координації матеріальних явищ, а не самостійними началами буття, незалежними від матерії. Теорія відносності спростовує уявлення про порожній простір і час, які мають власні виміри. Уявлення про порожній простір було відкинуто пізніше й у квантовій теорії поля з його новим поняттям вакууму.

Подальший розвиток теорії відносності (загальної теорії відносності А. Ейнштейна) показав, що просторово-часові відносини залежать також від концентрації мас. При переході до космічних масштабів геометрія простору-часу не є евклідовою (або "пласкою", тобто незалежною від величини простору-часу, а змінюється від однієї частини космосу до іншої залежно від щільності мас у цих місцях і їх руху). У масштабах Метагалактики геометрія простору змінюється з часом унаслідок розширення Метагалактики. Таким чином, розвиток фізики й астрономії підтвердив неспроможність як апіоризму Канта, тобто розуміння простору й часу як апіорних форм людського сприйняття, природа яких незмінна й незалежна від матерії, так і ньютонівської догматичної концепції простору й часу.

Зв'язок простору й часу з матерією виражається не тільки в залежності законів простору й часу від загальних закономірностей, які визначають взаємодію матеріальних об'єктів. Він виявляється також в наявності характерного ритму існування матеріальних об'єктів і процесів – типових для кожного класу об'єктів середніх тривалостей життя й середніх просторових розмірів.

З викладеного випливає, що простору й часу властиві дуже загальні фізичні закономірності, що стосуються всіх об'єктів і процесів. Це має стосунок і до проблем, пов'язаних з топологічними властивостями простору й часу. Проблема межі (зіткнення) окремих об'єктів і процесів безпосередньо пов'язана з питаннями, які привертали увагу ще в давнину. Йдеться про скінченну або нескінченну подільність простору й часу, їх дискретність або неперервність. В античній філософії це питання вирішувалося лише умовивно. Висловлювалися, наприклад, припущення про існування "атомів" часу (Зенон). У науці XVII-XIX століть ідея атомізму простору й часу втратила будь-яке значення. Ньютон вважав, що простір і час реально розчленовані до нескінченності. Цей висновок впливав з його концепції порожніх простору й часу, найменшими елементами яких є геометрична точка й момент часу ("миттєвості" в буквальному значенні слова). Лейбніц вважав, що хоч простір і час подільні до безмежності, але реально не розчленовані на точки – у природі немає об'єктів і явищ, позбавлених розмірів і тривалості. З уявлення про необмежену подільність простору й часу не випливає, що і границі тіл та явищ є абсолютними. Уявлення про неперервність простору й часу ще більше зміцніло в XIX столітті з відкриттям поля: у класичному розумінні поле є абсолютно неперервний об'єкт.

Проблема реальної подільності простору й часу постала у XX столітті у зв'язку з відкриттям у квантовій механіці співвідношення невизначеностей (більш докладно це питання розглядається в розділі "Квантова механіка"). Відповідно до співвідношення невизначеностей для абсолютно точної локалізації мікрочастинки

необхідні нескінченно великі імпульси, що у фізичному аспекті є нездійсненим завданням. Більше того, сучасна фізика елементарних частинок свідчить, що при дуже сильних впливах на частинку вона не зберігається взагалі, відбувається навіть множинне народження частинок. Насправді не існує реальних фізичних умов, за яких можна було б виміряти точне значення напруженості поля в кожній точці. Таким чином, сучасна фізика встановила, що неможливо не тільки реально здійснити поділ простору й часу на точки, але й принципово неможливо здійснити процес реального нескінченного їх поділу. Отже, геометричні поняття точки, кривої, поверхні є абстракціями, що відображають просторові властивості матеріальних об'єктів лише приблизно. Насправді об'єкти відділені один від одного не абсолютно, а лише відносно. Справедливо це і стосовно моментів часу. Саме такий погляд на "точковість" подій впливає з так званої теорії нелокального поля. Одночасно з ідеєю нелокальності взаємодії розробляється гіпотеза про квантування простору й часу, тобто про існування найменших довжин і тривалостей. Спочатку припускали, що "квант" довжини –  $10^{-15}$  м (порядку класичного радіуса електрона або порядку "довжини" сильної взаємодії). Однак за допомогою сучасних прискорювачів заряджених частинок досліджуються явища, які мають довжини  $10^{-17}$  м; тому значення кванта довжини почало зміщуватися до все менших значень.

Вирішення питання про квантування простору й часу тісно пов'язане з проблемами структури елементарних частинок. З'явилися дослідження, які взагалі заперечують застосовність до субмікроскопічного світу понять простору й часу. Однак поняття простору й часу не повинні зводитися ні до метричних, ні до топологічних відносин відомих типів.

Тісний взаємозв'язок просторово-часових властивостей у природі взаємодії об'єктів виявляється також і при аналізі симетрії простору й часу. Ще в 1917 році Е. Нетер довела, що однорідності простору відповідає закон збереження імпульсу, однорідності часу – закон збереження енергії, ізотропності простору – закон збереження моменту кількості руху. Таким чином, типи симетрії простору й часу як загальні форми координації об'єктів і процесів взаємопов'язані з найважливішими законами збереження. Симетрія простору при дзеркальному відображенні виявилася залежною від істотної характеристики мікрочастинок їх парності.

Однією з найважливіших проблем простору й часу є питання про спрямованість перебігу часу. У ньютонівській концепції ця властивість часу вважалася зрозумілою сама собою і не потребувала обґрунтування. У Лейбніца незворотність перебігу часу пов'язувалася з однозначною спрямованістю ланцюга причин і наслідків. Сучасна фізика конкретизувала й розвинула це обґрунтування, пов'язавши його із сучасним розумінням причинності. Очевидно, спрямованість часу пов'язана із такою інтегральною характеристикою матеріальних процесів, як розвиток, що є принципово незворотним.

Серед проблем простору й часу, які привертали увагу ще в давнину, – питання про кількість вимірів простору й часу. У ньютонівській концепції ця кількість вважалася споконвічно незмінною. Однак ще Арістотель обґрунтував тривимірність простору в залежності від кількості можливих перетинів (поділів) тіла. Інтерес до цієї проблеми зріс у XX столітті з розвитком топології. Л. Бауер установив, що вимірність простору є топологічним інваріантом – числом, що не змінюється за умови неперервних і взаємно однозначних перетворень простору. У ряді досліджень було встановлено зв'язок між кількістю вимірів простору і структурою електромагнітного поля, між тривимірністю простору й спіральністю елементарних

частинок. Усе це підтвердило, що кількість вимірів простору й часу нерозривно пов'язана з матеріальною структурою навколишнього світу.

## **Теорія відносності**

### **Загальні зауваження**

У цьому розділі йдеться про першу революцію в науковому мисленні, яку спричинили відкриття двадцятого століття. На жаргоні фізика зміст усіх попередніх розділів об'єднує поняття класичної фізики, щоб відрізнити цю стару фізику від новітніх, сучасних теорій, до яких ми і переходимо.

Ідеї відносності зустріли спочатку сильний опір як з боку фізиків, так і з боку філософів. Фізики зустріли нову гіпотезу критично, як завжди вони зустрічають нову ідею, поки вона не пройшла їхніх вимог потрібного іспиту. По-перше, вона повинна залишати недоторканими успіхи попередньої роботи і не знецінювати тих пояснень результатів спостережень, що використовувалися для обґрунтування більш ранніх ідей. По-друге, вона повинна задовільно пояснювати нові дані, що поставили під сумнів попередні ідеї і спричинили виникнення нових гіпотез. І, по-третє, вона повинна прогнозувати нові явища або нові співвідношення між різними явищами, які до цього часу були ще невідомими або не до кінця зрозумілими.

Цей процес потребував деякого часу, тому що врахування відносності є важливим лише для об'єктів, що рухаються зі швидкістю, порівнянною зі швидкістю світла. Оскільки подібні об'єкти не завжди доступні для спостереження, то не було достатніх можливостей для перевірки, до того ж у багатьох випадках досліди вимагали дуже складних спостережень високої точності. Із того часу частинки, що рухаються з високими швидкостями, стали звичайними в будь-якій фізичній лабораторії. Тепер ми не можемо сприймати незначні зміни в поведінці частинок, для виявлення яких потрібні вимірювання високої точності, як несуттєві; релятивістські особливості їхнього руху пов'язані з великими ефектами, якими неможливо знехтувати. Простіше кажучи, проектуючи обладнання для фізичних досліджень, інженери змушені конструювати пристрої вартістю в багато мільйонів доларів, що пов'язано винятково з релятивістським характером руху частинок. Навряд чи схильні вони вважати це результатом марного або помилкового вгадування. Сьогодні жоден фізик, практично ознайомлений з дослідженнями над швидкими частинками, не буде заперечувати принципи теорії відносності.

Заперечення філософів виникали тому, що теорія відносності започаткувала перегляд положень, які вважалися сферою філософії. Піддавалося сумніву право фізиків заперечувати ідеї, які філософи вважали очевидними й незаперечними істинами.

Але тепер, здається, є уже загальновизнаним фактом, що наші уявлення про простір і час пов'язані безпосередньо з пізнанням зовнішнього світу і багато положень, які ми вважаємо очевидними, справедливі лише в межах нашого повсякденного досвіду. Вони можуть виявитися необґрунтованими упередженнями, якщо поширити їх на ситуації, незвичні для нас.

В історії фізики такі випадки – звичайна справа. Відкриття факту, що Земля обертається навколо своєї осі й навколо Сонця, суперечило механічній інтуїції, заснованій на повсякденному досвіді. Коли ми довідуємося в школі про протидію, яку чинили спочатку цій ідеї, то середньовічні вчені, що не могли сприйняти її, здаються нам людьми з обмеженим кругозором. Але ми легко сприйняли цю думку лише тому, що звикли до неї з найперших своїх кроків і сприйняли її до того, як наш критицизм став досить розвинутим, щоб серйозно її обмірковувати.



Ідея закону Галілея про те, що тіло, яке рухається, прагне продовжити свій рух, суперечить повсякденному досвіду й спочатку цілком законно зазнавала критики тогочасних фізиків. З великими труднощами сприймали цю ідею мислителі, намагаючись узагальнити абстрактні ідеї про рух.

Той факт, що світло поширюється із скінченною швидкістю, також суперечить нашої інтуїції. Важко звикнути навіть до того, що швидкість звуку теж скінченна, і коли ми спостерігаємо за людиною, що рубав десь далеко від нас ліс, і звук удару доходить до нас після того, як ми побачимо падіння сокири, то для осмислення цієї незвичайної ситуації потрібно свідомо напружити думку. Ще більше ми звикли покладатися на свої очі, вважаючи, що інформація, яку вони дають нам про зовнішній світ, – це правдиве повідомлення про події, які відбуваються в той момент, коли ми дивимося. У повсякденному досвіді на поверхні Землі немає нічого, що могло б зруйнувати цю ілюзію, але трьохсотрічний досвід астрономії і пізніші методи надзвичайно точного вимірювання часу змусили нас визнати, що швидкість світла скінченна.

Хвильова природа світла створює для нашої інтуїції подібні труднощі. Тільки завдяки свідомому зусиллю розуму ми спроможні визнати, що через дифракцію хвиль світла на різкій межі світло дійсно огинає перешкоду.

Таким чином, кожне нове досягнення науки змушує нас покінчити зі своїм якимось глибоко укоріненим упередженням, але, напевно, усі попередні досягнення, за винятком закону Галілея, засвоювалися легше, тому що ми могли пояснити їх мовою знайомих механічних моделей. Наприклад, скінченність швидкості звуку підготувала нас до визнання скінченності швидкості світла. Поводження світлових хвиль можна наочно уявити собі, спостерігаючи брижі на поверхні ставка, відмінності лише в масштабі, але ці аналогії не придатні для засвоєння ідей теорії відносності.

Імовірно, утвердження теорії відносності трохи затрималося також через назву, тому що вона наводить на думку про зв'язок із філософською концепцією відносності, відповідно до якої будь-яка істина розглядається як відносна. Як ми побачимо, немає нічого більш далекого від змісту нових досягнень теорії. У теорії відносності закони фізики мають точну й абсолютну форму, лише деякі положення, які наша інтуїція сприймала як абсолютні, виявляються упередженням.

### **Абсолютно чи відносно?**

Два моряки, Джо і Мо, після аварії корабля опинилися на безлюдному острові. Прошло кілька років. Одного разу Джо знайшов пляшку, яку хвилі викинули на берег. Це була одна з нових величезних пляшок з-під "Кока-коли". Джо сплотив.

"Гей, Мої" – крикнув він. "Ми з тобою зменшилися!"

Із цього жарту можна дістати серйозний урок: говорити про розміри будь-якого об'єкта не можна інакше, як порівнюючи їх із розмірами чого-небудь іншого. Ліліпути вважали Гуллівера велетнем. Мешканцям Бробдингнега Гуллівер здався малесеньким. Куля для більярду велика чи мала? Зрозуміло, вона надзвичайно велика порівняно з атомом, але вкрай мала порівняно із Землею.

Жуль Анрі Пуанкаре, відомий французький математик дев'ятнадцятого століття, який передбачив багато положень теорії відносності, підійшов до вирішення цього питання в такий спосіб (учені називають його спосіб підходу "уявним експериментом": це експеримент, який можна уявити, але насправді не можна виконати). Уявіть собі, говорить він, що вночі, коли ви міцно спите, усе у Всесвіті стало в тисячу разів більшим, ніж колись. Говорячи все, Пуанкаре має на

увазі справді все: електрони, атоми, довжини хвиль світла, вас самих, ваше ліжко, ваш будинок, Землю, Сонце, зірки. Чи зможете ви сказати, коли прокинетесь, що відбулися якісь зміни? Чи можна провести такий експеримент, який ловив би, що ви змінилися в розмірах?

Ні, говорить Пуанкаре, такого експерименту провести не можна. Справді, Всесвіт виявився б таким, яким і був колись. Було б безглуздо навіть говорити, що він став більшим. "Більше" – це значить більше відносно чогось іншого. У цьому випадку чогось іншого немає. Настільки ж безглуздо було б говорити, що весь Всесвіт зменшився у своїх розмірах.

Розміри, таким чином, є відносними. Не існує абсолютного способу визначення розмірів якого-небудь об'єкта і не можна сказати, що він має такі-то й такі-то абсолютні розміри. Визначити розмір можна, використовуючи інші мірки, такі як лінійка або метровий стрижень. Але яка довжина метрового стрижня? До 1 січня 1962 року метр визначали як довжину конкретного платинового бруска, що зберігався при постійній температурі в підвалах Севру, у Франції. З 1 січня 1962 року новим стандартом метра стала довжина, що становить 1650763,73 довжини хвиль жовтогарячих променів, які випромінює у вакуумі атом кріптон-86. Звичайно, якщо все у Всесвіті, включаючи і довжину хвилі цього випромінювання, збільшиться або зменшиться в одній і тій же пропорції, то ніяким експериментальним способом не вдасться помітити цю зміну.

Те ж саме є вірним і стосовно інтервалів часу. "Багато" чи "мало" часу потрібно Землі для того, щоб один раз обернутися навколо Сонця? Маленькій дитині проміжок часу від одного Нового року до іншого здається вічністю. Геологу, що звик мислити періодами, що тривали мільйони років, один рік здається всього лише однією миттю. Інтервал часу, як і відстані в просторі, неможливо виміряти інакше, як порівнюючи його з яким-небудь іншим відрізком часу. Рік визначається періодом обертання Землі навколо Сонця; день – часом, необхідним для одного оберту Землі навколо своєї осі; година – часом, протягом якого велика стрілка годинника робить один оберт. Завжди один інтервал часу вимірюється шляхом порівняння його з іншим.

У Г. Уеллса є відоме науково-фантастичне оповідання під назвою "Новий прискорювач". З нього можна засвоїти такий же урок, як і із жарту про двох моряків, але тільки урок цей стосується не простору, а часу. Один учений відкриває спосіб прискорення всіх процесів у своєму організмі. Його серце б'ється частіше, його мозок працює швидше і так далі. Ви здогадуєтесь, що станеться. Усе у світі буде здаватися йому уповільненим – майже до повної зупинки. Учений виходить погуляти й рухається повільно, щоб через тертя об повітря не загорілися його штани. Вулиця заповнена людьми-статуями. Чоловік застигнув у спокої у той момент, коли, обганяючи двох дівчат, підморгнув їм. У парку грає оркестр, видаючи низьке, хрипке деренчання. Бджола дзижчить у повітрі, рухаючись зі швидкістю слимака.

Давайте проведемо ще один уявний експеримент. Припустимо, що в певний момент усе в космосі починає рухатися повільніше чи швидше або повністю зупиняється на кілька мільйонів років, починаючи потім рухатися знову. Чи вдасться помітити цю зміну? Здійснити такий експеримент, звичайно, неможливо. Час, як і відстані в просторі, відносний.

Багато інших понять, які відомі нам з повсякденного життя, теж відносні. Розглянемо поняття "нагору" й "униз". У минулі століття людям було нелегко

зрозуміти, чому людина з протилежного боку Землі висить униз головою, а вся кров не приливає їй до голови. Діти й тепер стикаються з такими труднощами, довідавшись уперше, що Земля кругла.

Якби Земля була з прозорого скла й ви змогли глянути в телескоп прямо крізь неї, то ви справді побачили б людей, які стоять униз головою ногами на склі. Тобто вам здавалося б, що вони стоять униз головою стосовно вас. Зрозуміло, їм здавалося б, що ви стоїте вниз головою стосовно них. На Землі напрямом "угору" – це напрямом від центра Землі. Напрямок "униз" – до центра Землі. У міжзоряному просторі немає абсолютного верху й низу, оскільки там немає планети, яка могла б бути "системою відліку".

Уявімо собі космічний корабель у формі величезного бублика, що рухається в Сонячній системі. Він обертається, так що відцентрова сила створює штучне гравітаційне поле. Перебуваючи всередині корабля, космонавти можуть ходити по зовнішній стінці цього бублика, як по підлозі. Для них "униз" – це від центра корабля, "нагору" – до центра, тобто прямо протилежно тому, що має місце на планеті, яка обертається.

Таким чином, ви бачите, що у Всесвіті немає абсолютного "верху" й "низу". Угору й вниз – це напрямки стосовно напрямку дії гравітаційного поля. Було б безглуздо говорити, що, поки ви спали, увесь Всесвіт перевернувся вгору ногами, оскільки немає нічого такого, що могло б бути системою відліку при вирішенні питання про те, яке положення зайняв Всесвіт.

Інший тип зміни, яка також є відносною, – це зміна об'єкта за умови його дзеркального відображення. Якщо заголовну букву R надрукувати навпаки, як Я, то ви відразу ж побачите, що це дзеркальне відображення букви R. Але якщо весь Всесвіт (включаючи вас) раптово стане дзеркально відображеним, то у вас не буде способу виявити подібні зміни. Звичайно, якби тільки одна людина перетворилася у своє дзеркальне відображення (про це Г. Уеллстакон написав оповідання під назвою "Розповідь Плеттнера"), а Всесвіт залишився б колишнім, то їй здалося б, що все стало навпаки. Щоб прочитати книгу, вона повинна була б підносити її до дзеркала, подібно до Аліси в Задзеркаллі, якій вдавалося читати надруковану дзеркально відображеними буквами поему, тримаючи її перед дзеркалом. Але якби усе стало навпаки, то ніякий експеримент не виявив би цих змін.

Чи абсолютний рух? Чи існує який-небудь клас експериментів, який би напевно встановив, рухається об'єкт чи перебуває у стані спокою? Чи є рух ще однією відносною категорією, пізнати яку можна, тільки зіставляючи місце розташування одного предмета з місцем розташування іншого? Чи ж руху властиве щось своєрідне, що робить його відмінним від відносних категорій, розглянутих вище?

### **Експеримент Майкельсона-Морлі**

Чи відносний рух? Після деяких міркувань ви могли б схилитися до відповіді: "Так, звичайно!" Уявіть собі потяг, що рухається на північ зі швидкістю 60 км/год. Людина в потязі йде на південь зі швидкістю 3 км/год. У якому напрямку вона рухається і яка її швидкість? Зовсім очевидним є те, що на це питання не можна відповісти, не вказавши системи відліку. Стосовно потяга людина рухається на південь зі швидкістю 3 км/год. Стосовно Землі вона рухається на північ зі швидкістю 60 мінус 3, тобто 57 км/год.

Чи можна сказати, що швидкість людини стосовно Землі (57 км/год.) є її справжньою, абсолютною швидкістю? Ні, тому що існують й інші, ще більш

великомасштабні системи відліку. Рухається сама Земля. Вона обертається навколо своєї осі й у той же час рухається навколо Сонця. Сонце разом із усіма своїми планетами рухається всередині Галактики. Галактика обертається й рухається відносно інших галактик. Галактики, у свою чергу, утворюють скупчення галактик, що рухаються одна відносно іншої. Ніхто не знає, наскільки далеко можна продовжити цей перелік рухів. Немає очевидного способу визначити абсолютний рух якого-небудь предмета; інакше кажучи, немає такої фіксованої, остаточної системи відліку, стосовно якої можна було б вимірювати всі рухи. Рух і спокій, подібно великому й малому, швидкому й повільному, верху й низу, лівому й правому, очевидно, цілком відносні. Немає іншого способу виміряти рух якогось предмета, окрім як порівняти його рух з рухом іншого предмета.

На жаль, це не так просто! Якби можна було обмежитися лише тим, що вже сказано про відносність руху, то Ейнштейну не довелося б створювати теорію відносності.

Причина труднощів у тому, що існує два дуже простих способи виявлення абсолютного руху. В одному з методів використовуються властивості світла, в іншому – різноманітні явища інерції, що виникають при зміні траєкторії або швидкості руху предмета, який рухається. Спеціальна теорія відносності Ейнштейна має справу з першим методом, а загальна теорія відносності – із другим. У цьому і у двох наступних розділах розглядатиметься перший метод, який використовує властивості світла й може стати ключем до розуміння абсолютного руху.

У дев'ятнадцятому столітті, ще до Ейнштейна, фізики вважали, що простір наповнений особливою нерухомою і невидимою речовиною – ефіром. Часто його називали "світлоносним" ефіром, маючи на увазі, що він є носієм світлових хвиль. Ефір заповнював увесь Всесвіт.

Він проникав у всі матеріальні тіла. Якби вдалося відкачати з-під скляного дзвона все повітря, то він наповнився б ефіром. А як інакше світло могло б пройти через вакуум? Світло – це хвильовий рух. Отже, повинно існувати щось, у чому відбуваються коливання. Сам ефір, хоч у ньому й відбуваються коливання, не рухається стосовно матеріальних предметів, скоріше, усі предмети рухаються крізь нього, подібно руху сита у воді. Абсолютний рух зірки, планети або якого-небудь іншого предмета стане зрозумілішим (у цьому фізики тієї епохи були впевнені), якщо цей рух розглядати відносно такого нерухомого, невидимого ефірного моря.

Але, запитаєте ви, якщо ефір – нематеріальна субстанція, яку не можна побачити, почути, відчувати на дотик, запах чи спробувати на смак, то як можна розглядати рух, наприклад, Землі відносно нього? Відповідь проста. Вимірювання можна виконати, порівнявши рух Землі з рухом світлового пучка.

Щоб зрозуміти це, розглянемо спочатку природу світла. Насправді світло – це лише невелика видима частина спектра електромагнітного випромінювання, до складу якого входять радіохвилі, ультракороткі хвилі, інфрачервоне світло, видиме світло, ультрафіолетове світло й гамма-промені. Ми використовуємо слово "світло" для позначення будь-якого типу електромагнітного випромінювання, тому що це слово коротше, ніж "електромагнітне випромінювання". Світло – хвильовий рух. Фізики минулого вважали, що вивчати такий рух, не беручи одночасно до уваги матеріальний ефір, настільки ж абсурдна справа, як і досліджувати хвилі на воді, забуваючи про саму воду.

Якщо вистрілити з реактивного літака, що рухається, у напрямку його руху, то швидкість кулі відносно Землі буде більшою, ніж швидкість кулі, випущеної з

рушниці на Землі. Швидкість кулі відносно Землі є результатом додавання швидкості літака й швидкості кулі. У випадку ж світла швидкість пучка не залежить від швидкості предмета, який це світло випромінює. Цей факт переконливо довели експериментально наприкінці дев'ятнадцятого й на початку двадцятого століття, і з того часу він не одноразово підтверджувався. Останню перевірку було проведено в 1955 р. радянськими астрономами, які використовували світло від протилежних країв Сонця, яке постійно перебуває в обертальному русі. Один край нашого Сонця завжди рухається до нас, а інший – у протилежний бік. Було встановлено, що світло від обох країв приходить до Землі з однаковою швидкістю. Подібні досліди проводилися і десятиліття назад зі світлом від подвійних зірок, які теж обертаються. Незважаючи на рух джерела, швидкість світла в порожнечі завжди однакова: вона становить майже 300000 км/сек.

Очевидно, цей факт дає ученому (будемо називати його спостерігачем) спосіб для обчислення своєї абсолютної швидкості. Якщо світло поширюється через нерухомий, незмінний ефір з відомою швидкістю  $c$  і якщо ця швидкість не залежить від швидкості руху джерела, то швидкість світла може слугувати еталоном для визначення абсолютного руху спостерігача. Спостерігач, який рухається в тому ж напрямку, що й пучок світла, повинен був би виявити, що пучок проходить повз нього зі швидкістю, меншою ніж  $c$ ; спостерігач же, який рухається назустріч пучку світла, повинен був би відзначити, що пучок наближається до нього зі швидкістю, більшою ніж  $c$ . Іншими словами, результати вимірювання швидкості світла повинні були б змінюватися в залежності від руху спостерігача відносно пучка. Ці зміни відображали б його (спостерігача) справжній, абсолютний рух крізь ефір.

Описуючи це явище, фізики часто вдаються до поняття "ефірного вітру". Щоб зрозуміти зміст цього терміна, розглянемо знову потяг, який рухається. Ми встановили, що швидкість людини, яка рухається всередині потяга зі швидкістю 3 км/год., завжди однакова стосовно потяга й не залежить від того, у бік локомотива чи до кінця потяга вона йде. Це справедливо і для швидкості звукових хвиль усередині закритого вагона. Звук – хвильовий рух, який передається завдяки молекулам повітря. Оскільки повітря міститься всередині вагона, звук усередині вагона буде поширюватися на північ з тією ж швидкістю (стосовно вагона), що і на південь.

Стан речей зміниться, якщо ми перейдемо із закритого пасажирського вагона на відкриту платформу. Повітря вже не ізольоване всередині вагона. Якщо потяг рухається зі швидкістю 60 км/год, то уздовж платформи у зворотному напрямку дме вітер зі швидкістю 60 км/год. Через цей вітер швидкість звуку в напрямку від кінця до початку вагона буде менша, ніж нормальна. Швидкість звуку у зворотному напрямку буде більшою від нормальної.

Фізики дев'ятнадцятого століття були впевнені, що ефір повинен поводитися, як і вітер, що дме на платформі, яка рухається. Хіба може бути інакше? Якщо ефір нерухомий, то будь-який предмет, який рухається в ньому, повинен зіткнутися з ефірним вітром, що дме в протилежному напрямку. Світло – хвильовий рух у нерухомому ефірі. На швидкість світла, яка вимірюється з предмета, що рухається, повинен, звичайно, впливати ефірний вітер.

Земля переміщується в просторі по своїй орбіті навколо Сонця зі швидкістю близько 30 км/сек. Цей рух, розмірковували фізики, повинен спричинити ефірний вітер, що дме назустріч Землі в проміжках між її атомами зі швидкістю 30 км/сек. Щоб виміряти абсолютний рух Землі (швидкість її руху щодо нерухомого ефіру),

необхідно лише виміряти швидкість, з якою світло проходить якусь певну відстань на земній поверхні туди й назад. Унаслідок впливу ефірного вітру світло буде рухатися в одному напрямку швидше, ніж в іншому. Порівнявши швидкості світла, випроміненого в різних напрямках, можна було б обчислити абсолютний напрямок і швидкість руху Землі в будь-який заданий момент. Цей експеримент уперше запропонував у 1875 р за 4 роки до народження Ейнштейна великий шотландський фізик Джеймс Кларк Максвелл.

У 1881 р. Альберт Абрагам Майкельсон, на той час молодий офіцер Військово-Морського флоту Сполучених Штатів, провів саме такий експеримент. Майкельсон народився в Німеччині, його батьки – поляки. Батько Майкельсона переїхав до Америки, коли сину було два роки. Після закінчення Військово-Морської академії в Ан-наполісі й дворічної морської служби Майкельсон починає викладати фізику й хімію в цій же академії. Узявши тривалу відпустку, він їде навчатися до Європи. У Берлінському університеті, у лабораторії відомого німецького фізика Германа Гельмгольца, молодий Майкельсон уперше спробував виявити ефірний вітер. На превеликий подив, у жодному напрямку компаса він не знайшов розбіжностей у швидкості, з якою світло проходило шлях туди й назад. Це було схоже на те, як нібито риба відкрила б, що вона може плисти в будь-якому напрямку в морі, не відчуваючи руху води щодо свого тіла; або як нібито пілот, що летить з відкритим ковпаком кабіни літака, не помічає вітру, що дме йому в обличчя.

Видатний австрійський фізик Ернст Мах уже тоді критикував уявлення про абсолютний рух крізь ефір. Прочитавши опублікований звіт Майкельсона про дослід, він негайно зробив висновок, що уявлення про ефір треба відкинути. Однак більшість фізиків відмовилися зробити такий сміливий крок. Прилад Майкельсона був недосконалий, було достатньо підстав вважати, що експеримент, проведений за допомогою більш чутливої апаратури, дасть позитивний результат. Так вважав і сам Майкельсон. Не знайшовши помилок у своєму досліді, він прагнув повторити його.

Майкельсон відмовився від військово-морської служби й обійняв посаду професора в Кейсівській школі прикладних наук (тепер Кейсівський університет) у Клівленді, штат Огайо. Поблизу, в університеті Західної Території, викладав хімію Едвард Вільям Морлі. Двоє чоловіків стали добрими друзями. "Зовні, – пише Бернард Яффі в книзі "Майкельсон і швидкість світла", – ці двоє учених являли собою зразок контрасту... Майкельсон був красивий, ошатний, завжди бездоганно виголений. Морлі, м'яко кажучи, був недбалий в одязі і являв собою приклад незібраного професора... Він дозволяв волосся відростати доти, поки воно не починало завиватися на плечах, і був власником безладної рудої щетини, яка росла майже до вух".

У 1887 р. в підвалі лабораторії Морлі вчені разом зробили другу, більш точну спробу виявити невловимий ефірний вітер. Їх досвід, відомий як експеримент Майкельсона-Морлі, – один із поворотних пунктів у сучасній фізиці.

Прилад було встановлено на квадратній кам'яній плиті зі сторонами приблизно півтора метра й товщиною понад 30 см. Плита плавала в рідкій ртуті. Це виключало вібрації, підтримувало горизонтальність плити й дозволяло легко повертати її навколо центральної осі. Система дзеркал спрямовувала пучок світла у потрібному напрямку, дзеркала відбивали пучок туди й назад в одному напрямку так, що він робив вісім пробігів. (Це було зроблено для того, щоб максимально подовжити шлях, зберігши розміри приладу такими, щоб він міг легко обертатися.) У той же час інша система дзеркал посилювала пучок на вісім пробігів у напрямку, що

утворював прямий кут з першим пучком.

Передбачалося, що коли плита буде повернута так, що один з пучків буде пробігати туди й назад паралельно ефірному вітру, то пучок буде робити рейс за більший проміжок часу, ніж інший пучок, що проходить таку ж відстань перпендикулярно вітру. Спочатку здавалося, що повинно справджуватися протилежне. Розглянемо світло, що поширюється за вітром і проти вітру. Чи не буде вітер збільшувати швидкість на одному шляху настільки ж, наскільки зменшує її на іншому? Якщо так, то прискорення й гальмування компенсували б одне одного й час, витрачений на весь шлях, був би точно таким же, як у випадку, коли ніякого вітру не було зовсім.

Справді, вітер буде збільшувати швидкість в одному напрямку на точно таку ж величину, на яку зменшуватиме її в іншому, але – і це найважливіше – вітер буде зменшувати швидкість протягом більшого проміжку часу. Обчислення показують, що на подолання повного шляху проти вітру затрачається більше часу, ніж за відсутності вітру. Вітер буде чинити дію, що сповільнює, і на пучок, що поширюється під прямим кутом до нього. У цьому також легко переконатися.

Виявляється, що дія, яка сповільнює, більша в тому випадку, коли пучок поширюється паралельно вітру. Якщо Земля рухається через море нерухомого ефіру, то повинен виникати ефірний вітер і прилад Майкельсона-Морлі повинен його зареєструвати. І справді, обидва вчених були впевнені, що вони зможуть не тільки виявити такий вітер, але і визначити (обертаючи плиту доти, поки не знайдуть таке положення, в якому різниця часу проходження світла в обох напрямках максимальна) у будь-який заданий момент точний напрямок руху Землі через ефір.

Слід зазначити, що прилад Майкельсона-Морлі не вимірював справжньої швидкості світла кожного з пучків. Обидва пучки після того, як вони робили потрібну кількість пробігів туди й назад, поєднувалися в єдиний пучок, який можна було спостерігати в невеликий телескоп. Прилад повільно обертався. Будь-яка зміна відносних швидкостей обох пучків викликала б зміну інтерференційної картини, що являла собою чергування світлих і темних смуг.

І знову Майкельсон був вражений і розчарований. Здивовані були і всі фізики, які спостерігали за цим важливим дослідом. Незважаючи на те, що Майкельсон і Морлі повертали свій прилад, вони не помітили і сліду ефірного вітру! Ніколи раніше в історії науки негативний результат досліду не був настільки руйнівним і настільки плідним. Майкельсон знову вирішив, що його експеримент не вдався. Він ніколи не думав, що ця "невдача" зробить його дослід одним з найбільш значних, революційних експериментів в історії науки.

Пізніше Майкельсон і Морлі повторили свій дослід за допомогою ще більш досконалого прилада. Інші фізики зробили те ж саме. Найбільш точні дослід виконав у 1960 році Чарльз Таунс у Колумбійському університеті. Його прилад, що використовує мазер ("атомний годинник", принцип дії якого ґрунтується на коливаннях молекул), був настільки чутливий, що міг би помітити ефірний вітер, навіть якби Земля рухалася зі швидкістю, що становить усього лише одну тисячну частку від її справжньої швидкості. Але і сліду такого вітру не було виявлено.

Фізики спочатку були настільки здивовані негативним результатом досліду Майкельсона-Морлі, що почали придумувати всілякі пояснення для порятунку теорії ефірного вітру. Найкращим поясненням була теорія (набагато старіша, ніж досвід Майкельсона-Морлі), яка стверджувала, що Земля захоплює ефір, подібно

закритому вагону з повітрям усередині. Так вважав і сам Майкельсон. Але інші досліди, один із яких Майкельсон виконав власноруч, спростовували і це пояснення.

Найбільш незвичайне пояснення запропонував ірландський фізик Джордж Френсіс Фітцджеральд. Можливо, говорив він, ефірний вітер давить на предмет, що рухається, змушуючи його скорочуватися в напрямку руху. Щоб визначити довжину предмета, що рухається, треба його довжину в стані спокою помножити на величину, що задається формулою

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

де  $v^2$  – квадрат швидкості тіла, що рухається,  
 $c^2$  – квадрат швидкості світла.

Із цієї формули випливає, що величиною скорочення можна знехтувати, коли йдеться про невеликі швидкості тіла, однак ця величина зростає із збільшенням швидкості і стає значною, коли швидкість тіла наближається до швидкості світла. Так, космічний корабель, який за формою схожий на довгу сигару, рухаючись із великою швидкістю, набуває форми короткої сигари.

Швидкість світла – недосяжна межа. Для тіла, що рухається із цією швидкістю, формула мала б такий вигляд:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}},$$

а цей вираз дорівнював би нулю. Помноживши довжину предмета на нуль, ми одержали б у результаті нуль. Іншими словами, якщо який-небудь предмет зможе досягти швидкості світла, то він не буде мати ніякої довжини в напрямку свого руху.

Елегантну математичну форму теорії Фітцджеральда надав голландський фізик Хендрік Лоренц, який самостійно прийшов до такого ж пояснення. (Пізніше Лоренц став одним з найближчих друзів Ейнштейна, але в той час вони ще не були знайомі.)

Ця теорія одержала популярність як теорія скорочення Лоренца-Фітцджеральда (або Фітцджеральда-Лоренца).

Легко зрозуміти, як теорія скорочення пояснила невдачу досвіду Майкельсона-Морлі. Якби квадратна плита й усі прилади на ній трохи скорочувалися в тому напрямку, в якому дув ефірний вітер, то світло проходило б трохи коротший повний шлях. І хоч вітер у цілому гальмував би рух пучка в прямому і зворотному напрямках, трохи коротший шлях дозволив би пучку завершити цю подорож за точно таким же час, як коли б не було ні вітру, ні скорочення. Інакше кажучи, скорочення було саме таким, щоб збереглася сталість швидкості світла незалежно від напрямку повороту приладу Майкельсона-Морлі.

Чому, можете запитати ви, не можна було просто виміряти довжину приладу й визначити, чи відбувалося насправді укорочування в напрямку руху Землі? Але ж і лінійка скорочується в тій самій пропорції. Вимірювання дало б такий же результат, як і за відсутності скорочення. На Землі, що рухається, усе зазнає скорочення. Стан речей такий же, як і в уявному досвіді Пуанкаре, в якому Всесвіт раптово стає в



тисячу разів більшим, але тільки в теорії Лоренца-Фітцджеральда зміни відбуваються в одному-єдиному напрямку. Так як цієї зміни зазнає все, то немає способу її виявити. У певних межах (межі встановлює топологія – наука про властивості, що зберігаються при деформації предмета) форма така ж відносна, як і розмір. Скорочення приладу, як і скорочення всього на Землі, міг би помітити лише той, хто знаходиться поза Землею і не рухається разом з нею.

Багато хто, говорячи про теорію відносності, вважали гіпотезу скорочення Лоренца-Фітцджеральда гіпотезою *ad hoc* (латинський вислів, що означає "тільки для даного випадку"), яку неможливо перевірити за допомогою яких-небудь інших експериментів. Адольф Грюнбаум вважав, що це не дуже справедливо. Гіпотеза скорочення була *ad hoc* тільки в тому розумінні, що на той час не було способу перевірити її. У принципі вона зовсім не *ad hoc*. І це було доведено в 1932 р., коли Кеннеді і Торн-дайк експериментально спростували цю гіпотезу.

Рой Дж. Кеннеді та Едвард М. Торндайк, два американські фізики, повторили досвід Майкельсона-Морлі. Але замість того, щоб намагатися зробити обидва плеча якомога рівними, вони зробили їхні довжини максимально різними. Для того, щоб визначити різницю в часі, який потрібен світлу для проходження в двох напрямках, прилад повертали. Відповідно до теорії скорочення різниця в часі повинна була змінюватися при повороті. Її можна було б помітити (як і в досліді Майкельсона) у разі зміни інтерференційної картини, що виникає при змішуванні двох пучків. Але такої зміни не виявили.

Хоч такі експерименти і не можна було ще виконати в часи Лоренца, він, однак, передбачав принципову можливість їх проведення й вважав цілком обґрунтованим припущення, що ці досліди, подібно досліді Майкельсона, дадуть негативний результат. Щоб пояснити такий імовірний результат, Лоренц зробив важливе доповнення до первісної теорії скорочення, увівши зміну часу. Він вважав, що годинник сповільнювався б під дією ефірного вітру, причому таким чином, що вимірювана швидкість світла завжди становила б 300 000 км/сек.

Розглянемо конкретний приклад. Припустимо, що в нас є годинник, досить точний, щоб провести дослід з вимірювання швидкості світла. Пошлемо світло з точки А в точку Б по прямій уздовж напрямку руху Землі. Синхронізуємо обидва годинники в точці А й потім пересунемо один з них у точку Б. Відзначимо час, коли пучок світла залишив пункт А і (за іншим годинником) момент прибуття його в пункт Б. Так як світло рухалося б при цьому проти ефірного вітру, його швидкість трохи зменшилася б, а тривалість пробігу зроста порівняно з випадком Землі, яка перебуває у стані спокою. Ви помітили помилку в цьому міркуванні? Годинник, який рухався з точки А в Б, також рухався проти ефірного вітру. Це сповільнило годинник у точці Б, він трохи відстав від годинника в точці А. У результаті вимірювання швидкість світла залишається незмінною – 300000 км/сек.

Те ж саме відбудеться (стверджує Лоренц), якщо вимірювати швидкість світла, що поширюється в протилежному напрямку з точки Б у точку А. Два годинники синхронізуються в точці Б і потім один з них переноситься в точку А. Пучок світла, поширюючись із пункту Б в А, рухається вздовж ефірного вітру. Швидкість пучка збільшується, і, отже, час проходження трохи зменшується, як і у випадку із Землею, яка перебуває у стані спокою. Однак при перенесенні годинника із точки Б в А його теж "підганяє" вітер. Зменшення тиску ефірного вітру дозволить годиннику збільшити швидкість, і, отже, до моменту закінчення експерименту годинник у точці А втече вперед порівняно з годинником у точці Б. І в результаті

швидкість світла знову 300000 км/сек.

Нова теорія Лоренца не тільки пояснила негативний результат дослідку Майкельсона-Морлі; з неї випливала принципова неможливість дослідним шляхом виявити вплив ефірного вітру на швидкість світла. Її рівняння для зміни довжини й часу діють так, що при будь-якому можливому методі вимірювання швидкості світла в будь-якій системі відліку буде однаковий результат. Зрозуміло, що фізики були незадоволені цією теорією. Вона була теорією *ad hoc* у повному розумінні цього слова. Виявилися марними зусилля залатати діри, що виникли в теорії ефіру. Не можна уявити собі способу для її підтвердження або спростування. Фізикам було важко повірити, що, створивши ефірний вітер, природа улаштувала все так, що виявити цей вітер неможливо. Англійський філософ-математик Бертран Рассел пізніше дуже вдало цитував пісеньку Білого Лицаря з книги Льюїса Керрола "Аліса в країні чудес":

Мені хотілося б пофарбувати  
Бакенбарди в колір зелений,  
У руки віяло взяти побільше,  
Щоб їх ніхто не побачив.

Нова теорія Лоренца, в якій змінювалися і час, і довжина, здавалася майже настільки ж абсурдною, як і план Білого Лицаря. Але, незважаючи на всі зусилля, фізики не могли придумати нічого кращого.

У наступному розділі буде показано, як спеціальна теорія відносності Ейнштейна вказала на сміливий, чудовий вихід із цього дуже запутаного становища.

### **Спеціальна теорія відносності (частина I)**

У 1905 р., коли Альберт Ейнштейн опублікував свою знамениту статтю про те, що незабаром стало називати спеціальною теорією відносності, він був молодого одруженою людиною 26 років, працював як експерт у Швейцарському патентному бюро. Його кар'єра студента фізики в Цюрихському політехнічному інституті не була блискучою. Він волів читати, думати й мріяти, а не забивати свій розум несуттєвими фактами заради того, щоб на іспитах одержувати високі оцінки. Кілька разів він намагався викладати фізику, але виявився поганеньким учителем, і змушений був залишити викладацьку роботу.

У цій історії є й інший бік. Ще будучи малим хлопцем, Ейнштейн глибоко замислювався над фундаментальними законами природи. Пізніше він згадував про два найбільших "дива" свого дитинства: про компас, який батько показав йому – тоді чотири чи п'ятирічному хлопчику, і про книгу з евклідової геометрії, яку він прочитав у дванадцятилітньому віці. Ці два "дива" символічні для діяльності Ейнштейна: компас – символ фізичної геометрії, структури цього "величезного світу" поза нами, який ми ніколи не зможемо пізнати абсолютно точно; книга – символ чистої геометрії, структури, яка є абсолютно правильною, але не відображає повністю справжнього світу. Уже в шістнадцять років Ейнштейн мав, головним чином завдяки власним зусиллям, ґрунтовні знання з математики, включаючи аналітичну геометрію і диференціальне й інтегральне числення.

Коли Ейнштейн працював у Швейцарському патентному бюро, то багато читав і думав про запутані проблеми, пов'язані зі світлом і рухом. Його спеціальна теорія відносності була блискучою спробою пояснити безліч незрозумілих експериментів, серед яких дослід Майкельсона-Морлі був найбільш вражаючим і відомим. Слід зазначити, що було багато інших експериментів; отже, становище з

теорією електромагнітних явищ склалося вкрай незадовільне. Навіть якби дослід Майкельсона-Морлі і не був ніколи поставлений, спеціальна теорія відносності все одно була б сформульована. Пізніше Ейнштейн сам говорив про ту незначну роль, що відіграв цей експеримент у його міркуваннях. Звичайно, якби Майкельсон і Морлі зареєстрували ефірний вітер, спеціальна теорія була б відкинута із самого початку. Але негативний результат їхнього досвіду був тільки одним із багатьох фактів, що привели Ейнштейна до його теорії.

Ми бачили, як Лоренц і Фітцджеральд спробували врятувати теорію ефірного вітру, припустивши" що тиск цього вітру якимось поки що незрозумілим чином спричинює насправді фізичне скорочення тіл, що рухаються. Ейнштейн, слідом за

Ернстом Махом, зробив більш сміливе припущення. Причина, через яку Майкельсон і Морлі не змогли спостерігати ефірний вітер, стверджував Ейнштейн, проста: ефірного вітру немає. Він не сказав, що ефіру не існує, а тільки що ефір, якщо він існує, не має значення при вимірюванні рівномірного руху. (В останні роки багато видатних фізиків пропонували, щоб термін "ефір" було відновлено, хоч, звичайно, не в старому розумінні нерухомої системи відліку.)

Класична фізика – фізика Ісаака Ньютона – показала, що якщо ви знаходитесь всередині тіла, яке рівномірно рухається, скажімо, у вагоні потяга, закритому з усіх боків так, що не видно пейзажу, який пробігає повз потяг, то не існує такого механічного експерименту, за допомогою якого ви могли б довести, що ви рухаєтесь. (При цьому, звичайно, припускають, що рівномірний рух відбувається зовсім плавно, без поштовхів або розгойдування вагона, які могли б бути показниками руху.) Якщо ви підкинете кульку прямо вгору, вона впаде прямо вниз. Усе відбувається точнісінько так само, як коли б потяг стояв. Спостерігач, який стоїть на землі, поза вагоном, що рухається, якби він міг бачити крізь його стіни, побачив би шлях кульки кривим. Але для вас, усередині вагона, кулька рухається по прямій угору й униз. І це дуже добре, що тіла поводяться в такий спосіб. У протилежному випадку було б неможливо грати в ігри, такі як теніс чи футбол. Усякий раз, коли м'яч злітав би в повітря, земля рухалася б під ним зі швидкістю 30 км/сек.

Спеціальна теорія відносності – це крок уперед від класичної відносності Ньютона. Вона стверджує, що, крім неможливості виявлення руху потяга за допомогою механічного експерименту, неможливо також виявити цей рух за допомогою оптичного експерименту, точніше, за допомогою експерименту з електромагнітним випромінюванням. Коротко спеціальну теорію можна сформулювати так: неможливо виміряти рівномірний рух якимось абсолютним способом. Якщо ми знаходимося в м'якому потязі, який рівномірно рухається, то, щоб переконатися, що ми рухаємося, потрібно виглянути у вікно й подивитися на якийсь інший об'єкт, скажімо, на телеграфний стовп. І навіть тоді ми не зможемо сказати напевно, чи рухається потяг повз стовп, чи стовп повз потяг. Єдине, що ми можемо зробити, це сказати, що потяг і земля перебувають у стані відносного рівномірного руху.

Відзначимо постійне повторення в останньому абзаці слова "рівномірний". Рівномірний рух – це рух по прямій лінії з постійною швидкістю. Нерівномірний, чи прискорений, рух – це рух, що пришвидшується чи сповільнюється (коли він сповільнюється, кажуть, що прискорення негативне), або рух по шляху, який не є прямою лінією. Про прискорений рух спеціальна теорія відносності не може сказати нічого нового.

Відносність рівномірного руху здається досить безневинною, але насправді

вона негайно занурює нас у дивний новий світ, який спочатку найбільше нагадує безглуздий світ за дзеркалом Льюїса Керолла. Тому що якщо не існує способу виміряти рівномірний рух відносно універсальної нерухомої системи відліку, подібної до ефіру, то тоді світло повинно поводитися зовсім фантастично, що суперечить усякому досвіду.

Розглянемо космонавта в космічному кораблі, що летить уздовж світлового променя. Корабель рухається зі швидкістю, яка дорівнює половині швидкості світла. Якщо космонавт зробить відповідні вимірювання, він виявить, що промінь усе одно проходить повз нього зі своєю звичайною швидкістю 300000 км/сек. Поміркуйте над цим трохи, і ви незабаром зрозумієте, що так і повинно бути, якщо відкинути поняття ефірного вітру. Якби космонавт встановив, що світло рухається стосовно нього повільніше, він виявив би той самий ефірний вітер, який не вдалося відшукати Май-кельсону й Морлі. Інший випадок, якби його космічний корабель летів прямолінійно в напрямку до джерела світла зі швидкістю, яка дорівнює половині швидкості світла; чи виявив би він, що промінь наближається до нього в півтора рази швидше? Ні, промінь усе одно рухався б назустріч йому зі швидкістю 300000 км/сек. Як би космонавт не рухався щодо променя, його вимірювання завжди будуть давати для швидкості променя ту ж саму величину.

Часто можна почути, що теорія відносності робить усе у фізиці відносним, що вона руйнує всі абсолюти. Подібна думка ще далі від істини. Теорія робить відносними деякі поняття, які раніше вважалися абсолютними, але при цьому вводить нові абсолюти. У класичній фізиці швидкість світла була відносною в тому розумінні, що вона повинна була змінюватися залежно від руху спостерігача. У спеціальній теорії відносності швидкість світла стає в цьому розумінні новим абсолютном. Неважливо, як рухаються джерело світла або спостерігач, – швидкість світла відносно спостерігача ніколи не змінюється.

Уявімо собі два космічних кораблі А і Б. Нехай у космосі немає нічого, крім цих двох кораблів. Вони рухаються назустріч один одному з постійною швидкістю. Чи є який-небудь спосіб, щоб астронавти на кожному з кораблів могли вирішити, який із перелічених трьох випадків є "істинним", або "абсолютним"? Ось ці випадки:

- а) корабель А перебуває у стані спокою, корабель Б рухається;
- б) корабель Б перебуває в стані спокою, корабель А рухається;
- в) обидва кораблі рухаються.

Ейнштейн дає таку відповідь: ні, такого способу не існує. Космонавт на кожному з кораблів може, якщо захоче, вибрати корабель /1 як нерухому систему відліку. Немає ніяких експериментів, включаючи досліди зі світлом або будь-якими іншими електричними чи магнітними явищами, які б довели, що цей вибір неправильний. Те ж саме є справедливим, якщо космонавт вибере корабель Б як нерухому систему відліку. Якщо він воліє розглядати обидва кораблі, що рухаються, він просто вибере нерухому систему відліку поза цими кораблями – точку, відносно якої обидва кораблі рухаються. Не варто ставити питання, який вибір "правильний", а який ні. Говорити про абсолютний рух кожного з кораблів – це значить говорити про щось таке, що не має змісту. Реальним є тільки одне: відносний рух, у результаті якого кораблі зближуються з постійною швидкістю.

Ми не можемо заглиблюватися в технічні деталі спеціальної теорії відносності, особливо в деталі, пов'язані з її математичним апаратом. Ми повинні задовольнитися розглядом деяких з найбільш дивних наслідків, які логічно випливають із того, що Ейнштейн називає двома "основними постулатами" своєї

теорії:

1. Не існує способу, щоб встановити, перебуває тіло в стані спокою чи рівномірно рухається відносно нерухомого ефіру.

2. Незалежно від руху джерела світло завжди рухається через порожній простір з однією і тією ж постійною швидкістю.

(Другий постулат не слід змішувати, як це часто роблять, зі сталістю швидкості світла відносно спостерігача, який рівномірно рухається. Це положення випливає з постулатів.)

Інші фізики, звичайно, розглядали обидва постулати. Лоренц спробував примирити їх у своїй теорії, де абсолютні довжини й часи змінювалися в результаті тиску ефірного вітру. Більшість фізиків сприйняли це як занадто радикальне порушення здорового глузду. Вони воліли вважати, що постулати несумісні й принаймні один з них повинен бути хибним. Ейнштейн дослідив цю проблему більш глибоко. Постулати несумісні тільки в тому випадку, стверджує він, якщо ми відмовляємося відкинути класичну точку зору, що довжина й час є абсолютними.

Коли Ейнштейн опублікував свою теорію, то не знав, що Лоренц міркував у тому ж напрямку, але, як і Лоренц, він зрозумів, що результати вимірювання довжини й часу повинні залежати від відносного руху об'єкта й спостерігача. Однак Лоренц пройшов тільки половину шляху. Він зберіг поняття абсолютної довжини й часу для тіл, які перебувають у стані спокою. Лоренц вважав, що ефірний вітер спотворює "істинні" довжину й час. Ейнштейн пройшов цей шлях до кінця. Ефірного вітру не існує, заявив він. Немає потреби в поняттях абсолютної довжини й часу. Це ключ до спеціальної теорії Ейнштейна. Коли він його повернув, усі замки почали повільно відкриватися.

Щоб наочно пояснити спеціальну теорію, Ейнштейн запропонував свій знаменитий уявний експеримент. Уявімо собі спостерігача М, який стоїть біля залізничного полотна. На деякій відстані в напрямку руху знаходиться точка Б. На такій же відстані проти напрямку руху є точка А. Нехай сталося так, що одночасно в точках А і Б спалахує блискавка. Спостерігач вважає, що ці події одночасні, тому що він бачить обидва спалахи в ту саму мить. Оскільки він знаходиться посередині між ними й оскільки світло поширюється з постійною швидкістю, то він робить висновок, що блискавка вдарила одночасно в цих двох точках.

Тепер припустимо, що, коли вдаряє блискавка, уздовж полотна в напрямку від А до Б з великою швидкістю рухається потяг. У той момент, коли відбуваються обидва спалахи, спостерігач усередині потяга – назовемо його АГ – знаходиться саме напроти спостерігача М, який стоїть біля полотна. Оскільки М' рухається в напрямку до одного спалаху і віддаляється від іншого, він побачить спалах у Б раніше, ніж в А. Спостерігач М, знаючи, що він рухається, візьме до уваги скінченність швидкості світла й також зробить висновок, що спалахи відбулися одночасно.

Усе дуже добре. Але відповідно до двох основних постулатів спеціальної теорії (підтверджених досвідом Майкельсона-Морлі) ми можемо з таким же правом припустити, що потяг перебуває у стані спокою, тоді як Земля швидко рухається назад під його колесами. З погляду М спостерігача в потязі, спалах у Б справді відбувся раніше, ніж в А, – тобто в тій послідовності, в якій він їх спостерігав. Він знає, що знаходиться посередині між цими спалахами і, оскільки вважає себе нерухомим, змушений визнати, що спалах, який він побачив першим, відбувся раніше, ніж той, який він бачив другим.

М, спостерігач на Землі, змушений погодитися. Правда, він бачить спалахи як одночасні, але тепер ми припускаємо, що він рухається. Коли М візьме до уваги швидкість світла і той факт, що він рухається назустріч спалаху в А і від спалаху в 2>, то зробить висновок, що спалах у Б повинен був відбутися раніше.

Отже, ми змушені визнати, що на питання, чи були спалахи одночасними, не можна відповісти абсолютно однозначно. Відповідь залежить від вибору системи відліку. Звичайно, якщо дві події відбуваються одночасно в одній і тій же точці, то можна абсолютно впевнено сказати, що вони одночасні. Коли два літаки зіштовхуються в повітрі, немає такої системи відліку, в якій ці літаки розвалилися б неоднаково. Але чим більша відстань між подіями, тим суужніше вирішити питання про їх одночасність. Справа не в тому, що ми просто не здатні довідатися про справжній стан справи. Немає реального істинного стану справи. Не існує абсолютного часу для Всесвіту, яким можна було б виміряти абсолютну одночасність. Абсолютна одночасність подій, що відбуваються в різних точках простору, є поняттям, яке позбавлене змісту

Усю радикальність такого уявлення можна зрозуміти з уявного експерименту, в якому розглядаються величезні відстані й величезні швидкості. Припустимо, що хтось на планеті Х, в іншій частині нашої Галактики, намагається зв'язатися із Землею. Він посилає радіосигнал. Цей сигнал, зрозуміло, являє собою електромагнітну хвилю, що поширюється в просторі зі швидкістю світла. Припустимо, що Земля й планета Х розділені відстанню, що становить приблизно 10 світлових років. Це означає, що потрібно 10 років для того, щоб сигнал досягнув Землі: За дванадцять років до того, як радіоастроном на Землі одержує сигнал, цього астронома нагороджують Нобелівською премією. Спеціальна теорія дозволяє нам сказати, без будь-яких застережень, що він одержав цю премію раніше, ніж було послано сигнал із планети Х.

Через десять хвилин після одержання сигналу цей астроном чхає. Спеціальна теорія відносності дозволяє нам сказати, також без будь-яких застережень, що астроном чхнув після того, як було послано сигнал із планети Х.

Припустимо тепер, що в якийсь момент часу протягом тих 10 років, коли радіосигнал прямував до Землі (скажімо, за 3 роки до того, як сигнал був отриманий), астроном упав зі свого радіотелескопа й зламав ногу. Спеціальна теорія не дозволяє нам сказати без застережень, що він зламав ногу раніше чи пізніше, ніж було послано сигнал із планети Х.

Доказ полягає в наступному. Спостерігач, який залишає планету Х у той момент, коли посилається сигнал, і рухається до Землі з невеликою швидкістю, якщо її вимірювати відносно Землі, виявить (відповідно до своїх вимірів часу), що астроном зламав ногу після того, як було послано сигнал. Звичайно, він прибуде на Землю набагато пізніше після одержання сигналу, можливо, через століття. Але коли він обчислить дату посилення сигналу за своїм годинником, вона буде більш ранньою, ніж дата, коли астроном зламав ногу. Інший спостерігач, який також залишає планету Х у той момент, коли посилається сигнал, але летить зі швидкістю, близькою до швидкості світла, виявить, що астроном зламав ногу до того, як було послано сигнал. Замість того, щоб витратити століття на свою подорож, він здійснить її, скажімо, за ненабагато більше, як за 10 років, якщо вимірювати час на Землі. Але внаслідок уповільнення часу в космічному кораблі, який швидко рухається, космонавту в цьому кораблі буде здаватися, що він здійснив свою подорож усього лише за кілька місяців. На Землі йому скажуть, що астроном зламав

ногу не більш як 3 роки тому. Годинник космонавта свідчитиме, що сигнал було послано кілька місяців назад. Він зробить висновок, що астроном зламав ногу за кілька років до того, як сигнал пішов із планети Х.

Якби космонавт летів так само швидко, як і світло (зрозуміло, це тільки припущення, насправді ж це неможливо), його годинник зовсім би зупинився. Йому б здавалося, що переліт відбувся миттєво. З його погляду, обидві події – посилення сигналу і його одержання – були б одночасними. Усі події, що відбулися на Землі протягом 10 років, здавалися б йому такими, що трапилися раніше, ніж було послано сигнал. Але, відповідно до спеціальної теорії, не існує "загальної" системи відліку: немає ніяких підстав віддати перевагу точці зору одного спостерігача, а не іншого. Обчислення, які виконав космонавт, що летів швидко, настільки ж законні, настільки ж "істинні", як і обчислення, які виконав космонавт, що летів повільно. Немає універсального, абсолютного часу, до якого можна було б вдатися, щоб встановити відмінності між ними.

Це руйнування класичного поняття абсолютної одночасності є, без сумніву, найбільш "прекрасним несподіваним" аспектом спеціальної теорії. Ньютон вважав очевидною істиною, що один універсальний час тече у всьому космосі. Так само вважали Лоренц і Пуанкаре. Саме це перешкодило їм відкрити спеціальну теорію раніше від Ейнштейна. Завдяки своїй геніальності Ейнштейн зрозумів, що теорію неможливо сформулювати вичерпно, логічно без повної відмови від поняття універсального космічного часу.

Існує, як вважав Ейнштейн, тільки місцевий час. На Землі, наприклад, кожний летить у просторі з однією і тією ж швидкістю: отже, всі годинники показують один і той самий "земний час". Місцевий час такого типу для об'єктів, що рухаються подібно до Землі, називається "власним часом" даного об'єкта. Усе ще існують абсолютні "до" і "після" (очевидно, жоден космонавт не може померти до свого народження), але якщо події розділені великими відстанями, то існують тривалі часові інтервали, у межах яких неможливо сказати, яка з двох подій відбувалася раніше чи пізніше. Відповідь залежить від руху спостерігача відносно цих двох подій. Зрозуміло, рішення, отримане одним спостерігачем, настільки ж "істинне", як і інше рішення, отримане іншим спостерігачем. Усе це із залізною логікою впливає із двох основних постулатів спеціальної теорії.

Коли поняття одночасності втратило сенс, втратили сенс й інші поняття. Відносним став час, оскільки спостерігачі по-різному оцінюють його. Час, що розділяє одні й ті самі події, неоднаковий з точки зору кожного із спостерігачів. Довжина також стала відносною. Довжину потяга, який рухається, не можна виміряти, якщо невідомо точно, де знаходяться його передній і задній краї в один і той же момент часу. Якщо хтось повідомить, що о 1-ій годині 00 хв передній край потяга знаходився точно проти нього, а задній край був за 1 км від нього в якийсь момент між 12 годиною 59 хв і 1 годиною 01 хв, то, мабуть, не існує способу визначити справжню довжину цього потяга. Іншими словами, спосіб встановлення точної одночасності істотний для точних вимірювань відстаней і довжин об'єктів, що рухаються. За відсутності такого способу довжини об'єктів, які рухаються, стають залежними від вибору системи відліку.

Наприклад, якщо два космічних кораблі перебувають у стані відносного руху, то спостерігач на кожному з кораблів буде бачити інший корабель, який став коротшим у напрямку свого руху. При звичайних швидкостях це скорочення надзвичайно мале. Земля, яка рухається навколо Сонця зі швидкістю 30 км/сек,

здалася б нерухомому відносно Сонця спостерігачеві коротшою всього лише на кілька сантиметрів. Однак, коли відносні швидкості дуже великі, зміни стають значними. На щастя, виявилось, що та ж сама формула для скорочення, яку отримали Фітцджеральд і Лоренц для пояснення досліду Майкельсона-Морлі, може бути застосована тут. У теорії відносності скорочення, як і раніше, називається Лоренц-Фітцджеральдовим, але було б більш зрозумілим, якби воно носило інше ім'я, оскільки Ейнштейн дав цій формулі зовсім іншу інтерпретацію.

Для Лоренца і Фітцджеральда скорочення було фізичною зміною, зумовленою тиском ефірного вітру. Для Ейнштейна воно було пов'язане тільки з результатами вимірювань. Нехай космонавт на одному космічному кораблі вимірює довжину іншого корабля. Спостерігачі на кожному з кораблів не помітять ніяких змін довжини свого власного корабля або довжини предметів усередині нього. Однак, коли вони вимірюють інший корабель, то виявлять, що він став коротшим. Фітцджеральд усе ще вважав, що тіла, які рухаються, мають абсолютні "довжини спокою". Коли тіла скорочуються, вони не мають більше своїх "справжніх" довжин. Ейнштейн, відмовившись від ефіру, позбавив змісту поняття абсолютної довжини. Залишилася тільки довжина, отримана в результаті вимірювання, і виявилось, що вона змінюється залежно від відносної швидкості об'єкта й спостерігача.

Ви запитаете, як це може бути, щоб кожен корабель був коротшим за інший? Ви ставите неправильне запитання. Теорія не стверджує, що кожен корабель коротший за інший. Вона стверджує, що космонавт на кожному з кораблів при вимірюванні виявить, що інший корабель коротший. Це зовсім різні речі. Якщо двоє людей стануть з різних боків величезної з обох боків увігнутої лінзи, то кожен з них побачить іншого меншим за себе; але це не те ж саме, що сказати, начебто кожен з них насправді менший за іншого.

Крім удаваних змін довжини, існують також удавані зміни часу. Космонавти на кожному з кораблів виявлять, що годинник на іншому кораблі йде повільніше. Простий уявний експеримент показує, що це справді так. Уявіть собі, що ви дивитесь через бортовий отвір одного корабля в отвір іншого корабля. Обидва кораблі пролітають один повз інший з постійною швидкістю, близькою до швидкості світла. У момент, коли вони проходять поруч, на тому – іншому – кораблі спрямовують промінь світла від стелі до підлоги. Там він потрапляє на дзеркало й відбивається назад до стелі. Ви ж побачите шлях цього променя у вигляді V-подібного шляху. Розділивши довжину на час, ви одержали б швидкість світла. Якби у вас були досить точні прилади (звичайно, такі прилади в наш час не існують), ви могли б зафіксувати час, який потрібний променю, щоб пройти цей шлях.

Тепер припустимо, що, коли ви зафіксували час проходження променем його V-подібного шляху, космонавт усередині іншого корабля робить те ж саме. Для нього корабель є нерухомою системою відліку й світло просто йде вниз і вгору вздовж однієї і тієї ж прямої, проходячи, мабуть, більш коротку відстань, ніж уздовж V-подібного шляху, який спостерігаєте ви. Коли він розділить цю відстань на час, який потрібний променю, щоб пройти вниз і вгору, то теж одержить швидкість світла. Так як швидкість світла постійна для всіх спостерігачів, інший космонавт повинен одержати точно такий же результат, який одержали ви – 300000 км/сек. Але ж у нього шлях, пройдений світлом, коротший. Як може його результат бути тим же самим? Є тільки одне пояснення: його годинник йде повільніше. Зрозуміло, ця ситуація повністю симетрична. Якщо ви спрямуєте промінь знизу і



вгору всередині вашого корабля, то космонавт буде бачити його шлях V-подібним. Він зробить висновок, що ваш годинник відстає.

Той факт, що ці, які збивають з пантелику, зміни довжини й часу названі "удаваними", не означає, що існують "справжні" довжина або час, які різним спостерігачам просто "здаються" різними. Довжина й час є відносними поняттями. Вони не мають сенсу поза зв'язком об'єкта зі спостерігачем. Питання не стоїть так, що одна система вимірювань "істинна", а інша система "помилкова". Кожна система істинна щодо спостерігача, який проводить вимірювання, – щодо його власної системи відліку. Не можна вважати одне вимірювання більш правильним, ніж інше. При цьому все це аж ніяк не оптичні ілюзії, які потребують пояснення психолога. Результати вимірювань можуть записати прилади. Вони не вимагають присутності живого спостерігача.

### **3.2.5 Спеціальна теорія відносності (частина II)**

Довжина й час, як було з'ясовано в попередньому розділі, є відносними поняттями. Якщо один космічний корабель пролітає повз інший з постійною швидкістю, то спостерігачі на кожному з кораблів виявлять, що космонавти на іншому кораблі схудли й пересуваються повільніше. Якщо їх відносна швидкість досить велика, то рухи їхніх колег будуть схожими на рухи акторів в уповільненій кінокартині. Усі явища з періодичним рухом будуть здаватися уповільненими: рух маятника й балансира в годиннику, пульсація серця, коливання атомів і т.д. За словами Артура Стенлі Еддінгтона, видатного англійського астронома, який став одним з найперших і найбільш ревних послідовників Ейнштейна, буде здаватися, що навіть сигари на іншому кораблі жевріють довше. Космонавт, що має зріст два метри, стоячи в кораблі, що горизонтально рухається, як і раніше буде виглядати двометровим, але його тіло здаватиметься тоншим у напрямку руху. Коли ж він ляже, випроставшись у напрямку руху корабля, відновиться нормальна ширина його тіла, але тепер буде здаватися, що його зріст зменшився в напрямку від голови до п'ят.

Якби два космічних кораблі насправді змогли рухатися один відносно іншого з досить великою швидкістю, щоб зробити подібні зміни істотними, то всілякі труднощі технічного характеру не дозволили б спостерігачам на кожному кораблі побачити ці зміни. Письменники люблять пояснювати теорію відносності, вдаючись до спрощених ефектних прикладів. Ці барвисті ілюстрації не описують змін, які насправді можна було б спостерігати або людським оком, або за допомогою будь-яких приладів, відомих у даний час. Про існування цих змін космонавти змогли б, у принципі, довідатися завдяки вимірюванням, якби існували достатньо точні вимірювальні прилади.

На додаток до змін довжини й часу відбувається також релятивістська зміна маси. Маса, грубо кажучи, – це міра кількості речовини в тілі.

Свинцева й коркова кулі можуть мати однакові розміри, але свинцева куля більш масивна. Концентрація речовини в ній вища. Існують два способи вимірювання маси тіла: або зважуванням, або виходячи з того, наскільки велика сила необхідна для того, щоб надати цьому тілу певного прискорення. Перший метод не дуже точний, оскільки одержані результати залежать від сили ваги в даному місці. Свинцева куля, піднята на вершину високої гори, важитиме трохи менше, ніж біля її підніжжя, хоч маса кулі залишиться точно такою ж. На Місяці її вага була б значно меншою, ніж на Землі. На Юпітері ж ця вага виявилася б значно більшою.

Другий метод вимірювання маси дає однакові результати незалежно від того, проводилися вони на Землі, на Місяці або на Юпітері; однак при використанні цього методу відразу ж виникають курйозні запитання. Щоб визначити за допомогою цього методу масу тіла, яке рухається, потрібно виміряти силу, необхідну для надання йому певного прискорення. Зрозуміло, що для того, щоб змусити котитися гарматне ядро, необхідний більш сильний поштовх, ніж для коркової кулі. Маса, виміряна за допомогою такого методу, називається інертною масою – на відміну від гравітаційної маси чи ваги. Подібні вимірювання неможливо виконати без вимірювань часу й відстаней. Інертна маса гарматного ядра, наприклад, виражається через величину сили, яка необхідна для збільшення його швидкості (відстань за одиницю часу) на стільки-то за одиницю часу. Як ми побачили раніше, вимірювання часу й відстаней змінюються зі зміною відносної швидкості тіла й спостерігача. Як наслідок цього змінюються також результати вимірювань інертної маси.

У цьому розділі піде мова тільки про інертну масу, отриману в результаті вимірювань, які виконав якийсь спостерігач. Для спостерігачів, які нерухомі відносно предмета, наприклад, для космонавтів, що везуть у космічному кораблі слона, інертна маса предмета залишається однією і тією ж незалежно від швидкості корабля. Маса слона, виміряна цими спостерігачами, називається його власною масою, або масою спокою. Інертна маса того ж самого слона, яку виміряв який-небудь інший спостерігач, що рухається відносно цього слона (наприклад, спостерігач на Землі), називається релятивістською масою слона. Маса спокою тіла ніколи не змінюється, а релятивістська маса змінюється. Обидва вимірювання є вимірюваннями інертної маси.

Усі три змінні – довжина, час, маса – пов'язуються одним і тим же виразом для лоренцівського скорочення. Довжина й швидкість плину часу змінюються за тим самим законом, так що формула для цих величин одна й та сама. У той же час маса й довжина часових інтервалів змінюються за оберненими законами, а це означає, що формулу тут потрібно записати так:

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

де  $v^2$  – квадрат швидкості тіла, що рухається,

$c^2$  – квадрат швидкості світла.

Масу будь-якого тіла, яку вимірює спостерігач, котрий рухається рівномірно відносно цього тіла, можна одержати, помноживши масу спокою тіла на наведений вище вираз.

Наприклад, якщо відносна швидкість двох космічних кораблів становить 260000 км/сек, спостерігачі на кожному з кораблів будуть вважати, що інший корабель наполовину коротший, годинник на ньому йде в два рази повільніше, тривалість години в два рази довша і маса корабля в два рази більша. Звичайної цим космонавтам на своєму власному кораблі все здаватиметься цілком нормальним. Якби ці кораблі змогли досягти відносної швидкості, що дорівнює швидкості світла, спостерігачі на кожному з кораблів вважали б, що інший корабель скоротив свою довжину до нуля, набувши нескінченної маси, і що час на іншому кораблі уповільнився до повної зупинки!

Якби інертна маса не змінювалася зазначеним вище чином, то неперервна дія

сили, такої, наприклад, як сила, яку розвивають ракетні двигуни, могла б підтримувати зростання швидкості корабля доти, поки ця швидкість не перевищила б швидкості світла. Але цього не відбудеться, оскільки в міру того, як корабель рухається все швидше й швидше (з погляду, скажімо, спостерігача на Землі), його релятивістська маса весь час зростає в тій же пропорції, в якій зменшується його довжина й сповільнюється час. Коли корабель скоротиться до однієї десятої своєї первісної довжини, його релятивістська маса збільшиться в десять разів. Він чинитиме в десять разів більший опір своїм ракетним двигунам; отже, для того, щоб забезпечити те саме збільшення швидкості, потрібна буде сила в десять разів більша, ніж у випадку, коли корабель перебуває у стані спокою. Досягти швидкості світла неможливо ні за яких умов. Якби її можна було досягти, зовнішній спостерігач виявив би, що корабель скоротив свою довжину до нуля, набув нескінченної маси, а його ракетні двигуни діють з нескінченно великою силою. Космонавти всередині корабля не помітили б у себе ніяких змін, але вони побачили б у космосі, як усе пролітає назад зі швидкістю світла, космічний час – зупиненим, кожну зірку – сплющеною до диска й нескінченно масивною.

Тільки в авторів науково-фантастичних творів вистачає сміливості міркувати про те, що зможуть побачити космонавти, якщо вдасться яким-небудь чином подолати світловий бар'єр. Можливо, космос здавався б вивернутим навиворіт і перетворився б на своє власне дзеркальне відображення, зірки мали б негативну масу, а космічний час пішов би назад. Але треба зауважити, що жодне із цих явищ не впливає з формул спеціальної теорії відносності. Якщо швидкість світла перевищено, ці формули дають такі значення довжини, часу й маси, які є, як говорять математики, "уявними числами": числами, що містять квадратний корінь з мінус одиниці.

Вивчивши, що ніщо не може обігнати світло, студенти, які починають вивчення теорії відносності, часто виявлялися збитими з ієнтел нку, зустрівши згадку про швидкості, котрі перевищують швидкість світла. Щоб чіткіше зрозуміти, що повинна дати теорія відносності в цьому випадку, найкраще ввести термін "інерційна система відліку". Коли яке-небудь тіло, наприклад космічний корабель, рухається рівномірно, то вважають, що це тіло й всі інші об'єкти, що рухаються разом з ним у тому ж напрямку і з тією ж швидкістю (як, наприклад, усі об'єкти всередині корабля), пов'язані з однією і тією ж інерційною системою відліку. (Інерційна система відліку є декартова система координат, з якою пов'язаний цей космічний корабель.) Поза зв'язком з певною інерційною системою відліку спеціальна теорія відносності не може застосовуватися і існує багато можливостей спостерігати швидкості, що перевищують швидкість світла.

Розглянемо, наприклад, такий простий випадок. Космічний корабель, що рухається зі швидкістю, що становить три чверті швидкості світла, пролітає над вами, рухаючись на схід. У той же момент інший космічний корабель, що рухається із такою ж швидкістю, пролітає над вами, прямуючи на захід. У вашій системі відліку, пов'язаній з інерційною системою відліку Землі, ці два кораблі пролітають один повз одного з відносною швидкістю, що дорівнює півтори швидкості світла. Вони зближуються із цією швидкістю і розлітаються із цією швидкістю. Ніщо в теорії відносності не забороняє цього. Однак спеціальна теорія відносності наполягає на тому, що якщо ви летите в одному з кораблів, то, обчисливши відносну швидкість цих кораблів, ви повинні одержати значення, яке буде меншим від швидкості світла.

Ми доклали всіх зусиль, щоб уникнути застосування математичного апарату теорії відносності, але, подібно до формули лоренцівського скорочення, формула, що наводиться нижче, занадто проста, щоб не скористатися нею. Якщо  $v_1$  – швидкість одного корабля відносно Землі, а  $v_2$  – швидкість іншого корабля відносно Землі, то швидкість цих кораблів один відносно одного, як це здається із Землі, буде, звичайно, дорівнювати  $v_1$  плюс  $v_2$ . Але, опинившись на місці спостерігача на кожному із цих кораблів, ми повинні скласти швидкості за іншою формулою:

$$\frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}},$$

де  $c$  – швидкість світла.

Легко помітити, що коли швидкості кораблів незначні порівняно зі швидкістю світла, то ця формула дає результат, який майже збігається з тим, що виходить при додаванні двох швидкостей звичайним способом. Але якщо швидкості кораблів дуже великі, ця формула дає зовсім інший результат. Розглянемо граничний випадок і припустимо, що замість космічних кораблів рухаються два промені світла, що проходять над нами в протилежних напрямках. Земний спостерігач побачить, як вони розлітаються зі швидкістю  $2c$ , тобто з подвоєною швидкістю світла. Але якби він рухався разом з одним із цих променів, то, обчисливши відносну швидкість за наведеною вище формулою, він одержав би

$$\frac{c + c}{1 + \frac{c \cdot c}{c^2}},$$

що, звичайно, дає значення, що дорівнює  $c$ . Іншими словами, він побачив би інший промінь, що рухається від нього зі швидкістю світла.

Припустимо, що промінь світла проходить у нас над головою в той же момент, що й космічний корабель, який рухається в протилежному напрямку зі швидкістю  $v$ . В інерційній системі відліку Землі корабель і світло проходять один повз одного зі швидкістю  $c$  плюс  $v$ . Якщо вимірювати швидкість світла в інерційній системі відліку, пов'язаній з космічним кораблем, то в результаті знову одержимо  $c$ .

Поза сферою дії спеціальної теорії відносності, що має справу тільки з інерційними системами, усе-таки можна говорити про швидкість світла як про деяку абсолютну межу. Однак тепер це слід виразити інакше: немає такого способу, який дозволив би відправити сигнал від одного матеріального тіла до іншого зі швидкістю, що перевищує світлову. Поняття "сигнал" використовується тут у широкому розумінні цього слова. Воно містить у собі будь-який тип причинно-наслідкового зв'язку, що дозволяє переслати будь-яке повідомлення: посилення фізичного об'єкта, наприклад, або передавання будь-якого типу енергії, такої, як енергія звукових хвиль, електромагнітних хвиль, ударних хвиль у твердому тілі й так далі. Не можна відправити повідомлення на Марс зі швидкістю, що перевищує швидкість світла. Цього не можна зробити, написавши листа й відправивши його в ракеті, оскільки, як ми бачили раніше, відносна швидкість ракети завжди повинна бути меншою від швидкості світла. Якщо повідомлення закодувати й відправити за допомогою радіо або радара, то воно дійде зі швидкістю світла. Ніякий інший тип

енергії не зможе забезпечити більш швидку передачу цього коду.

Хоч сигнал і не можна послати зі швидкістю, що перевищує швидкість світла, але можна спостерігати певні типи рухів, що будуть мати стосовно спостерігача надсвітлові швидкості. Уявіть собі гігантські ножиці з лезами, які сягають планети Нептун. Ножиці починають закриватися з постійною швидкістю. У міру того, як це відбувається, точка, в якій перетинаються краї лез, що ріжуть, буде рухатися до кінців ножиць з усе зростаючою швидкістю. Уявіть собі, що ви сидите на нерухомому стрижні, який скріплює обидва леза. Стосовно вашої інерційної системи відліку ця точка перетинання лез незабаром буде віддалятися від вас зі швидкістю, більшою за швидкість світла. Звичайно, тут відбувається рух не матеріального тіла, а геометричної точки.

Можливо, вам прийде в голову така думка: припустимо, що кільця ножиць знаходяться на Землі, а точка перетину лез – на Нептуні. Якщо ви злегка закриваєте ножиці, а потім відкриваєте, повторюючи це багаторазово, то точка перетину буде ходити вперед – назад. Чи не можна тепер передати сигнали на Нептун майже миттєво? Не можна, оскільки імпульс, що приводить у рух леза, повинен передаватися від молекули до молекули, а швидкість цього процесу повинна бути меншою від світлової. У загальній теорії відносності немає абсолютно твердих тіл. Інакше ви могли б просто взяти твердий стрижень довжиною від Землі до Нептуна й передавати повідомлення миттєво, примушуючи рухатися один кінець. Не існує способу, який дозволив би використовувати гігантські ножиці чи будь-який інший тип так званих абсолютно твердих об'єктів для передавання сигналу зі швидкістю, що перевищує швидкість світла.

Важливим наслідком спеціальної теорії відносності, який ми коротко розглянемо, є те, що за певних умов енергія переходить у масу, а за деяких інших умов навпаки – маса переходить в енергію. Раніше фізики вважали, що повна, кількість маси у Всесвіті ніколи не змінюється, як і ніколи не змінюється повна кількість енергії. Це виражалось законами "збереження маси" та "збереження енергії". Тепер обидва ці закони об'єднані в один простий закон "збереження маси – енергії".

Коли ракетні двигуни надають прискорення космічному кораблю, то частина енергії йде на збільшення релятивістської маси корабля. Якщо енергія передається кавнику шляхом нагрівання (при цьому прискорюються його молекули), вміст кавника справді важить дещо більше, ніж раніше. Коли кавник остигає, його маса зменшується. Заводячи годинник, ми надаємо йому енергії, і він у той же час дістає додатково невелику кількість маси. Коли завод закінчується, годинник втрачає цю масу. Ці збільшення й зменшення маси настільки нескінченно малі, що їх ніколи не враховують у звичайних фізичних розрахунках. Однак ці перетворення маси на енергію зовсім не мізерні, коли йдеться про роботу атомної електростанції.

Енергія, яку випромінює Сонце, має подібне походження. Унаслідок величезної сили ваги на Сонці газоподібний водень усередині нього зазнає настільки великого тиску й нагрівається до настільки високої температури, що атоми водню поєднуються, перетворюючись на гелій. У результаті деяка кількість маси перетворюється на енергію. Формула, що виражає співвідношення між масою й енергією, яка тепер відома кожному, така:

$$\varepsilon = m \cdot c^2,$$

де  $\varepsilon$  – енергія;

$m$  – маса;

$c^2$  – квадрат швидкості світла.

Ейнштейн одержав цей вираз зі своєї спеціальної теорії відносності. Із цієї формули випливає, що надзвичайно мала кількість маси здатна вивільнити колосальну кількість енергії. Життя на Землі не існувало б без сонячної енергії, так що, в певному розумінні, життя залежить від цієї формули. Може статися, що кінець життя на Землі також буде пов'язаний із цією формулою, якщо застосовувати її до вибуху атомної бомби. Не буде перебільшенням стверджувати, що навчитися давати раду тому, що виражається цією простою формулою, – найважливіша проблема із-поміж тих, котрі коли-небудь поставали перед людством.

Однак бомба – це тільки один найбільш вражаючий факт із-поміж багатьох, що підтверджують спеціальну теорію відносності. Експериментальні докази почали накопичуватися, ледь тільки висохло чорнило на статті Ейнштейна, написаній у 1905 р. У наш час це одна з найбільш ґрунтовно підтверджених теорій сучасної фізики. Її щодня підтверджують у лабораторіях учені-атомники, які працюють з частинками, що рухаються зі швидкостями, близькими до швидкості світла. Чим швидше рухаються подібні частинки, тим більша сила необхідна для того, щоб збільшити їхню швидкість на задану величину; іншими словами, тим більша їхня релятивістська маса. Саме із цієї причини фізики продовжують створювати все більші й більші машини для прискорення частинок. Потрібні все сильніші поля, щоб перебороти масу частинок, що зростає в міру того, як їхня швидкість стає ближчою і ближчою до швидкості світла. Електрони тепер можна прискорювати до швидкості, що становить 0,999999999 швидкості світла. При цьому кожен електрон набуває маси (відносно інерційної системи відліку Землі), яка приблизно в сорок тисяч разів більша, ніж його маса спокою.

Коли яка-небудь частинка зіштовхується зі своєю античастинкою (частинкою, що має точно таку ж структуру, але протилежний електричний заряд), відбувається повна і взаємна їх анігіляція. Уся маса обох частинок цілком перетворюється на енергію випромінювання. У лабораторії цей процес допоки проводиться тільки з окремими частинками. Якщо фізикам коли-небудь вдасться створити антиречовину (речовину, побудовану з античастинок), то вони зможуть досягти піку у використанні атомної енергії. На космічному кораблі невелику кількість антиречовини, яка підтримується магнітними полями в завислому стані, можна з'єднувати потроху з речовиною, що забезпечить корабель енергією, достатньою для того, щоб нести його до зірок.

Спеціальна теорія відносності настільки повно підтверджена експериментально, що тепер важко знайти фізика, який би сумнівався в правильності цієї теорії.

### **3.2.6 Принцип еквівалентності**

Матеріал, який ми розглядали дотепер, належить до так званої "спеціальної" теорії відносності. Перед тим, як ми завершимо обговорення сутності теорії відносності, нам необхідно коротко розглянути предмет "загальної" теорії відносності, хоч ми й не зможемо зробити цього з усією повнотою.

Дотепер нас цікавило тільки порівняння точок зору спостерігачів, які рухаються один відносно іншого з постійною швидкістю. Загальна теорія відносності має справу із тим, як буде сприймати закони фізики спостерігач, який зазнає прискорення. Зрозуміло, що в цьому випадку для спостерігача, який

рухається, зовнішній світ буде здаватися іншим. Пасажир у потязі, який збільшує швидкість або різко гальмує, безсумнівно, помітить вплив цього прискорення. Яка природа його відчуттів? Відповідно до закону Ньютона, добуток маси на прискорення дорівнює силі. Щоб змусити нас рухатися разом з потягом, який набуває прискорення, сидіння й підлога вагона повинні діяти на нас з деякою силою. Без цієї сили всі предмети намагалися б рухатися рівномірно й прямолінійно і тому набували б відносно потяга прискорення в протилежному напрямку. Це те ж саме, як коли б у спокої перебував потяг, а на нас діяло силове поле, аналогічне полю тяжіння, що тягло б нас назад. Справді, у потязі, що рухається з постійним прискоренням, легко виникає ілюзія, що вагон нахилився й тому наша вага тягне нас назад.

Будь-яке прискорення створює такий же ефект, як і поле тяжіння. Уявімо, що ми знаходимося в закритій шухляді, схожій на кабіну ліфта, розташованій де-небудь у порожньому просторі, удалині від Землі й інших тіл, так що відсутні сили всесвітнього тяжіння. Тоді всі предмети в цій кабіні (шухляді) будуть вільно плавати. Якщо ми відіпхнемося ногами від підлоги, то почнемо рухатися вгору, поки не вдаримося об стелю. Цей стан речей нам уже знайомий з книг і кінофільмів про міжпланетні подорожі. Припустимо тепер, що раптово ми знову відчули свою вагу й зауважили, що предмети падають на нас. Це може мати два пояснення: або наша шухляда дійсно є кабіною ліфта і він почав прискорюватися в напрямку вгору, або ми можемо сказати, що кабіна наша все-таки перебуває у стані спокою (або рухається з постійною швидкістю), але ми знаходимося тепер поблизу Землі або якої-небудь іншої планети й на нас діє тяжіння.

Ми не могли б відповісти на це питання, навіть якби в стелі було маленьке вікно й через нього ми могли б бачити канат, прив'язаний до вершини нашої кабіни, і видно було б, що він натягнутий. Очікувати цього результату можна було б у випадку будь-якої точки зору: як у результаті дії прискорення, так і внаслідок підтримки нашої кабіни у завислому стані завдяки дії сил тяжіння.

Навпаки, якби ми подорожували у звичайному ліфті і канат порвався, так що кабіна почала вільно падати зі своїм умістом, то ми відчули б почуття невагомості, тому що сила вага надала б нам такого ж прискорення, як і кабіні, так що не потрібно було б ніякої сили, яка б підтримувала наше положення відносно кабіни. Ми не могли б сказати, чи падає насправді наша кабіна, чи раптово перестало діяти тяжіння Землі (ці сумніви продовжувалися б, звичайно, лише доти, поки ми не вдарилися б об дно шахти).

Це є одним з небагатьох пунктів, в якому зазвичай така реальна уява Жуля Верна привела б його до серйозної помилки. У його "З гармати на Місяць" пасажирів зазнають відчуття втрати ваги тільки в точці, де притягання Землі й Місяця взаємно компенсують одне одне. Вони повинні були б відчувати це протягом усього шляху, як тільки припинив свою дію механізм, що рухає їх космічний корабель і він перестав зазнавати тертя об земну атмосферу, і тому вільно рухався б у полі земного тяжіння.

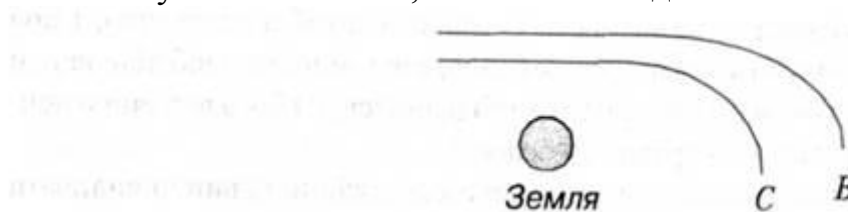
Ми можемо зробити висновок, що прискорення не залишають незмінними закони фізики, а дають такий же ефект, як і гравітаційне поле. Цей "принцип еквівалентності", що є важливим аспектом загальної теорії відносності, істотно залежить від того факту, що вага тіл прямопропорційна їх масам, так що поле тяжіння надає їм однакових прискорень. Загальна теорія відносності ґрунтується на тій точці зору, що прискорення всіх систем відліку, в яких ми здійснюємо наші

спостереження, насправді не тільки ніяк не відрізняються на практиці від ефекту гравітаційного поля, але обидва вони є за своєю суттю одним і тим самим і їх неможливо розділити навіть у принципі.

Це неозначає, що ми змогли б розташувати нашу лабораторію таким чином, щоб цілком звільнитися від усього притягання Землі, хоча б, наприклад, тому, що це потребувало б розміщення навколо всієї Землі спостерігачів у кабінах, які вільно падають, і, звичайно, вони вдарилися б незабаром об Землю, якби не зіштовхувалися ще до цього один з одним. Лише на малій ділянці простору й протягом короткого проміжку часу ми можемо спостерігати за рухом предмета з погляду спостерігача, для якого не існує поля тяжіння.

### 3.2.7 Загальна теорія відносності

Якби ми спробували в такий спосіб побудувати опис природи, то, створюючи свою механіку у кабіні, яка перебуває в стані вільного падіння, ми прийшли б до висновку, що простір має дивні властивості. Припустимо, наприклад, що наша кабіна з великою швидкістю прилітає з далеких відстаней (із глибини Всесвіту) і швидкість її настільки велика, що притягання Землі недостатньо, щоб змусити кабінку зіштовхнутися із Землею, і вона лише відхиляється на незначний кут.



На малюнку лінія В відповідає шляху нашої кабіни. Припустимо також, що поблизу, паралельно нам і з такою ж швидкістю рухається друга кабіна С з іншим спостерігачем. Доти, доки ми не наблизимося до Землі, С буде знаходитися від нас на постійній відстані, але, проходячи ближче до Землі, вона, як це показано на малюнку, відхилиться сильніше й далі буде рухатися в іншому напрямку, віддаляючись від нас. Як спостерігач, що знаходиться в кабіні С, так і ми перебуваємо у вільному русі й тому не помічаємо відчуття прискорення. Відповідно до теорії відносності, ми перебуваємо у стані спокою. Але незабаром ми виявимо, що відстань між нами починає раптово збільшуватися, хоч ніхто, з нас не починав рухатися.

Іншими словами, усунувшись від вирішення питання про спокій або рух і вибираючи за орієнтири будь-які предмети, що можуть рухатися вільно, ми можемо виявити існування гравітаційного поля, а звідси – наявність масивних тіл де-небудь по сусідству, що впливає з поведінки відстаней між нашими орієнтирами. На цьому базується опис гравітаційного поля в термінах властивостей простору й часу. Щоб мати більш докладний опис, потрібно було б занадто багато математики, але ми згадаємо про два висновки, що випливають із вищесказаного.

Один полягає в тому, що світло в гравітаційному полі не поширюється прямолінійно, а зазнає відхилення. Справді, це можна вивести вже з того доведеного в спеціальній теорії відносності факту, що маса та енергія еквівалентні. Промінь світла несе енергію і, отже, масу, а оскільки будь-яка маса притягається важким тілом, подібним, наприклад, до Сонця, то це справджуватиметься і щодо світлового променя. Величина відхилення, однак, не впливає однозначно із цього простого аргументна, тому що сила притягання об'єкта, що рухається, залежить від його швидкості. Це несуттєво для малих швидкостей, з якими, звичайно, ми маємо справу на практиці, але приводить до деякої відмінності, коли швидкість дорівнює



швидкості світла. Проходячи поблизу Сонця, світло повинно відхилитися на величину, яку можна обчислити, і тому зірка, яку ми бачимо поблизу краю Сонця, насправді буде здаватися трохи зміщеною від свого нормального положення\*. Звичайно, як правило, неможливо побачити зірку, коли вона знаходиться поблизу від Сонця, але така можливість з'являється під час повного сонячного затемнення, коли диск Сонця закриває Місяць і зірки стають видимими. Навіть у цьому випадку необхідні дуже точні спостереження зміщення, оскільки очікувана величина становить менше двох дугових секунд, що відповідає куту, під яким видно копійку, якщо спостерігати її з відстані три кілометри. Проте точні астрономічні спостереження дозволяють визначити подібне зміщення, і хоч астрономи все ще використовують кожне зручне сонячне затемнення, щоб підвищити точність своїх результатів, доведено вже, що таке зміщення існує і його величина приблизно узгоджується із загальною теорією відносності.

Інший важливий висновок полягає в тому, що поле тяжіння повинно впливати на масштаб часу, чи, точніше, нам повинно здаватися, що годинник, який знаходиться поблизу дуже масивної зірки, відстає. Це також можна перевірити, оскільки світло від гарячих зірок містить випромінювання тільки певних кольорів, тобто деяких певних частот, що, як ми знаємо, пов'язано з електричними коливаннями атомів певної частоти, що схоже на дію мініатюрних радіопередавачів. Ці атоми можна розглядати як стандартний годинник, тому що їхній період коливань є внутрішньою характеристикою атома й не залежить від зовнішніх обставин. Тепер відомо, що ці специфічні промені від деяких дуже масивних зірок мають не той самий колір, як такі ж промені від більш легких зірок; їх колір визначається червоним зміщенням.

Це узгоджується із твердженнями загальної теорії відносності. Ми повинні припустити, що, з погляду спостерігача, на поверхні зірки атомний "годинник" показуватиме правильний час, але через залежність масштабу часу від гравітаційного потенціалу для тих, хто спостерігає з великої відстані, буде здаватися, що годинник відстає, частота світла менша й наявне червоне зміщення.

Такий вплив гравітаційного потенціалу на хід годинника цікавий також завдяки його зв'язку з парадоксом, який ілюструє тісний зв'язок між ідеями загальної і спеціальної теорій відносності.

Іноді заперечують, що спеціальна теорія відносності неспроможна передбачити уповільнення ходу часу. Припустимо, що ми та інший спостерігач рухаємося один відносно одного з великою швидкістю і виявляємо, що при зустрічі наші годинники показують один і той же час. Тепер, якщо вважати, що ми перебуваємо у стані спокою, можна стверджувати, що годинник іншого спостерігача повинен відставати. У свою чергу, він сказав би, що повинен відставати наш годинник, тому що ми рухаємося з великою швидкістю. Очевидно, цього не можна спростувати, якщо ми перебуваємо один від одного на великій відстані, оскільки не можемо однозначно порівнювати час настання подій, які відбуваються у віддалених місцях. Однак, припустивши, що пізніше ми знову зустрінемо іншого спостерігача, можна сподіватися, що, порівнявши годинники, вдасться з'ясувати, який з них відставав відносно іншого, і хто насправді рухався.

У рамках спеціальної теорії відносності правильна відповідь на це заперечення полягає в тому, що, так як обидва спостерігачі рухаються один відносно одного рівномірно й прямолінійно, вони ніколи не зустрінуться знову. Якщо ж вони знову зустрінуться, то, принаймні, один з них повинен або повернути назад, або змінити

напрямок свого руху і зазнати дії прискорення, так що він уже не може припускати, що весь час перебував у стані спокою.

Загальна теорія відносності дає більш повну відповідь. Для простоти міркувань припустимо, що ми рухалися без прискорення, у той час як інший спостерігач, пройшовши деяку відстань, зупинився й повернув назад. Відповідно до загальної теорії відносності, він може припускати, що увесь час перебував у стані спокою, але в присутності гравітаційного поля. Це пояснить походження сил, що діють на нього (які ми приписуємо його прискоренню). Як ми побачили, гравітаційні потенціали впливають на хід годинника, і якщо це послідовно застосувати до розглянутої ситуації, відповідь полягає в тому, що знову, з обох точок зору, показання обох годинників повинні порівнюватися в такий же спосіб.

Після цього дуже неповного обговорення ми облишимо цей цікавий розділ загальної теорії відносності. Подальше її вивчення, безумовно, сприяє повному розумінню законів природи. Загальна теорія відносності дає важливі висновки, що стосуються проблем великого масштабу, включаючи структуру Всесвіту. Можливо, що в майбутньому з'явиться яке-небудь співвідношення, що пов'яже ці ідеї і з характеристиками процесів малого масштабу, тобто з атомними проблемами, але поки що це співвідношення невідоме.

### **3.3 Закон збереження енергії в макроскопічних процесах**

#### **3.3.1 Робота в механіці, закон збереження та перетворення енергії в механіці**

Серед законів збереження, перерахованих вище, найбільший інтерес становить той, який пов'язаний з енергією.

Ми знаємо, що споживання енергії постійно зростає, що нестача енергії впливає не тільки на повсякденне життя, але і на міжнародні відносини. Уявлення про енергію пов'язане в нашій свідомості з нафтою, вугіллям, падаючою водою, ураном. Енергія не тільки надає руху різним механізмам і обігріває будинки. Вона також необхідна для виробництва всіх предметів, якими ми користуємося і які нас оточують. Усі живі істоти в буквальному значенні поїдають енергію, щоб підтримувати життя.

Дати абсолютно точне, правильне й всеосяжне визначення енергії дуже складно. Адже енергія виявляється в безлічі різних форм. Автомобіль, що рухається, має енергію. Нерухома батарейка електронного годинника має енергію. Камінь на вершині скелі має енергію. Енергія міститься і в чайнику з окропом, і в шматочку вершкового масла, і в сонячному світлі.

Енергія є єдиним мірилом різних форм руху. Можливі два якісно різні способи передачі руху й відповідно передачі енергії від одного макроскопічного тіла до іншого – шляхом здійснення роботи й шляхом теплообміну.

Під процесом здійснення роботи розуміють такий процес взаємодії якого-небудь тіла з іншими тілами, у результаті якого змінюється механічний рух цього тіла або його положення відносно інших тіл. Такими, наприклад, є процеси зіткнення тіл, що рухаються, їхнє гальмування внаслідок явища тертя, а також будь-які процеси переміщення тіл під впливом сил взаємодії між ними.

Зміна енергії тіла в процесі здійснення роботи і називається роботою.

Розглянемо спочатку тільки ті форми енергії, що пов'язані з механічним рухом: кінетичну й потенційну.

Кінетична енергія – це енергія механічної системи, що залежить від швидкості руху її точок. Кінетична енергія матеріальної точки дорівнює половині добутку маси

т цієї точки на квадрат її швидкості  $v$ , тобто

$$\dot{A}_{\text{кін}} = \frac{m \cdot v^2}{2}.$$

Кінетична енергія механічної системи дорівнює сумі кінетичних енергій усіх її точок.

Кінетична енергія зберігається тільки при зіткненнях (взаємодіях) певного типу, коли на тілах, що зіштовхуються, не залишається пошкоджень і вони не злипаються. Такі зіткнення називаються пружними. Тому єдиний спосіб довідатися, чи є зіткнення пружним, – переконавшись, що сумарна кінетична енергія залишається незмінною.

Зміна кінетичної енергії системи при її переміщенні з положення 1 у положення 2 може відбуватися під дією прикладених до системи зовнішніх і внутрішніх сил. Ця зміна кінетичної енергії дорівнює сумі робіт  $A_{12}$  цих сил на даному переміщенні:

$$E_{\text{кін}2} - E_{\text{кін}1} = A_{12}.$$

Фактично, останнє твердження є формулюванням теореми про зміну кінетичної енергії.

Усі сили, з якими має справу макроскопічна механіка, прийнято розділяти на консервативні й неконсервативні. Якщо сили взаємодії залежать тільки від конфігурації матеріальних точок системи (тобто від їхніх координат) і робота цих сил при переміщенні системи з довільного початкового положення в довільне кінцеве положення не залежить від шляху переміщення, а визначається тільки початковою і кінцевою конфігураціями системи, то такі системи називаються консервативними.

Можна довести, наприклад, що сила ваги  $F = m \cdot g$  є консервативною. Консервативними є також сили гравітаційної взаємодії, електростатичної (кулонівської) взаємодії між зарядами.

Усі сили, що не є консервативними, називаються неконсервативними. До них належать, насамперед, так звані дисипативні сили, наприклад, сили тертя, що виникають при ковзанні якого-небудь тіла по поверхні іншого. Сюди ж належать сили опору, яких зазнає тіло, рухаючись у рідкому чи газоподібному середовищі. Усі ці сили залежать не тільки від конфігурації тіл, але і від їхніх відносних швидкостей. Вони спрямовані завжди проти швидкості тіла (щодо поверхні, по якій воно ковзає, чи щодо середовища, в якому воно рухається, зазнаючи опору). Тому якщо тіло ковзає по нерухомій поверхні або рухається в нерухомому середовищі, яке чинить опір, то при будь-якому русі тіла робота сил тертя, що діють на нього, є негативною. Таким чином, дисипативними називаються також сили, повна робота яких при будь-яких рухах у замкнутій системі завжди є негативною.

Необхідно відзначити ще один вид консервативних сил, які називаються гіроскопічними силами. Ці сили залежать від швидкості матеріальної точки й діють завжди перпендикулярно до цієї швидкості. Робота таких сил дорівнює нулю при будь-якому переміщенні матеріальної точки, зокрема при її русі по замкнутому шляху. Прикладом такої сили є сила Лоренца, тобто сила, що діє на заряджену частинку в магнітному полі.

Робота сили, прикладеної до тіла, визначається як

$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha,$$

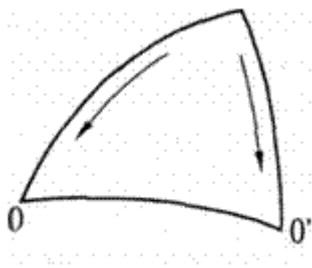
де  $F$  – величина діючої сили;

$s$  – модуль переміщення тіла;

$\alpha$  – кут між напрямком дії сили й напрямком переміщення. Якщо на систему діють тільки консервативні й гіроскопічні сили, то для неї можна ввести поняття потенційної енергії.

Яке-небудь довільне положення системи, що характеризується заданими координатами її матеріальних точок, умовно приймемо за нульове. Робота, яку здійснюють консервативні сили при переході системи з розглянутого положення в нульове, називається потенційною енергією системи. Робота консервативних сил не залежить від шляху переміщення, а тому потенційна енергія системи при фіксованому нульовому положенні залежить тільки від координат матеріальних точок у розглянутому положенні. Іншими словами, потенційна енергія системи  $U$  є функцією тільки її координат.

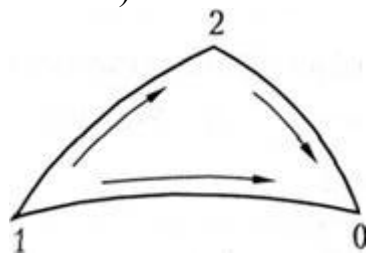
Значення потенційної енергії залежить від того, яке положення системи умовно прийняти за нульове. Якщо за нульове прийняти положення  $0$  (див. мал.),



то в положенні 1 система матиме потенційну енергію  $U = A_{10}$ , що дорівнює роботі консервативних сил при переході системи з положення 1 в положення 0. Якщо ж за нульове прийняти положення  $0'$ , то потенційна енергія дорівнюватиме  $U' = A_{10'}$ . Унаслідок консервативності сил, що діють у системі, робота уздовж шляху  $10'$  дорівнює роботі уздовж шляху  $100'$ .

Робота постійна, тобто не залежить від координат системи в розглянутому положенні 1. Вона цілком визначається вибором нульових положень  $0$  і  $0'$ . Зрозуміло, що при заміні одного нульового положення на інше потенційна енергія системи змінюється на постійну величину. Таким чином, потенційна енергія системи визначена не однозначно, а з точністю до довільної сталої.

Нехай система перейшла з положення 1 в положення 2 по якому-небудь шляху 12 (див. мал.).



Роботу  $A_{12}$ , виконану консервативними силами при такому переході, можна

виразити через потенційні енергії  $U_1$  й  $U_2$  у станах 1 і 2. Для цього уявимо, що перехід здійснено через нульове положення 0, тобто по шляху 102. Так як сили консервативні, то  $A_{12} = A_{102} = A_{10} + A_{02} = A_{10} - A_{20}$ . За визначенням потенційної енергії  $U_1 = A_{10} + C$ ,  $U = A_{20} + C$ , де  $C$  – та сама стала. Таким чином,  $A_{12} = U_1 - U_2$ ,

тобто робота консервативних сил дорівнює величині зменшення потенційної енергії системи.

Робота  $A_{12}$ , як було показано вище, може бути також виражена через збільшення кінетичної енергії.

$$\text{Тоді } \Delta_{12} = E_{\text{кін}_2} - E_{\text{кін}_1} = U_1 - U_2,$$

$$\text{звідки } E_{\text{кін}_1} + U_1 = E_{\text{кін}_2} + U_2.$$

Сума кінетичної і потенційної енергій системи називається її повною енергією  $E$ . Таким чином,

$$E_1 = E_2 \text{ або}$$

$$E = E_{\text{кін}} + U = \text{const.}$$

У системі з одними тільки консервативними (і гіроскопічними) силами повна механічна енергія залишається незмінною. Можуть відбуватися лише перетворення потенційної енергії на кінетичну й навпаки, але повний запас енергії системи змінитися не може. Це положення називається законом збереження енергії в механіці.

### 3.3.2 Перший закон термодинаміки

Великий інтерес становить проблема: а який вигляд має вираження закону збереження енергії для систем, в яких істотну роль відіграють теплові процеси. Для вивчення таких процесів існує термодинамічний метод, який не враховує внутрішню будову речовин тіл (систем), що вивчаються, і характер руху окремих частинок. Термодинамічний метод базується тільки на вивченні різних перетворень енергії, що відбуваються в системі. Умови цих перетворень і співвідношення між різними видами енергії дозволяють вивчати фізичні властивості досліджуваних систем у найрізноманітніших процесах, у яких ці системи беруть участь. Розділ фізики, у якому фізичні властивості систем вивчаються за допомогою термодинамічного методу, називається термодинамікою.

Термодинаміка вивчає макроскопічні процеси в тілах, тобто такі явища, які пов'язані з колосальною кількістю атомів і молекул, що містяться в тілах.

Термодинаміка, або загальна теорія теплоти, є аксіоматичною наукою. Вона не вводить ніяких спеціальних гіпотез і конкретних уявлень про будову речовини й фізичну природу теплоти. Її висновки ґрунтуються на загальних принципах або началах, що є узагальненням дослідних фактів. Вона розглядає теплоту як вид якогось внутрішнього руху, але не намагається конкретизувати, що це за рух.

Термодинаміка є однією з найважливіших частин фізики. Її висновки достовірні настільки, наскільки достовірні аксіоми, на яких вона побудована. Ці висновки використовуються у всіх розділах макроскопічної фізики: гідродинаміці, теорії пружності, аеродинаміці, ученні про електричні й магнітні явища, оптиці й т.д.

Термодинаміка виникла в першій половині XIX століття як теоретична основа теплотехніки, що почала розвиватися в той час. Її первісним завданням було вивчення закономірностей перетворення теплоти в механічну роботу в теплових двигунах і дослідження умов, за яких таке перетворення є найбільш оптимальним.

Саме таку мету поставив перед собою французький інженер і фізик Саді Карно (1796-1832) у творі "Про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу" (1824 р.), де вперше було закладено основи термодинаміки, хоч і збереглися старі помилкові погляди на теплоту як на якусь невагому речовину – теплород, який не можна ні створити, ні знищити. Пізніше термодинаміка вийшла далеко за межі зазначеної технічної задачі. Центр ваги перемістився на вивчення фізичних питань. Основний зміст сучасної фізичної термодинаміки – вивчення закономірностей теплової форми руху матерії і пов'язаних з нею фізичних явищ. Додатки до теплових двигунів, холодильних установок та інших питань теплотехніки виділилися в самостійний розділ, який називається технічною термодинамікою.

Теплова форма руху матерії – це хаотичний рух атомів і молекул у макроскопічних тілах. Її специфічність пов'язана з колосальною кількістю атомів і молекул у всякому макроскопічному тілі. Так, в одному кубічному метрі повітря за нормальних умов міститься близько  $2,7 \cdot 10^{25}$  молекул.

У процесі теплового руху молекули зіштовхуються між собою і зі стінками посудини, в яку вміщено систему. Зіткнення супроводжуються різкими змінами модуля й напрямку швидкостей молекул. У результаті в системі виникає цілком безладний рух, в якому з однаковою імовірністю можна виявити всі напрямки швидкостей молекул, а самі швидкості змінюються в широких межах від дуже малих до дуже великих значень.

Середня швидкість теплового руху газових молекул дуже велика. Для молекул повітря вона становить при кімнатній температурі майже 500 м/с і з підвищенням температури зростає. Зіткнення між молекулами газу відбуваються надзвичайно часто. Наприклад, молекула повітря за нормальної щільності встигає в середньому пройти всього близько  $10^4$  мм від одного зіткнення до наступного. Знаючи середню швидкість молекули, неважко підрахувати, що при нормальній температурі й щільності молекула повітря за одну секунду зазнає до 5 тисяч зіткнень, причому число зіткнень зростає зі збільшенням температури й щільності газу. Крім поступального руху, відбувається безладне обертання молекул, а також внутрішні коливання атомів, з яких вони складаються. Усе це створює картину надзвичайно хаотичного стану, в якому знаходиться сукупність величезної кількості молекул газів, а також рідких і твердих тіл. Така природа теплоти з погляду молекулярно-кінетичної теорії будови речовини.

Для того, щоб охарактеризувати різний ступінь нагрітості тіл, у термодинаміку вводиться поняття температури.

Уявлення про температуру, як і уявлення про силу, увійшло в науку за посередництвом нашого чуттєвого сприйняття. Наші відчуття дозволяють розрізняти якісні градації нагрітості: теплий, холодний, гарячий й ін. Однак кількісна міра ступеня нагрітості, придатна для науки, не може бути встановлена за допомогою чуттєвого сприйняття. Відчуття суб'єктивні. Залежно від стану руки те саме тіло на дотик може здаватися або теплим, або холодним. Зануримо, наприклад, одну руку в гарячу, а іншу в холодну воду й потримаємо їх там протягом деякого часу. Потім обидві руки опустимо у воду з кімнатною температурою. Тоді перша рука відчує холод, а друга тепло.

Кількісне визначення температури й побудова точної температурної шкали повинні базуватися на об'єктивних фізичних явищах і фактах, вільних від суб'єктивізму чуттєвого сприйняття. Трактувати поняття температури можна з різних точок зору. У феноменологічному вченні про теплоту температура вводиться

через поняття теплової, чи термічної, рівноваги. Більш загальним є поняття термодинамічної рівноваги. Як тому, так і іншому поняттю важко дати логічне визначення. До них приходять у результаті розгляду конкретних прикладів і наступного узагальнення.

Якщо два тіла, температури яких при оцінюванні за допомогою наших органів чуття значно відрізняються між собою, привести до зіткнення одне з одним (наприклад, розпечений метал і холодну воду), то, як показує досвід, одне тіло буде нагріватися, а інше охолоджуватися, поки в системі не припиняться будь-які макроскопічні зміни.

Тоді, застосовуючи термінологію, запозичену з механіки, говорять, що ці два тіла перебувають у стані термодинамічної рівноваги одне з одним і мають однакові температури. Термодинамічна рівновага, як показує досвід, зрештою настає не тільки у випадку зіткнення двох, але й у випадку зіткнення кількох загодно тіл.

Відзначені факти допускають узагальнення. Назвемо ізольованою, або замкнутою, системою систему тіл, які не можуть обмінюватися енергією з навколишніми тілами. Тоді, яким би не був початковий стан тіл ізольованої системи, у ній, зрештою, встановиться термодинамічна рівновага, у якій припиняться всі макроскопічні процеси. Це положення відіграє важливу роль у термодинаміці і є одним з найважливіших постулатів, який іноді називають загальним началом термодинаміки.

Наведемо ще кілька прикладів стосовно встановлення термодинамічної рівноваги. Припустимо, що тверду оболонку, яка не проводить тепло, розділено перегородкою, яка теж є теплоізоляційною, на дві частини. В одній із частин знаходиться рідина, в іншій створено вакуум. Швидко видалимо перегородку. Рідина закипить. У просторі, обмеженому оболонкою, виникає складний рух рідини і її пари. Але, зрештою, він, а також подальше пароутворення рідини припиняться. Одержимо або тільки одну пару (якщо рідини спочатку було мало), або систему, що складається з рідини й насиченої пари. В обох випадках кінцевий стан є станом термодинамічної рівноваги. Це не є стан абсолютного спокою, в якому припиняються всі без винятку процеси. Якщо розглядати цей стан з молекулярної точки зору, то йому властивий неперервний та інтенсивний обмін молекулами між рідиною і паром. Це означає, що безупинно відбувається процес пароутворення рідини й зворотний до нього процес конденсації пари в рідину. Однак у стані термодинамічної рівноваги ці два процеси в цілому як би взаємно компенсують себе: середня кількість молекул, що випаровуються, дорівнює середній кількості молекул, що повертаються з пари назад у рідину. Термодинамічна рівновага, таким чином, – це така динамічна рівновага, коли дуже інтенсивно відбуваються процеси молекулярного масштабу, але всі макроскопічні процеси припиняються. Це стосується будь-якої термодинамічної рівноваги, а не тільки рівноваги, розглянутої в наведеному прикладі.

Якщо в склянку з водою кинути шматок цукру, то початковий стан системи буде термодинамічно нерівноважним – цукор почне розчинятися в рідині. Однак через деякий час, коли процес розчинення припиниться, установеся термодинамічно рівноважний стан; ми матимемо або однорідний розчин, або неоднорідну систему, що складається зі шматка цукру й насиченого розчину навколо нього. В останньому випадку динамічний характер рівноважного стану виявляється в тому, що процес розчинення цукру, якщо його розглядати з молекулярної точки зору, ніколи не припиняється. Однак у стані рівноваги він

компенсується зворотним процесом кристалізації цукру з розчину.

Таким чином, за визначенням, два тіла перебувають у тепловій рівновазі одне з одним або мають однакові температури, якщо в разі теплового контакту між ними рівновага не порушується.

Температура – одна з величин, що залежать тільки від внутрішнього стану тіла.

Нижче на основі другого закону термодинаміки буде показано, як визначається температурна шкала, що не залежить від властивостей тіла, обраного для вимірювання температури.

Абсолютна температура пропорційна середній кінетичній енергії поступального руху молекул речовини. Саме в цьому полягає фізичний зміст температури.

Температура є термодинамічним параметром, або параметром стану системи. Крім температури, термодинамічними параметрами системи є тиск  $p$  і об'єм системи  $V$ .

Параметри стану  $p$ ,  $V$ ,  $T$  системи, що перебуває у стані термодинамічної рівноваги, не є незалежними. Дослідним шляхом можна одержати функціональну залежність рівноважного тиску  $p$  у системі від об'єму  $V$  й температури  $T$ .

$P = P(V, T)$ , тобто одержати рівняння стану системи.

Якщо один з параметрів системи змінюється, то відбувається зміна стану термодинамічної системи; ця зміна стану дістала назву термодинамічного процесу.

Ізопроцесами називаються термодинамічні процеси, що відбуваються в системі з постійною масою при якому-небудь одному постійному параметрі стану.

Ізотермічний процес відбувається за умови постійної температури ( $T = \text{const}$ ).

Ізохоричний (ізохорний) процес відбувається за умови постійного об'єму ( $V = \text{const}$ ).

Ізобаричний (ізобарний) процес протікає за умови постійного тиску ( $p = \text{const}$ ).

Адіабатним (адіабатичним) процесом називається термодинамічний процес, що відбувається в системі без теплообміну із зовнішніми тілами.

Стан системи можна описати за допомогою фізичних величин, які називаються функціями стану. Зміни функцій стану при термодинамічних процесах не залежать від виду цих процесів. Функції стану однозначно визначаються значеннями параметрів початкового й кінцевого станів системи. Найпростішими функціями стану системи є її внутрішня енергія  $U$  й ентропія  $S$ .

Найбільш простий вигляд має рівняння стану ідеального газу. Ідеальним газом називається газ, у якого енергія- потенційної взаємодії між молекулами настільки мала, що нею можна знехтувати, а самі молекули займають настільки малий об'єм порівняно з об'ємом газу, що його можна не брати до уваги. В ідеальному газі молекули взаємодіють тільки при зіткненнях. У реальних газів (сильно стиснутих газів) молекули зазнають сили міжмолекулярної взаємодії. Газу, що перебувають в умовах тисків, близьких до атмосферного, можна вважати ідеальними газами.

Для ідеального газу рівняння стану набуває форми, що дістала назву рівняння Менделєєва-Клапейрона:

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$



де  $m$  – маса газу,

$M$  – молярна маса газу,

$R$  – універсальна газова стала ( $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ).

Довільна термодинамічна система, що перебуває в якому завгодно термодинамічному стані, має повну енергію, що складається з кінетичної енергії механічного руху системи як цілого; потенційної енергії системи в зовнішніх силових полях (наприклад, електромагнітному, гравітаційному); внутрішньої енергії  $U$ .

Внутрішньою енергією термодинамічної системи називається енергія, яка залежить тільки від термодинамічного стану системи. Для нерухомої системи, що не зазнає дії зовнішніх силових полів, внутрішня енергія збігається з повною енергією. Внутрішня енергія містить у собі енергію усіх видів внутрішніх рухів у системі й енергію взаємодії всіх частинок (атомів, молекул, іонів і т.д.), що входять до системи.

Наприклад, внутрішня енергія газу багатоатомних молекул складається з: а) кінетичної енергії теплового поступального й обертального руху молекул; б) кінетичної і потенційної енергії коливань атомів у молекулах; в) потенційної енергії, зумовленої міжмолекулярними взаємодіями; г) енергії електронних оболонок атомів та іонів; д) кінетичної енергії і потенційної енергії взаємодії протонів і нейтронів у ядрах атомів.

Доданки г) і д) звичайно не змінюються в процесах, що відбуваються при не дуже високих температурах, коли іонізація і збудження не відіграють істотної ролі. У цих умовах доданки г) і д) не враховуються в балансі внутрішньої енергії. Для ідеального газу не враховується також доданок в).

Внутрішня енергія є однозначною функцією термодинамічного стану системи. Значення внутрішньої енергії в будь-якому стані не залежить від того, за допомогою якого процесу система досягла даного стану. Зміна внутрішньої енергії при переході системи зі стану 1 у стан 2 дорівнює  $\Delta U = U_2 - U_1$

і не залежить від виду процесу переходу 1 - 2. Якщо система перебуває у стані циклічного процесу, то повна зміна її внутрішньої енергії дорівнює нулю.

Вище зазначалося, що обмін енергією між термодинамічною системою і зовнішніми тілами відбувається двома шляхами: або в разі здійснення роботи, або шляхом теплообміну. Кількість енергії, яку зовнішні тіла передали системі при силовій взаємодії між ними, називається роботою  $A$  виконаною над системою. Кількість енергії, яку зовнішні тіла передали системі шляхом теплообміну, називається кількістю теплоти  $Q$ , наданої системі.

Обмін енергією між нерухомою системою і зовнішнім середовищем шляхом виконання роботи може відбуватися лише при зміні об'єму та форми системи. Коли ідеальному газу надається якась кількість теплоти, то газ може виконати роботу проти зовнішнього тиску.

Таким чином, збільшення внутрішньої енергії системи повинно дорівнювати сумі виконаної над системою роботи  $A'$  і кількості наданого системі тепла  $Q$ :

$$U_2 - U_1 = Q + A'.$$

Звичайно замість роботи  $A'$ , виконаної зовнішніми тілами над системою, розглядають роботу  $A$  (що дорівнює  $-A'$ ), яку виконує система над зовнішніми

тілами. Тоді

$$Q = U_2 - U_1 + A.$$

Це рівняння виражає закон збереження енергії і являє собою зміст першого закону (начала) термодинаміки. Словами його можна виразити в такий спосіб: тепло, що надається системі, витрачається на збільшення внутрішньої енергії системи і на виконання системою роботи над зовнішніми тілами.

Розглянемо, як записується перший закон термодинаміки для різних процесів в ідеальному газі.

При ізотермічному процесі зміна температури не відбувається і, отже, внутрішня енергія системи не змінюється ( $\Delta U = 0$ ). Тоді перший закон термодинаміки має вигляд:  $Q = A$  тобто все підведене тепло переходить у роботу газу над зовнішніми тілами.

При ізохорному процесі об'єм газу не змінюється і тому роботу газ не виконує:

$$Q = U_2 - U_1.$$

При ізобарному процесі відбувається збільшення внутрішньої енергії й виконується робота

$$(A = p \cdot \Delta V = p \cdot (V_2 - V_1)):$$

$$Q = U_2 - U_1 + A.$$

І, нарешті, в адіабатичному процесі  $Q = 0$ , тобто

$$0 = U_2 - U_1 + A \text{ або } \Delta U = -A.$$

Можна дати ще одне формулювання першого закону термодинаміки: вічний двигун першого роду неможливий. Вічним двигуном першого роду називається така періодична працююча машина, яка виробляє роботи більше, ніж підведена до неї кількість теплоти.

Таким чином, із вищерозглянутого можна сформулювати такі висновки. Енергія – єдина міра різних форм руху матерії.

Механічна енергія і теплова енергія – це тільки дві з багатьох форм енергії.

Можливі два якісно різних способи передачі енергії від одного макроскопічного тіла до іншого у формі роботи та у формі теплообміну. При цьому макроскопічне тіло розглядається як сукупність величезної кількості мікрочастинок. Зміну енергії тіла, здійснену першим способом, називають роботою, виконаною над цим тілом. Передача енергії у формі роботи здійснюється у процесі силової взаємодії тіл і завжди супроводжується макропереміщенням.

Передача енергії шляхом теплообміну між тілами зумовлена різницею температур цих тіл.

Неможливий вічний двигун першого роду. Це одне з формулювань першого закону термодинаміки.

Усіма явищами природи керує закон збереження енергії: енергія в природі не виникає з нічого і не зникає нікуди; кількість енергії незмінна, вона лише переходить з однієї форми в іншу.

### **3.4 Другий закон термодинаміки та принцип зростання ентропії**

#### **3.4.1 Другий закон термодинаміки**

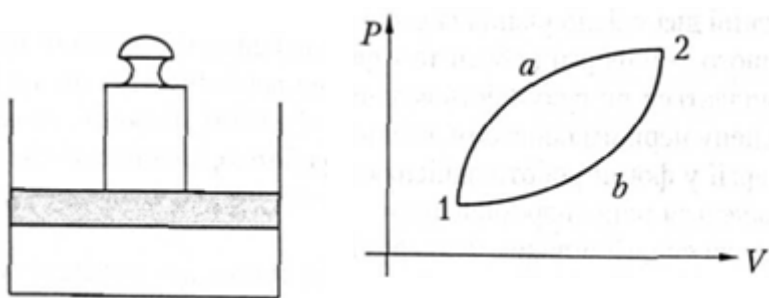
Перше начало термодинаміки не дає ніяких вказівок щодо напрямку, в якому можуть відбуватися процеси в природі. Для ізольованої системи, наприклад, перший закон термодинаміки вимагає лише, щоб у всіх процесах енергія системи

залишалася сталою. Якщо 1 і 2 – два стани такої системи, то перше начало нічого не може сказати стосовно того, чи буде система переходити зі стану 1 у стан 2, чи зі стану 2 у стан 1. Узагалі, на підставі першого закону не можна з'ясувати, чи будуть в ізольованій системі відбуватися які-небудь процеси.

Нехай теплоізолювана система складається із двох тіл, що взаємодіють між собою, але не взаємодіють з іншими тілами. Тоді теплообмін між ними задовольняє умову  $Q_1 = -Q_2$ . Теплота  $Q_1$  отримана одним тілом, дорівнює теплоті  $-Q_2$  відданий іншим тілом. У якому напрямку буде переходити теплота – на це питання перший закон термодинаміки відповісти не може. Першому закону не суперечив би, наприклад, процес, у якому теплота довільно переходить від тіла менш нагрітого до тіла більш нагрітого.

Другий закон термодинаміки, навпаки, дозволяє зробити висновок про напрямок процесів, що можуть відбуватися в дійсності. Крім того, він може разом з першим законом установити багато точних кількісних співвідношень між різними термодинамічними параметрами тіл у стані термодинамічної рівноваги.

Щоб сформулювати другий закон термодинаміки, розглянемо схематично роботу теплової машини.



У циліндрі машини міститься газ або яка-небудь інша речовина, яку називають робочим тілом. Задля визначеності будемо вважати, що робочим тілом є газ. Нехай на діаграмі  $VP$  початковий стан тіла зображується точкою – 1.

Нехай дно циліндра вступає в тепловий контакт із нагрівачем, тобто з тілом, температура якого вища за температуру газу в циліндрі. Газ буде нагріватися й розширюватися – цей процес зображено кривою 1a2. Робоча речовина одержить від нагрівача теплоту  $Q_1$ , і виконає позитивну роботу  $A_1$ . Згідно з першим законом

$$Q_1 = U_2 - U_1 + A_1.$$

Тепер треба повернути поршень у початкове положення, тобто стиснути газ. Це треба зробити так, щоб робота  $A_2$ , витрачена на стиснення, була меншою за  $A_1$ . Щоб досягти цього, введемо дно циліндра в тепловий контакт із холодильником, тобто тілом, температура якого нижча за температуру газу в циліндрі, і стиснемо газ способом 2b1. У результаті газ повернеться до вихідного стану 1. При цьому він віддасть холодильнику кількість теплоти  $Q_2$ . За першим законом

$$-Q_2 = U_1 - U_2 - A_2,$$

Звідси, у комбінації з попередньою рівністю

$$Q_1 - Q_2 = A_1 - A_2.$$

Таким чином, теплова машина здійснила циклічний процес, у результаті чого нагрівач віддав кількість теплоти  $Q_1$ , холодильник одержав кількість теплоти  $Q_2$ ,  $Q = Q_1 - Q_2$  пішло на виконання роботи  $A_1 - A_2$ .

Відношення

$$\eta = \frac{A}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$$

називається коефіцієнтом корисної дії (ККД) теплової машини.

Виникає питання, чи не можна побудувати періодичну теплову машину без холодильника, тобто домогтися того, щоб  $Q_2 = 0$  і, отже  $\eta = 1$ ? Така машина могла б перетворювати у роботу всю теплоту, взятую від джерела тепла. Можливість її побудови не суперечить закону збереження енергії. За своїм практичним значенням вона майже не поступалася б вічному двигуну, тому що з її допомогою можна було б виконувати роботу за рахунок практично невичерпних запасів внутрішньої енергії, що містяться у водах океанів і морів, атмосфері і надрах Землі. Таку машину Вільгельм Оствальд (1853-1932) назвав вічним двигуном другого роду, на відміну від вічного двигуна першого роду, тобто вічного двигуна, який здійснює роботу з нічого. Можливість існування такого двигуна суперечить закону збереження енергії.

Але вже Карно зрозумів, що така машина принципово неможлива. Роботу теплових двигунів він порівнював із роботою водяних двигунів. Робота останніх пов'язана з падінням води з більш високого рівня на більш низький. Так і можливість виконання роботи тепловими двигунами зумовлена, згідно з Карно, переходом теплоти від тіла більш нагрітого до тіла менш нагрітого.

Факти дослідів заперечують можливість побудови вічного двигуна другого роду. Тому неможливість побудови такого вічного двигуна було зведено до рівня постулату. Він називається постулатом другого начала термодинаміки, або другим законом термодинаміки. Застосовуючи цей постулат до макроскопічних систем, розміри яких порівняно великі, фізика досі ніде не виявила суттєвих протиріч.

Вільям Томсон (що одержав пізніше за наукові заслуги титул лорда Кельвіна) у 1851 р. так сформулював другий закон термодинаміки: "Неможливий циклічний процес, єдиним результатом якого було б виконання роботи за рахунок охолодження теплового резервуара". При цьому робота за рахунок охолодження теплового резервуара виконувалася б на основі зменшення внутрішньої енергії цього теплового резервуара.

Можна конкретизувати, у чому має полягати виконання зовнішньої роботи, і таким чином одержати багато різноманітних формулювань другого закону термодинаміки.

Одне з таких формулювань належить Планку: "Неможливо побудувати періодично діючу машину, єдиним результатом якої було б підняття вантажу за рахунок охолодження теплового резервуара".

Якщо газ у циліндрі ізотермічно розширюється, то вся підведена теплота переходить у роботу підняття вантажу на поршні:

Це не суперечить постулату другого начала термодинаміки, бо вищенаведений

процес нециклічний, тобто машина не є періодично діючою. От якби можна було якимось способом, залишаючи вантаж у піднятому положенні, стиснути газ, привівши його цим до початкового стану, і повернути поршень у вихідне положення таким чином, щоб у всіх інших тілах (крім теплового резервуару, частина внутрішньої енергії якого пішла на виробництво роботи) не відбулося жодних змін, то тоді це було б протиріччям до постулату другого начала термодинаміки, оскільки останній стверджує, що зробити таке неможливо ніякими способами.

Клаузіус (1822-1888) у 1850 р. дав принципово інше формулювання основного постулату. Він висунув таке положення: "Теплота не може самостійно переходити від тіла менш нагрітого до тіла більш нагрітого". Суть цього формулювання полягає в тому, що неможливо жодним способом забрати теплоту від тіла менш нагрітого та цілком передати її тілу більш нагрітому і зробити це так, щоб у природі більше не відбулося ніяких змін.

### 3.4.2 Ідеальний цикл Карно

Батько Саді Карно – відомий французький генерал, "організатор перемог Великої французької революції" Лазар Нікола Карно, інженер за освітою, виявляв значний інтерес до науки та практичного застосування інженерних досягнень. Він займався аналізом роботи теплових машин, і Саді Карно продовжив роботу свого батька. Дотримуючись теплородної теорії, С. Карно, проте, зумів одержати результати, що досі не втратили і не втратять свого значення для розвитку науки.

По-перше, С. Карно запровадив поняття циклічного (кругового) процесу. Спостерігаючи за роботою парової машини, він звернув увагу на те, що використовується для переміщення циліндра пара потім випускається в середовище з меншою температурою, де вона знову перетворюється у воду (конденсат), причому цей конденсат більше не використовується. Карно обмірковує питання про можливість використання відпрацьованого конденсату, тобто про можливість повернення конденсату в котел, де він знову нагріється, перетвориться в пару, яка завдяки своєму подальшому розширенню знову виконає роботу над поршнем. Таким чином, вода буде проходити повний цикл – ряд процесів, у результаті яких повернеться у вихідний стан.

Другий важливий крок полягав у тому, що Карно встановив: подібний неперервний циклічний процес є можливим лише за наявності двох нагрівачів – нагрівача з високою температурою  $T_1$ , і холодильника з більш низькою температурою  $T_2$ . Крім нагрівача й холодильника, необхідне робоче тіло. Робоче тіло, забираючи в нагрівача кількість теплоти  $Q_1$  виконавши роботу, для відновлення своїх вихідних параметрів (забезпечення неперервності циклу) повинно віддати деяку кількість теплоти  $Q_2$  холодильнику. Взявши за основу тепловодну теорію теплоти, Карно вважав, що "падіння теплородної субстанції", зумовлене різницею температур нагрівача й холодильника, аналогічне падінню води з більш високого рівня на низький. Так що робота залежить від перепаду між температурами теплороду в нагрівані й холодильнику.

Для характеристики теплової машини Карно вводить поняття коефіцієнта корисної дії (ККД), який дорівнює відношенню роботи, виконаної робочим тілом, до кількості теплоти  $Q_1$  узятій від нагрівача:

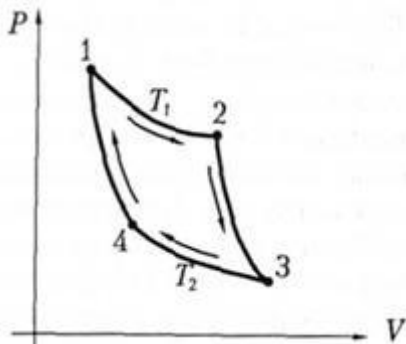
$$\eta = \frac{A}{Q_1} \cdot 100\%.$$

Основне завдання, яке поставив собі за мету Карно, полягало у визначенні

параметрів, від яких залежить ККД теплової машини. При цьому він продемонстрував по-справжньому науково-теоретичний підхід, тому що намагався визначити ККД машини незалежно від "якогось механізму", "якогось певного агента", тобто пропонував розглянути ідеальну теплову машину. Особливістю цієї ідеальної машини було те, що всі зміни в ній повинні були відбуватися оборотним шляхом.

Оборотним називається процес, що може йти як у прямому, так і у зворотному напрямку, і після повернення системи у вихідний стан вона (система) залишається незмінною. Будь-який інший процес називається необоротним. Виявляється, якщо виключити з розгляду явища, що відбуваються в мікросвіті, то в природі абсолютно оборотних процесів не існує. Ще Лазар Карно звернув увагу на те, що для досягнення найвищого ККД при побудові й експлуатації механічного пристрою потрібно звести до мінімуму удари, тертя, іншими словами, усі процеси, що призводять до втрати "живої сили". Сад і Карно обґрунтовує свою теорію, розглядаючи процес одержання руху з тепла на основі загальних міркувань, нехтуючи різноманітними несуттєвими факторами у функціонуванні машини. Він намагається визначити, від чого залежить максимальний ККД машини. Тому і бере для розгляду ідеалізовану машину, істотною особливістю процесу якої є циклічний й оборотний характер. Як робоче тіло Карно використовує повітря, щоб уникнути складностей, пов'язаних зі зміною фази – перетворенням води на пару, а потім пари – на воду. Більше того, Карно приходить до вірного висновку: для підвищення ККД треба уникати прямих контактів між нагрівачем і холодильником, щоб жодна зміна температури не була зумовлена прямими потоками тепла між двома тілами, які мають різну температуру. Ці потоки не виконують ніякої механічної роботи й призводять до зниження ККД.

Міркуючи подібним чином, Карно поділив цикл ідеальної теплової машини на чотири стадії (див, мал.).



1 стадія. Робоче тіло, температура якого дорівнює температурі нагрівача  $T_1$  контактує з нагрівачем й одержує від нього кількість теплоти  $Q_1$ , яка повністю витрачається на роботу, що спричинює розширення робочого тіла. При цьому отримана теплота не витрачається на збільшення внутрішньої енергії робочого тіла, не втрачається даремно внаслідок рівності температур робочого тіла й нагрівача на початку циклу. Перша стадія циклу відбувається при постійній температурі  $T$ . (ізотермічно).

2 стадія. Робоче тіло ізолюється від джерела, тепло не надходить і не виходить із системи. Інакше кажучи, процес на другій стадії протікає адіабатично, тобто без теплообміну. При цьому робоче тіло продовжує розширюватися, і робота, що виконується для його розширення, відбувається за рахунок резервів внутрішньої енергії робочого тіла. Внутрішня енергія робочого тіла при його розширенні зменшується, і робоче тіло охолоджується. Таке адіабатичне розширення робочого

тіла продовжується доти, поки його температура не зрівняється з температурою холодильника.

3 стадія. І ось тут робоче тіло з температурою  $T_2$  потрапляє в холодильник із такою ж температурою  $T_2$ . При цьому робоче тіло віддає деяку кількість теплоти холодильнику, унаслідок чого зменшується об'єм робочого тіла, воно стискається. Процес стиснення робочого тіла необхідний для забезпечення циклічності роботи машини, тому що при цьому зменшується об'єм робочого тіла. Зауважимо, що в нагрівач на 1-ій стадії робоче тіло надходило з меншим об'ємом і тільки потім розширювалося, виконуючи роботу.

4 стадія. І, нарешті, на четвертій стадії робоче тіло адіабатично стискається до первісного об'єму. При цьому його внутрішня енергія збільшується. Процес цей продовжується доти, поки температура робочого тіла не зрівняється з температурою нагрівача  $T_1$ .

Отже, цикл є оборотним. Дві ізотермічні стадії (перша й третя) при постійних температурах (відповідно,  $T_1$ , – на першій стадії і  $T_2$  – на третій стадії) пов'язані між собою двома адіабатичними стадіями.

І хоч Саді Карно не визначив величину ККД ідеальної оборотної машини, і сама його книга "Про рушійну силу вогню і машини, здатні розвивати цю силу" містить всього 45 сторінок, основні принципи, які автор виклав у цій праці, стали фундаментальним внеском у становлення й розвиток термодинаміки. Карно прийшов до цілком вірного висновку про те, що ККД ідеальної машини залежить тільки від температур нагрівача й холодильника, а ККД будь-якої іншої машини буде завжди меншим від ККД ідеальної теплової машини.

Уже після смерті Саді Карно, у 1850 році, Клаузіус розробив новий строго математичний опис циклу Карно з погляду збереження енергії. Відповідно до першого закону термодинаміки, кількість теплоти, яку робоче тіло віддає холодильнику  $Q_2$ , повинна бути меншою від кількості теплоти, узятій в нагрівача  $Q_1$ , на величину виконаної роботи:  $A = Q_1 - Q_2$ .

Нагадаємо, що аналіз Карно, заснований на уявленнях про теплорід, припускає рівність  $Q_1$ , і  $Q_2$ .

Клаузіус встановив, що при роботі теплової машини не вся кількість теплоти, узята в нагрівача, передається холодильнику. Частина цієї теплоти перетворюється на роботу, яку виконує машина. Однак лише першого начала термодинаміки недостатньо для пояснення роботи теплової машини. Клаузіус довів, що, обґрунтовуючи процес перетворення теплоти на роботу, слід вдатися ще до одного принципу, сформульованого Карно. Цей принцип стверджує, що при будь-якому невинному процесі перетворення теплоти гарячого нагрівача в роботу неодмінно повинна відбуватися передача теплоти холодильнику. Таким чином, йдеться про загальну властивість теплоти: теплота "завжди виявляє тенденцію до урівнювання температурної різниці шляхом передавання від теплих тіл до холодних". Із цим положенням Клаузіуса ми вже ознайомилися вище. Той же Клаузіус одержав вираз для ККД ідеальної теплової машини:

$$\eta = \frac{T_{\text{холодильника}} - T_{\text{нагрівача}}}{T_{\text{нагрівача}}} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Він довів, що ККД будь-якої теплової машини повинен дорівнювати ККД ідеальної машини або бути меншим за нього :1

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Це твердження є одним із формулювань II начала термодинаміки. Отже,

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \leq \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

### 3.4.3 Поняття ентропії

Для ідеальної машини Карно справджується вираз

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1}.$$

Звідси випливає рівність  $\frac{Q_1}{T_1} = \frac{Q_2}{T_2}$ .

Так як кількість теплоти передається холодильнику, її треба взяти зі знаком "мінус". Отже, одержуємо вираз:

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = 0.$$

Будемо писати  $\Delta Q$  замість  $Q$ , підкреслюючи, що йдеться про порцію  $\Delta Q$ , яку робоче тіло отримало від нагрівача, і порцію яку воно втратило в холодильнику:

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} = 0.$$

Цей вираз схожий на закон збереження, а це, у свою чергу, не може не привернути уваги до величини  $\frac{\Delta Q}{T}$ .

У 1865 році Клаузіус увів нове поняття "ентропія" (entropia – від грецького слова "поворот", "перетворення"). Клаузіус обчислив, що існує деяка величина  $S$ , яка подібно до енергії, тиску, температури характеризує стан газу. Коли газ отримує деяку кількість теплоти  $\Delta Q$  то ентропія  $S$  зростає на величину, що дорівнює

$$\Delta S = \frac{\Delta Q}{T}.$$

У попередньому розділі зазначалося, що протягом тривалого часу вчені не розмежовували такі поняття, як температура й теплота. Однак ряд явищ указував на те, що ці поняття таки варто розрізняти. Так, при таненні льоду теплота витрачається, а температура льоду в процесі плавлення не змінюється. Після того, як Клаузіус увів поняття ентропії, стало зрозуміло, де проходить межа між поняттями теплоти й температури. Справа в тому, що не можна говорити про якусь кількість теплоти, що міститься в тілі. Це поняття не має смислу. Теплота може передаватися від тіла до тіла, перетворюватися на роботу, виникати при терті, але при цьому вона не є величиною, що зберігається. Тому теплота визначається у фізиці не як вид енергії, а як міра зміни енергії. У той же час ентропія, яку запропонував Клаузіус, виявилася величиною, що зберігається в оборотних процесах. Це означає, що



ентропія системи може розглядатися як функція стану системи, тому що її зміна не залежить від виду процесу, а залежить тільки від початкового й кінцевого станів системи. Доведемо, що в ідеальному циклі Карно ентропія зберігається.

Розглянемо величину  $\Delta Q$ , яка позначає нескінченно мале збільшення теплоти – настільки мале, що система зберігає одне й те саме значення температури, незмінне у всьому об'ємі розглянутої системи. Тобто припустимо, що система в усі моменти часу перебуває у стані теплової і механічної рівноваги, і будь-яка зміна її стану складається з послідовності рівноважних станів, кожен з яких лише нескінченно мало відрізняється від попереднього. Саме такий характер поведінки системи реалізується в оборотних процесах.

Якщо процес оборотний, як у циклічному циклі Карно, то

$$\frac{\Delta Q_1}{T_1} + \frac{\Delta Q_2}{T_2} = 0.$$

Із цього співвідношення випливає, що ентропія робочого тіла на першій стадії зростає рівно настільки, наскільки вона зменшується на третій стадії. На другій і на четвертій стадіях ентропія робочого тіла не змінюється, тому що процеси тут протікають адіабатично, без теплообміну.

Іншими словами, у випадку оборотних процесів  $\Delta S = 0$ , тобто  $S = \text{const}$  – ентропія ізольованої системи у випадку оборотних процесів стала.

При необоротних процесах одержуємо закон зростання ентропії:  $S > 0$ .

Для того, щоб здійснити оборотний процес, необхідно домогтися дуже повільного розширення або стиснення робочого тіла, щоб зміни системи являли собою послідовність рівноважних станів. У такому циклі виконання якої-небудь корисної роботи вимагає нескінченно великої кількості часу. Щоб одержати роботу протягом коротких проміжків часу, тобто достатню потужність, доводиться порушувати умови ідеального циклу. А це відразу призводить до різниці температур на різних ділянках системи, до потоків тепла від більш гарячих ділянок до менш гарячих, тобто до зростання ентропії системи.

Щоб описати термодинамічні процеси, першого закону термодинаміки виявляється недостатньо, тому що перший закон термодинаміки не дозволяє визначити напрямок протікання процесів у природі. Той факт, що ентропія ізольованої системи не може убувати, а тільки зростає і досягає максимального значення в рівноважному стані, є відображенням того, що в природі можливі процеси, що протікають тільки в одному напрямку – у напрямку передачі тепла від більш гарячих тіл до менш гарячих.

Таким чином, сформулюємо ще раз деякі положення другого закону термодинаміки. Усі вони є еквівалентними.

1. Процеси, в яких єдиним кінцевим результатом є перехід тепла від тіла, менш нагрітого, до тіла, більш нагрітого, відбуватися не можуть.

У природі всі процеси протікають тільки в одному напрямку – у напрямку передавання тепла від більш гарячих тіл до менш гарячих.

2. ККД будь-якої теплової машини завжди менший, ніж 100%, тобто неможливий вічний двигун (перпетуум-мобіле) другого роду (тому що неможливо побудувати теплову машину, що працює не за рахунок перепаду теплоти, а за рахунок теплоти одного нагрівача).

ККД будь-якої реальної теплової машини завжди менший від ККД ідеальної теплової машини.

3. Ентропія ізольованої системи при протіканні необоротних процесів зростає, тому що система, не зазнаючи ніяких зовнішніх впливів, переходить з менш імовірного стану в більш імовірний ( $\Delta S > 0$ ). Ентропія системи, що перебуває в рівноважному стані, максимальна й постійна ( $\Delta S = 0$ ).

Це останнє формулювання слід обговорити більш докладно.

#### **3.4.4 Ентропія та імовірність**

В основі термодинаміки лежить відмінність між двома типами процесів – оборотними й необоротними.

Поняття ентропії дозволяє відрізнити у випадку ізольованих систем оборотні процеси (ентропія максимальна й постійна) від необоротних процесів (ентропія зростає).

Завдяки роботам великого австрійського фізика Людвіга Больцмана цю відмінність було зведено з макроскопічного рівня на мікроскопічний. Стан макроскопічного тіла (системи), заданий за допомогою макропараметрів (параметрів, що вимірюються за допомогою макроприладів – тиску, температури, об'єму й інших макроскопічних величин, які характеризують систему в цілому), називають макростаном.

Якщо стан макроскопічного тіла охарактеризовано настільки докладно, що задано стани всіх молекул, які утворюють тіло, то такий стан називається мікростаном.

Усякий макростан може бути зреалізованим різними способами, кожному з яких відповідає певний мікростан системи. Кількість різних мікростанів, що відповідають даному макростану, називається термодинамічною імовірністю макростану  $W$ . Спробуємо це з'ясувати.

Ми знаємо, що весь навколишній світ складається з молекул і атомів. Помістимо в якийсь резервуар із теплоізолюваними стінками деяку кількість газу, число молекул якого дорівнює  $N$ . Виділимо яку-небудь одну молекулу. Припустимо, що якимось чином ми можемо її позначити, скажімо, пофарбувати в зелений колір. Якби ми могли це зробити, то одержали б можливість відрізнити її від інших молекул і тим самим спостерігати її рух у цьому об'ємі. Спостерігаючи за цією молекулою, ми вже незабаром переконаємося, що вона може перебувати в резервуарі де завгодно. Причому перебування її в будь-яку мить у будь-якій точці є випадковим.

Тепер поділимо наш об'єм на дві половини. Ми побачимо, що наша молекула, безладно блукаючи, постійно натикаючись (зіштовхуючись) на інші молекули, пробуде в одній з половинок резервуару рівно половину часу, протягом якого ми за нею спостерігаємо. У цьому випадку, як кажуть, імовірність її перебування в одній з половинок резервуару дорівнює  $\frac{1}{2}$ .

Якщо ми будемо спостерігати вже за двома міченими молекулами, то імовірність того, що ми знайдемо відразу обидві молекули в одній з половинок посудини, дорівнюватиме добутку імовірностей кожної молекули  $\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{1}{4}$ . Аналогічно для трьох молекул ця імовірність дорівнює  $\left(\frac{1}{2}\right)^2$ , а

для  $N$  молекул –  $\left(\frac{1}{2}\right)^N$ . У 29 грамах повітря, наприклад, міститься кількість молекул  $N$ , що дорівнює  $6,023 \cdot 10^{23}$ . Відповідно, імовірність перебування відразу всіх молекул

в одній половині об'єму посудини  $\left(\frac{1}{2}\right)^N$  мізерно мала. Така подія є малоімовірною.

Нам це і не здається дивним. Дивним було б, якби в одній кімнаті всі молекули повітря раптом у деякий момент часу зібралися б в одній її половині, а в іншій половині виявився б безповітряний простір. І якби ми не встигли або не здогадалися, що треба негайно перестрибнути в потрібну половину кімнати, то померли б від кисневого голодування. Ми знаємо, що така подія є малоімовірною. Імовірність же того, що всі молекули рівномірно розподілені по всьому об'єму у всьому об'ємі даної посудини, максимальна й приблизно дорівнює одиниці. Цей стан може реалізовуватися величезною кількістю способів. У цьому випадку термодинамічна імовірність, тобто кількість способів, якими може бути реалізований цей стан, максимальна.

Нехай у деякий момент часу нам вдалося загнати всі молекули за допомогою діафрагм (перегородок) у праву верхню частину посудини. Інші  $\frac{3}{4}$  об'єму посудини залишалися при цьому порожніми. Далі заберемо діафрагми й побачимо, що молекули заповнять весь об'єм посудини, тобто перейдуть зі стану з меншою імовірністю у стан з більшою імовірністю. Тобто процеси в системі йдуть тільки в одному напрямку: від деякої структури (порядку, коли всі молекули містилися у верхньому правому кутку об'єму посудини) до повної симетрії (хаосу, безладдя, коли молекули можуть займати будь-які точки простору посудини).

Больцман першим побачив зв'язок між ентропією та імовірністю. При цьому він зрозумів, що ентропія повинна виражатися через логарифм імовірності. Тому що якщо ми розглянемо, скажімо, дві підсистеми однієї системи, кожна з яких описується термодинамічною імовірністю відповідно  $W_1$  і  $W_2$ , то повна термодинамічна імовірність системи дорівнює добутку термодинамічних імовірностей підсистем:

$$W = W_1 \cdot W_2$$

у той час як ентропія системи  $S$  дорівнює сумі ентропій підсистем:

$$S = S_1 + S_2$$

Зауважимо, що  $\ln W = \ln(W_1 \cdot W_2) = \ln W_1 + \ln W_2$ .

Больцман пов'язав поняття ентропії  $S$  з  $\ln W$  У 1906 році Макс Планк запропонував формулу, яка виражає основну думку Больцмана про інтерпретацію ентропії як логарифма імовірності стану системи:  $S = k \cdot \ln W$ .

Планк виконав обчислення коефіцієнта пропорційності  $k$  – він збігся зі сталою Больцмана. Формула " $S = k \cdot \ln W$ " вигравірувана на пам'ятнику Больцману на цвинтарі у Відні.

Ідея Больцмана про ймовірну поведінку окремих молекул продемонструвала новий підхід до опису систем, що складаються з величезної кількості частинок, який уперше запропонував Максвелл. Максвелл прийшов до розуміння того, що в цих випадках фізична задача повинна бути поставлена інакше, ніж у механіці Ньютона. Очевидно, що наш приклад з міченими молекулами сам по собі нездійсненний, тому що, в принципі, неможливо простежити протягом значного інтервалу часу за рухом окремої молекули. Неможливо також визначити точно координати й швидкості всіх

молекул макроскопічного тіла одночасно, в даний момент часу. Задачу слід сформулювати інакше, а саме: спробувати встановити ймовірність того, що дана молекула має певне значення швидкості. Максвелл увів для опису випадкового характеру поведінки молекул поняття ймовірності, закон ймовірності(статистичний). Використовуючи новий підхід, Максвелл сформулював закон розподілу кількості молекул газу по швидкостях. Цей закон викликав тривалу дискусію, яка тривала десятиліття аж до виготовлення молекулярних насосів, що дозволили зробити експериментальну перевірку закону. У 1878 році Больцман, як уже було зазначено вище, застосував поняття ймовірності, уведене Максвеллом, і довів, що другий закон термодинаміки також є наслідком більш глибоких статистичних законів поведінки великої сукупності частинок. Таким чином, з розвитком статистичної фізики й термодинаміки на зміну причинним динамічним законам приходять статистичні закони, що дозволяють передбачити еволюцію природи не з абсолютною вірогідністю, а лише із значною часткою ймовірності:

#### **3.4.5 Порядок і хаос. Стріла часу**

Точка зору Больцмана означала, що необоротне зростання ентропії в ізольованій системі, яка не обмінюється енергією з навколишнім середовищем, слід розглядати як прояв хаосу, що постійно зростає, поступового забування початкової асиметрії, тому що асиметрія приводить до зменшення кількості способів, якими може бути здійснений даний макростан, тобто до зменшення термодинамічної ймовірності  $W$ . Так що будь-яка ізольована система спонтанно еволюціонує в напрямку забування початкових умов, у напрямку переходу в макроскопічний стан з максимальною  $W$ , яка відповідає стану хаосу й максимальної симетрії. При цьому ентропія зростає, що відповідає самочинній еволюції системи. Знехтувати цим законом неможливо, зростання ентропії є платою за будь-який виграш у роботі, воно властиве всім фізичним явищам. У стані теплової рівноваги ентропія досягає свого максимального значення. Іншими словами, у рівноважному стані існує стан молекулярного хаосу, що означає повне забуття системою свого початкового стану, небереження системою інформації про своє минуле.

За словами Еддінгтона, зростання ентропії, що спричинює необоротні процеси, є "стрілою часу". Для ізольованої системи майбутнє завжди розташоване в напрямку зростання ентропії. Це й відрізняє майбутнє від сьогодення, а сьогодення від минулого. Тобто зростання ентропії визначає напрямок, стрілу часу. Ентропія ж зростає із збільшенням безладдя в системі. Тому будь-яка ізольована фізична система виявляє з часом тенденцію до переходу від порядку до хаосу. Стара концепція руху, яка не звертала належної уваги на необоротні процеси, власне кажучи, описувала рух як постійне повторення одних і тих самих перетворень. Сформулювавши II начало термодинаміки, Клаузіус проводить чітку межу між рухом як повторенням і рухом як необоротним процесом. "Часто доводиться чути, – пише він, – що все у світі відбувається по циклічному колу... Коли було сформульовано перший основний принцип механічної теплоти, його, мабуть, можна було вважати блискучим підтвердженням вищезазначеної думки... Але другий основний принцип механічної теплоти суперечить цій думці найрішучішим чином... Звідси випливає, що стан Всесвіту повинен усе більше й більше змінюватися у визначеному напрямку".

#### **3.4.6 Проблема теплової смерті всесвіту. Флуктаційна гіпотеза Больцмана**

Подальший розвиток принципу необоротності, принципу зростання ентропії полягає в поширенні цього принципу на нескінченний Всесвіт у цілому. Вільям

Томсон екстраполював принцип зростання ентропії на крупно масштабні процеси, що відбуваються в природі. Клаузіус поширив цей принцип на увесь Всесвіт, що привело його до гіпотези про теплову смерть Всесвіту. Усі фізичні процеси протікають у напрямку передавання тепла від більш гарячих тіл до менш гарячих. Це означає, що повільно, але невпинно відбувається процес вирівнювання температури у Всесвіті. Отже, майбутнє вимальовується перед нами в дещо трагічних тонах: зникнення температурних відмінностей і перетворення всієї світової енергії на теплоту, рівномірно розподілену у Всесвіті. Звідси Клаузіус робить висновок про те, що: "1. Енергія світу постійна. 2. Ентропія світу прагне до максимуму". Екстраполяційний висновок про майбутню теплову смерть Всесвіту, який означає припинення будь-яких фізичних процесів унаслідок переходу Всесвіту в рівноважний стан з максимальною ентропією, протягом усього подальшого розвитку привертає увагу вчених, тому що зачіпає як глибинні проблеми власне наукового характеру, так і філософсько-світоглядні, тому що вказує визначену верхню границю можливості існування людства. З наукового погляду виникають проблеми правомірності таких екстраполяцій, висловлених Клаузіусом:

1. Всесвіт є замкнутою системою.
2. Еволюцію світу можна описати як зміну його станів.
3. Для світу як цілого стан з максимальною ентропією має сенс, як і для будь-якої скінченної системи.

Безперечно, ці проблеми створюють труднощі і для сучасної фізичної теорії. Їх вирішення варто шукати в загальній теорії відносності й у сучасній космології, яка розвивається на її основі. Багато теоретиків вважають, що в загальній теорії відносності світ як ціле повинен розглядатися не як замкнута система, а як система, що перебуває в змінному гравітаційному полі; у зв'язку з цим застосування закону зростання ентропії не приводить до висновку про невідворотність статистичної рівноваги.

Проблему майбутнього розвитку Всесвіту намагався розв'язати Больцман, застосувавши до замкнутого Всесвіту поняття флуктуації. Під флуктуацією фізичної величини розуміють відхилення справжнього значення величини від її середнього значення, зумовлене хаотичним тепловим рухом частинок системи. Больцман скористався обмеженням Максвелла, відповідно до якого для невеликої кількості частинок друге начало термодинаміки не застосовне, тому що у випадку невеликої кількості молекул не можна говорити про стан рівноваги системи. При цьому він використовує це обмеження для Всесвіту, розглядаючи видиму частину Всесвіту як невелику частину нескінченного Всесвіту. Для такої невеликої частини припустимі флуктуаційні відхилення від рівноваги, завдяки чому в цілому розв'язується проблема необоротної еволюції Всесвіту в напрямку до хаосу. Ідея еволюції, результатом якої були б самоорганізація матерії, виникнення величезної палітри різноманітних барв фізичної реальності неухильно приваблювала Больцмана. Больцман назвав XIX століття, століття найбільших відкриттів в галузі фізики, століттям Дарвіна, підкреслюючи особливе значення еволюційної теорії Дарвіна. Якщо еволюційна теорія Дарвіна – це шлях від спонтанних флуктуацій видів, після чого настає добір і необоротна біологічна еволюція у напрямку виникнення й зростання складності, то у фізиці, відповідно до другого закону термодинаміки, картина зворотна: необоротність призводить до забування початкових умов і руйнування порядку. З часів Дарвіна ідея еволюції та самоорганізації стосувалася лише живих організмів. Больцман поставив собі за мету не просто описати стан

рівноваги, але й створити теорію еволюції системи до стану рівноваги. При цьому він намагався поєднати II начало термодинаміки з динамікою, вивести "необоротність" з динаміки. Флуктуаційна гіпотеза Больцмана якраз і є розвитком цих прагнень.

Формулюючи флуктуаційну гіпотезу, Больцман виходив з припущення, що нескінченний Всесвіт уже досяг стану термодинамічної рівноваги. Але внаслідок статистичного характеру принципу зростання ентропії для невеликих частин цього нескінченного Всесвіту можливі макроскопічні відхилення від стану рівноваги – флуктуації. "Йдеться про вибір між двома уявленнями, – пише Больцман. – Можна припустити, що весь Всесвіт у наш час перебуває в деякому дуже неймовірному стані. Але можна вдатися до еонів – проміжків часу, по закінченні яких знову настають неймовірні події, – такі ж короткочасні порівняно з тривалістю існування Всесвіту, як відстань від Землі до Сиріуса мізерно мала порівняно з її розмірами.

Тоді у всьому Всесвіті (який у протилежному випадку всюди перебував би у тепловій рівновазі, тобто був би мертвим) є відносно невеликі осередки (ми будемо називати їх окремими світами), які протягом невеликих порівняно з еоном проміжків часу значно відхиляються від теплової рівноваги, а саме: серед цих світів однаково часто зустрічаються стани, імовірності яких зростають і зменшуються. Таким чином, для Всесвіту в цілому два напрямки часу є нероздільними, тому що в просторі немає верху й низу. Але точно так само, як ми в деякому певному місці земної поверхні називаємо "низом" напрямок до центра Землі, так і жива істота, яка перебуває у певній часовій фазі одного з таких окремих світів, назве напрямок часу, що прямує до більш неймовірних станів, по-іншому, протилежне (перше – як напрямок до "минулого", до початку, останнє – до "майбутнього", до кінця), і внаслідок цієї назви буде виявляти "початок" для цих малих осередків, виділених із Всесвіту, завжди в деякому неймовірному стані.

Цей метод видається мені єдиним, за допомогою якого можна осмислити друге начало, теплову смерть кожного окремого світу без того, щоб припускати однобічну зміну всього Всесвіту від деякого певного початкового стану до деякого підсумкового кінцевого стану".

На жаль, мрія Больцмана не збулася повною мірою; йому не вдалося знайти ключ до об'єднання динаміки й другого начала термодинаміки, а запропонована флуктуаційна модель еволюції Всесвіту мала всього лише характер гіпотези й при цьому дуже велику кількість опонентів.

Скептичне ставлення багатьох учених до атомістичної теорії Больцмана (сам він був переконаний у тому, що вчення про атоми, яке він відстоює, завоює визнання через багато десятків років), труднощі з визначенням ролі II начала термодинаміки в системі природознавства і, можливо, ряд інших причин привели нього чудового вченого до трагічного кінця. У 1906 році він покінчив життя самогубством.

XX століття вносить свої корективи в проблему самоорганізації складних систем і формує новий міждисциплінарний напрямок – синергетику, у рамках якої ми і спробуємо розглянути еволюцію Всесвіту.

### **3.4.7 Синергетика. Народження порядку з хаосу**

Поняття хаосу відіграло немало роль протягом всієї історії розвитку людської думки. З хаосом пов'язували уявлення про згубне безладдя, про безмежну безодню, бездонну прірву. Власне, такі уявлення є найбільш розповсюдженими і в повсякденному житті. Проте, ідея первинного хаосу, з якого потім усе народилося,

також досить поширена в давніх міфах, у східній філософії, у вченнях стародавніх греків. І у ведійських "Рігведах", і у вченні Платона ми зустрічаємося з уявленням про перетворення споконвічного Хаосу в Космос, про виникнення з нього "життєдіяльного". Ці уявлення дуже співзвучні із сучасним станом розвитку природознавства. Починаючи із сімдесятих років 20 століття, бурхливо розвивається напрямок, який дістав назву синергетики, у фокусі уваги якого – складні системи з процесами, здатними до самоорганізації, системи, в яких еволюція протікає від хаосу до порядку, від симетрії до складності, що постійно зростає.

Синергетика в перекладі з грецької мови означає співдружність, колективна поведінка. Уперше цей термін увів Хакен. Як новаційний напрямок у науці, синергетика виникла, у першу чергу, завдяки видатним досягненням І. Прігожина в галузі нерів-новажної термодинаміки. Він стверджував, що в нерівноважних відкритих системах можливі ефекти, що приводять не до зростання ентропії і прагнення термодинамічних систем до стану рівноважного хаосу, а до "мимовільного" виникнення упорядкованих структур, до народження порядку з хаосу.

Як уже було зазначено, синергетика пов'язана з ім'ям ученого російського походження І. Р. Прігожина (народ. у 1917 р.), який був удостоєний Нобелівської премії в галузі хімії за 1977 р. Багато років він очолює всесвітньо відому брюссельську школу фахівців у цій галузі. Однією з революційних новацій цього автора є перенесення в термодинаміку найважливіших кібернетичних понять про багаторівневу систему, про саморегуляцію за принципом зворотного зв'язку, про автоколивання та ін. У результаті він відкрив і вперше дослідив багаті можливості, внутрішні резерви термодинамічних систем стосовно їхнього розвитку, утворення нових і більш складних структур. Уже не у фотосинтезі рослин, а у фізичних і хімічних системах було виявлено могутні потенції поступального розвитку всупереч руйнівному закону зростання ентропії. Друге начало термодинаміки при цьому зберігає свою справедливість як великий всесвітній закон природи. Але сфера його дії є аж ніяк не безмежною, як це трактувалося в класичній термодинаміці.

Звернімося до повсякденної моделі й уявімо собі дзеркально рівну водну поверхню, коли на морі повний штиль. Вона є класичним зразком системи, яка перебуває в термодинамічній рівновазі. І вона протистоїть усім спробам вивести її із цього стану.

Кинемо в море прямовисно камінь. Падаючи в повітрі, він утворить за собою область розрідження. Долетівши до поверхні води і пірнувши вглиб, камінь захоплює за собою частину води. На поверхні утвориться западина. Але тут у гру вступають сили поверхневого натягу. Вони прагнуть повернути поверхню води до середнього рівня, однак за інерцією виштовхують її вище за середній рівень. Утвориться загальновідомий фонтанчик над поверхнею води. Але потім під дією сили земного тяжіння він падає назад і на короткий проміжок часу занурюється нижче середнього рівня, хоча вже не так глибоко. Потім знову сили поверхневого натягу за інерцією підкидають стовпчик води вище за середній рівень, хоча вже не так високо. Потім цикл повторюється, поки не настане остаточне заспокоєння (релаксація). На поверхні моря це виглядає як загасаюче джерело кругових хвиль, які розсіюють енергію падіння каменя на поверхні води.

У термінах термодинаміки ця подія називається флуктуацією, тобто місцевим і короткочасним відхиленням системи від стійкого, рівноважного середнього стану. Уданому випадку можна говорити про флуктуацію значною мірою умовно, тому що,

насправді, флуктуації народжуються в самій системі, а не в результаті зовнішнього впливу на неї. Але тут важливий лише аспект поведінки системи після того, як її невелика частина на короткий час виводиться з термодинамічної рівноваги. Як бачимо, у рівноважній системі флуктуації приречені на розсмоктування. Так роль флуктуацій є зрозумілою в класичній термодинаміці, яка не знала ніяких механізмів, що дозволяли б їм підсилюватися й породжувати нові стани системи і її нові структури.

Разом з тим, морська поверхня здатна хвилеподібно структуруватися, породжуючи просторово-часовий порядок із закономірностями на зразок знаменитого "дев'ятого валу". Але для цього необхідно постійно і на великій площі виводити її з термодинамічної рівноваги. Це й робить сильний вітер. За умови такого зовнішнього підведення енергії в гру вступають закони поширення й резонансного посилення хвиль на водній поверхні – внутрішні резерви її структурування. У теорії дисипативних структур структурування пов'язують зі зниженням симетрії системи. У випадку водної поверхні це очевидно. Її симетрія максимальна в стані безструктурної рівноваги, коли в ній немає ніякого переважного напрямку. Ця симетрія наочно знижується в штормовому морі, на поверхні якого хвильові структури орієнтовані в новому напрямку.

Тепер уявімо, що ми перебуваємо в селі в другій половині спекотного липневого дня. Незважаючи на вітер, відчувається задуха. Сусід, у якого є свій "покажчик погоди" – давній перелом ноги – запевняє: протягом найближчих двох годин буде гроза. Але звідкіля їй узятися, коли на білястому небі від краю і до краю – ні хмарини? Тільки дим від труб могутньої ТЕЦ на обрії, кілометрів за 20 від нас. Проте через годину ми чуємо віддалене гуркотіння грому. Непомітно, "з нічого" у районі ТЕЦ виникла хмаринка, від якої до землі простяглися видимі струмочки дощу. "Хмаринка з підвітряного боку, – думаєте ви. – її віднесе від нас геть". Але хмаринка ця поводиться зовсім інакше. Вона розпливається по небу, як пляма розлитого вина по скатертині і йде на нас проти вітру. Через півгодини вона перетворилася на могутню хмару з градовою "наковальнею" на висоті близько 8 кілометрів. І з її вже не струмки дощички виливаються, а стіною ллє злива. У землю втикаються стріли блискавок, лунає гарматне ревіння грому. Далі – більше. Уже над нашою головою на очах згущуються хмари. От загриміло на іншому кінці неба: там "з нічого" за якісь півгодини утворився свій грозовий осередок. От уперше блиснуло й гримнуло десь поруч. Швидше в будинок! Ще через 20 хвилин день перетворюється на сутінки. Усе навколо блискає і гримить, шаленіє злива зі шквалом, сиплеться град. Через годину буйство стихії минає. Злива

стихає, починається дрібний доні без грози, моторошні чорні хмарища, що клубочуться над нами, перетворюються на аморфні шаруваті хмари. Нарешті, і ті якимось непомітно розсіюються. До вечора від них залишається лише безструктурний туман, що у низинах затримається всю ніч.

У даному випадку внутрішній потенціал структуроутворення інший – прихована теплота конденсації перенасиченої пари в полі тяжіння Землі. Вона розподілена у всьому об'ємі передгрозової атмосфери. Температури, необхідні для конденсації пари, постійно виникають і зникають у всьому об'ємі у вигляді ефемерних флуктуацій. Картина мерехтіння цих флуктуацій подібна до картини дзеркальної водної поверхні під дрібним дощиком: адже кожне джерело згасаючих хвиль у другому випадку – це теж аналог флуктуації. Тільки тепер температурні флуктуації охоплюють увесь об'єм речовини. Кінетична теорія газів Максвелла –



Больцмана дозволяє розрахувати їх інтенсивності й частоту виникнення, однак далі від цього вона не йде. Але, з погляду теорії дисипативних структур, передгрозова атмосфера цілком готова до того, щоб ці флуктуації, одержавши підтримку ззовні, стали господарями становища й породили новий, складно структурований стан термодинамічної системи.

Для цього потрібний лише невеликий зовнішній поштовх, який остаточно виведе її з термодинамічної рівноваги. У даному випадку його спричинив дим ТЕЦ. Відомо, що частинки сажі в повітрі інтенсифікують процеси конденсації пари в багато разів. (Саме тому над великими індустріальними містами в середньому випадає на третину більше опадів, ніж над їхніми околицями.) Але можливі й інші варіанти "спускового механізму". Наприклад, сільські хлопчики підпалили в безпечному місці цілий штабель старих автопокришок, улаштувавши багаття з чорним димом до небес. Або горить торф'яне болото. Чи пролетів літак з вихлопом двигунів, викинувши кіптяву в атмосферу. Чи очманіла наденергійна частинка космічного проміння породила в атмосфері зливу з мільярдів вторинних електронів і мезонів, які у великому об'ємі багаторазово інтенсифікували конденсацію.

А далі конденсація починає розвивати саме себе за рахунок усе більш інтенсивного виділення прихованої теплоти переходу "пара – рідина". Ця теплота породжує висхідні конвективні потоки повітря. Вони виносять величезні маси перенасиченої пари в більш холодні області атмосфери, де знижені температури знов-таки багаторазово інтенсифікують процес конденсації. Він захоплює такі висоти, яким у горах відповідає зона вічних снігів і льодів. Тут крапельки туману стають кристаликами льоду, а ті, у свою чергу, діють як каталізатори подальшої конденсації: Над структурами купчасто-дощової хмари виростає характерна розмита структура градової "кувалди". Повна просторова симетрія пересиченої пари порушилася, з неї утворилися видимі хмарні структури, чітко орієнтовані в просторі. Але в цій системі не припиняються й непомітні процеси формування нерівноважної системи електричних потенціалів. Видимими для спостерігачів є лише акти їх вирівнювання – розряди блискавок між хмарами й із хмар у землю. Полинули потоки довгу. Це означає подальше зниження рівня симетрії, подальше структурування парорідинної системи в просторі. У велику охолоджену зону за рахунок променистого теплообміну ринуло тепло з віддалених областей, які також почали інтенсивно охолоджуватися. І от уже формуються нові грозові осередки. Незабаром вони об'єднуються й починається сильна місцева гроза. Земне поле тяжіння перетворило приховану теплоту конденсації безструктурної пари на могутній структуротвірний потенціал, і тепер його реалізовано повною мірою. З його допомогою температурні флуктуації виявилися здатними подолати змертвілу рутинність другого начала Термодинаміки.

Але друге начало, нарешті, бере своє: гроза "видихається", хмари, що вигадливо клубочуться, у кінцевому підсумку перетворюються на безструктурний нічний туман. У даній місцевості й у даний день другий початок термодинаміки тріумфує. Але атмосфера над даною місцевістю – система відкрита, коли йдеться про речовину. Це означає, що вона обмінюється речовиною з іншими системами. І вже завтра з інших місцевостей сюди можуть надійти нові величезні маси пересиченої пари. І тоді описаний синергетичний механізм утворення структур так чи інакше знову буде запущено. Сам той факт, що він працює стільки ж мільярдів років, скільки гримлять над Землею місцеві грози, говорить про те, що це – могутній механізм. Ця схожість повністю відповідає універсальності другого начала

термодинаміки.

Колишня абсолютизація останнього в наш час здається наївною. У тільки що розглянутому прикладі яскраво виявляється основний принцип кібернетичної причинності: малий зовнішній вплив спричинює значні наслідки. Розглянута система неживої природи є по-справжньому кібернетичною. Її розвитком керує принцип позитивного зворотного зв'язку за сценарієм ланцюгової реакції процесу конденсації перенасиченої пари. У стабілізації структур, що утворюються, важливу роль відіграють негативні зворотні зв'язки. Зокрема, опускання до землі охолоджених мас повітря породжує могутні висхідні повітряні потоки. Вони не дають охолоджену повітря досягнути землі й втягують його у складний процес структуроутворення, який із землі ми спостерігається як розростання купчасто-дощових хмар. Злива остаточно стабілізує теплообмін між землею та атмосферою і підтримує динамічну рівновагу протягом півгодини й більше. Це суто кібернетичні процеси. Але синергетика, на відміну від кібернетики Вінера – Шеннона, не задовільняється їх абстрактно-математичним описом, який усувається від конкретних фізичних, хімічних та інших механізмів їх реалізації. Навпаки, основну увагу вона приділяє саме цим конкретним механізмам. І в результаті виявляє закономірності самоорганізації кібернетичних систем, їх внутрішньої активності та саморозвитку.

Отже, маємо завдяки розглянутому вище прикладу світоглядний наслідок вельми загального характеру. Якщо система внутрішньо не готова до поступального розвитку, якщо вона перебуває в самодостатній рівновазі, а не на межі її втрати, то навіть грандіозні за масштабами й зусиллями впливи на неї не дадуть результату. Так, якщо атмосфера не перенасичена парою, то навіть виверження вулкана не спровокує місцевої грози. Якщо ж система близька до порога виходу з термодинамічної рівноваги, то досить найменшого впливу, щоб почався процес утворення й саморозвитку складних структур. Так, у перенасиченій парі атмосфери досить точкового задимлення, щоб запустити процеси її самоорганізації.

Розглянемо питання про самоорганізацію живої матерії. Почнемо знов-таки з повсякденної ситуації, цього разу – з галузі техніки. Що означає термодинамічна рівновага для автомобіля? Вона означає, що запас бензину в баці вичерпаний, двигун зупинився й охолонув до температури навколишнього середовища. Усі матеріально-енергетичні потенціали автомобіля вирівняні відповідно до другого начала термодинаміки. І якби автомобіль був замкнутою термодинамічною системою, то на цьому його роль була б вичерпаною, але автомобіль – система, відкрита щодо речовини. Це значить, що він може знову вийти зі стану термодинамічної рівноваги за рахунок надходження речовини ззовні. Це і відбувається в разі чергової заправки висококалорійним речовиною-енергоносієм. Заправка знову відтворює систему матеріально-енергетичних потенціалів, і починається черговий цикл експлуатації автомобіля. І ніякого протиріччя з другим законом термодинаміки.

Цей повсякденний приклад дозволяє перекинути місток до розуміння сутності самоорганізації живих організмів. Вона зводиться до двох ключових моментів. По-перше, живі системи функціонують і розвиваються поза станом термодинамічної рівноваги. По-друге, це можливо остільки, оскільки вони є відкритими щодо речовини, їхня відкритість виявляється в незаперечній ролі харчування. Ця роль цілком аналогічна ролі періодичних заправок автомобіля речовиною-енергоносієм. У живих організмів у ролі енергоносіїв виступають різні речовини: компоненти

земної атмосфери для рослин, які в процесі фотосинтезу створюють з них складні органічні структури, жива речовина для травоядних і хижих тварин. З кров'ю енергоносії надходять до органів тварин, які також можуть працювати й розвиватися тільки поза станом термодинамічної рівноваги. Як тільки з тих чи інших причин припиняється харчування (трофіка) організму або органів, вони стають замкнутими системами й повністю підпорядковуються другому закону термодинаміки. А це означає для організму як цілого смерть від голоду, спраги чи задухи. Для органів і їхніх тканин це означає змертвіння й необоротне дегенеративне переродження в тих випадках, коли з тих чи інших причин припиняється їхнє наповнення кров'ю. Типовий приклад – інфаркти, що виникають у серці, нирках, легенях, кишковому їх причиною може стати закриття просвіту живлячих кровоносних судин тромбами або їх звуження внаслідок спазмів. Виникає знекровлення (ішемія) тканини. Тканина перетворюється на замкнуту термодинамічну систему, і якщо це протриває 10-20 хвилин, вона відмирає і вже ніколи не зможе повернутися до колишнього стану. Надалі складна тканина з колись розвинутою системою кровопостачання заміщується жилавою сполучною тканиною постінфарктних рубців.

У неживій природі нерівноважні процеси структуроутворення дуже вразливі щодо прояву другого начала термодинаміки. Згадаємо ще раз, як швидко вичерпується структуротвірний потенціал місцевої грози. Жива природа протягом мільярдів років еволюції виробила особливі механізми стабілізації термодинамічної нерівноваги, її "узаконення". Достатньо згадати те, що є загальновідомим зі шкільного курсу біології про системи дихання й живлення рослин і тварин, про системи кровообігу й травлення тварин і людини, про мітохондрії – клітинні склади енергії. Але найяскравіше ця особливість живої природи виявляється в молекулярно-генетичних механізмах, завдяки яким природа може тиражувати найскладніші не рівноважні термодинамічні системи в міріадах особин з їх внутрішніми органами, системами дихання й живлення. На початку ХІХ ст. П. Лаплас охарактеризував відомий на той час Всесвіт як гігантський механізм, який працює за чіткою детерміністською програмою. Ці механістичні уявлення виявилися наївними стосовно неживої природи. Але й тут подальший розвиток науки перевершив найзухвалішу фантазію людини. Сучасна генетика й молекулярна біологія свідчать, що, коли йдеться про жорсткий детермінізм, чітку запрограмованість надскладного розвитку, будь-яка запліднена зародкова клітина затьмарює Всесвіт, яким його бачив Лаплас. І на засадах цього ультрадетермінізму формується незліченна кількість живих систем, які за самою своєю сутністю заперечують принципи механістичного детермінізму. Цю єдність протилежностей біологія ХХ століття розкрила повною мірою, але вона неспроможна її задовільно пояснити у світлі дарвінівського розуміння механізмів історичного саморозвитку живої природи. Синергетика ще повинна сказати тут своє вагоме слово.

Завершимо вивчення термодинаміки таким запитанням: чому в термодинаміці майже століття панували уявлення про оборотність процесів, тоді як життя на кожному кроці їх спростовує? Адже навіть з позицій здорового життєвого глузду зрозуміло, що розсіяний в атмосфері дим не може втягтися назад у трубу, що зруйнований будинок сам не постане з руїн, що розсіяні на більярдній дошці кулі не зберуться назад у піраміду в її центрі й т.п.

Справа в тому, що термодинаміка як наука розпочиналася в першій половині позаминулого століття з вивчення найпростіших процесів – процесів поведінки ідеальних газів у теплових машинах. А тут необоротність процесів не відіграє

істотної ролі: робота теплових машин ґрунтується на найпростіших процесах стиснення й розширення газів, які є абсолютно однотипними й не пов'язані з утворенням і руйнуванням яких-небудь складних структур. Звичайно, при цьому відбувається необоротне розсіювання (дисипація) тепла. Рання термодинаміка знала про це, але нічого корисного для роботи теплових машин у дисипації не вбачала. Цю найпростішу форму дисипативних процесів вона лише емпірично констатувала й брала до уваги, але конкретно не вивчала. Вона не була готовою до цього, насамперед коли йдеться про розвиток понятійного апарату, а також математичних методів. Останнє є уже важливим моментом: адже у фізико-математичному природознавстві потрібно не тільки правильно міркувати, але й правильно обчислювати кількісно вимірювані параметри. Взявши за основу первородну механістичну парадигму природознавства, термодинаміка першої половини позаминулого століття природно запозичила в неї і уявлення про оборотність процесів. Це, врешті, типовий шлях розвитку природознавства – починати з найпростіших форм досліджуваних явищ і поетапно переходити до більш складного. При цьому вивчення найпростіших форм може розтягуватися на багато десятиліть. Може змінитися кілька поколінь учених, які працюють тільки в цій галузі. І це не може не провокувати людське мислення на абсолютизацію концепцій. Але рано чи пізно наука повною мірою усвідомлює всю їхню першопрохідницьку наївність.

Саме це і відбувалося в термодинаміці другої половини ХХ століття: вона не тільки критикує недоліки класичної термодинаміки, але й висуває гідні конструктивні альтернативи. Сучасна термодинаміка – це насамперед термодинаміка матеріально відкритих систем. Вона вивчає дисипативні процеси у всій різноманітності їхніх проявів, серед яких є і структуротвірні. Назвавши своє дітище теорією дисипативних структур, І. Прігожин умисно підкреслював застарілість уявлень ранньої термодинаміки щодо однозначно руйнівного характеру процесів розсіювання енергії. Наприклад, горіння могутнього освітлювача в заполярній оранжереї, якщо його розглядати замкнуто, без зв'язку із зовнішніми впливами, видається звичайним наслідком існування різниці електричних потенціалів на його клемі і розсіюванням світлової і теплової енергії. Але в системі оранжереї освітлювач і рослини, які він освітлює, являють собою енергетично відкриті системи. Розсіювання енергії тут перетворюється на могутні структуротвірні процеси фотосинтезу. Аналогічна ситуація і з роботою автомобільного акумулятора. Його розрядка в процесі запуску холодного двигуна – звичайний дисипативний процес, але він дозволяє запустити двигун, створити в ньому не рівноважну систему матеріально-енергетичних потенціалів. А вже після цього сам двигун завдяки роботі генератора дозволить акумулятору заповнити запаси енергії. Розглянувши цей повсякденний приклад, розуміємо, що відкритість систем означає їх залучення до систем більш високого рівня як автономних елементів і підсистем. А це – винятково кібернетична концепція, на яку не орієнтувалася й не могла орієнтуватися рання термодинаміка першої половини ХІХ століття.

Отже, завдяки засвоєнню кібернетичного погляду на процеси взаємодії матеріально-енергетичних потенціалів термодинаміка якісно оновилася, перетворилася в 50-80-х рр. на теорію дисипативних структур. Сфера її застосування в наш час надзвичайно широка й неухильно розширюється. Це говорить про те, що термодинаміка, як і раніше, залишається однією з найважливіших наук серед найбільш визначних творінь теоретичної фізики.

### 3.5 Квантова механіка

#### 3.5.1 Гіпотеза про кванти

Наприкінці минулого століття одним із найважливіших завдань було дослідження теплового випромінювання – випромінювання, джерелом якого є тепла енергія випромінюючого тіла. Випромінювання Сонця, електричної лампи розжарювання або будь-якої нагрітої речовини – приклади теплового випромінювання. У 1666 році І. Ньютон провів дослід, який у наш час відомий кожному школяреві: пропускаючи промінь сонячного світла через призму, він розклав його на спектр – на екрані виникла райдужна смуга. У "Лекціях з оптики" (1669 р.) він писав: "Світлові промені відрізняються своєю здатністю показувати те чи інше особливе забарвлення саме тому, що вони відрізняються за ступенем заломлення.... Властиві якомусь певному виду променів, вони не змінюються ні в результаті заломлення, ні з якої-не-будь іншої причини.... Тому ми повинні розрізняти два види кольорів: одні первісні й прості, інші ж складені з них.... У цьому полягає причина того, що звичайне світло має білий колір; адже світло – складна суміш із променів усіх видів і кольорів, які випромінюються з різних частин світних тіл". Через століття співвітчизник І. Ньютона Томас Юнг з'ясував, що різним кольорам сонячного спектра відповідають різні довжини хвиль: для фіолетового кольору – 0,4 мікрона, зеленого – 0,52 мікрона, червоного – 0,65 мікрона. За червоною ділянкою спектра лежить інфрачервоне випромінювання – його відкрив відомий астроном Вільям Гершель, а ліворуч від фіолетового – ультрафіолетові хвилі, відкриті І. В. Ріттером. Учений секретар Французької академії Франсуа Араго писав ще наприкінці п'ятдесятих років XIX століття про рідкісну "здатність дивуватися доречно", що дозволяє людям, які мають цей дар, помічати те, чого не бачать інші.

Спектр випромінювання будь-якого нагрітого тіла відомий, якщо ми знаємо, з яких хвиль воно складається і яку частку енергії від загального випромінювання вони переносять. Кол и змінюється температура тіла, змінюється і колір випромінювання – спочатку воно здається червоним, а зі збільшенням температури до 5000-6000 °С (температура поверхні Сонця) основна енергія випромінювання переноситься в жовту частину спектра.

Склад випромінювання прийнято описувати за допомогою спектральної функції  $i(\lambda, T)$ , що показує частку енергії, яку переносить хвиля з довжиною  $\lambda$ , якщо температура тіла  $T$ .

Намагаючись виміряти вигляд цієї функції, експериментатори зіткнулися з однією дуже складною проблемою: вигляд функції залежав не тільки від температури тіла, але і від його складу. Але природа пішла назустріч: є тіла, випромінювання яких залежить тільки від їхньої температури і зовсім не залежить від складу. Це такі тіла, які повністю поглинають усе випромінювання, що потрапляє на їх поверхню, і тому такі тіла називаються абсолютно чорними. Таким абсолютно чорним тілом є порожнина з малим отвором (печера з вузьким входом): усі промені, що потрапляють усередину порожнини через вузький отвір, багаторазово відбиваються від стінок, поглинаються ними й практично не виходять назовні через вузький отвір: порожнина здається чорною.

Спектральну функцію  $i(\lambda, T)$ , що описує випромінювання абсолютно чорного тіла, увів у науковий обіг видатний німецький фізик Густав Кірхгоф у 1859 році. Відразу стало зрозуміло, що вивчення вигляду цієї функції дозволить визначати на відстані температуру нагрітих тіл, що було важливо для практики, особливо в

металургії: у 1856 році Бессемер винайшов новий спосіб виробництва сталі, який дістав назву бесемерівського.

Експерименти з вивчення спектральної функції  $\epsilon(\lambda, T)$  виконав спочатку С. Ленглей, пізніше більш точні вимірювання виконав Генріх Рубенс. Виявилось, що за певної температури вигляд залежності спектральної функції від частоти має форму горба одnogорбого верблюда: спостерігається максимум на деякій частоті, а за великих і менших частот енергія випромінювання зменшується. Крім того, було встановлено, що положення максимуму залежить від температури нагрітого тіла: з підвищенням температури максимум зміщується в зону великих частот (менших довжин хвиль), а зі зниженням – у бік малих частот (великих довжин хвиль), так що за розміщенням цього максимуму можна відразу визначати температуру досліджуваного абсолютно чорного тіла.

Спроби теоретичного обґрунтування вигляду спектральної функції належать німецьким фізикам Вільгельму Віну та англійським фізикам Релею і Джинсу. Вони використали різні підходи з арсеналу класичної фізики, але описати спектральну функцію у всьому діапазоні частот не вдалося: результат Віна відповідав великим частотам, а результат Релея і Джинса – малим частотам; у діапазоні високих частот ультрафіолетова частина спектра Релея – Джинса свідчила про різке зростання енергії випромінювання, і ми одержали б джерело ні з чим незрівнянної яскравості. Цьому парадоксу дали пізніше драматичну назву – "катастрофа Релея-Джинса", або "ультрафіолетова катастрофа". Усе навколо нас, і ми самі в тому числі, повинно було б остудитися, усе тепло перейшло б у "бездонну прірву випромінювання". На щастя, ніякої катастрофи не відбувається.

Формулу, що описує вигляд спектральної функції у всьому діапазоні частот, "угадав" німецький професор Макс Планк 7 жовтня 1900 року. Експериментатор Рубенс відразу ж зіставив свої результати із запропонованою Планком формулою і переконався, що вона правильно описує спектр абсолютно чорного тіла.

Два місяці знадобилося Планку для обґрунтування своєї формули.. 1 грудня 1900 року ординарний професор фізики Макс Планк виступив з доповіддю на засіданні Німецького фізичного товариства. Доповідь М. Планка називалася "До теорії закону розподілу енергії в нормальному спектрі". Для обґрунтування своєї формули

Планку довелося зробити крок, який явно суперечив усім канонам класичної фізики. Це було тим паче болісно, що сам Планк був вихований на традиціях класичної фізики і сповідував її принципи.

Планку довелося припустити, що частинки, які випромінюють хвилі з частотою  $\nu$ , можуть змінювати свою енергію тільки стрибкоподібно, дискретними порціями  $h \cdot \nu$ , де  $\nu$  – частота хвилі, а  $h$  – коефіцієнт пропорційності, що увійшов у науку як "постійна Планка". У цьому – і тільки в цьому – випадку вдавалося вивести формулу для спектральної функції. Пізніше ці порції енергії назвали квантами від латинського "quantum" – "скільки", "кількість", "частка", "частина", "порція". Розв'язавши конкретну проблему в теорії випромінювання, Планк зруйнував логічну стрункість класичної фізики.

Числове значення сталої Планка  $h$ , отримане шляхом експериментів з розподілу інтенсивності випромінювання, виявилось дуже малим:  $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$  Дж·с. Зрозуміло, чому стрибкоподібний характер зміни енергії випромінювачів не помічали в повсякденному житті – порції енергії настільки малі, що її зміна здається неперервною.

Уведення Планком поняття про кванти енергії було вимушеним кроком. У 1931 році Планк говорив, що це був "... акт розпачу. Я повинен був одержати позитивний результат будь-що-будь, за будь-яку ціну". Планк, обґрунтовуючи свою формулу, припустився багатьох помилок, недоліків, а причина удачі стала зрозумілою тільки після того, як Ейнштейн висунув свою гіпотезу світлових квантів. Через багато років, аналізуючи доведення Планка, Ейнштейн напише: "Недосконалості спочатку не були помічені, і це було надзвичайною удачею для розвитку фізики".

Тільки через чверть століття нова наука – квантова механіка – пояснить справжній зміст революції в науці, яку здійснив Макс Планк.

У 1918 році Планк одержав Нобелівську премію за заслуги в розвитку фізики, зумовлені його відкриттям кванта енергії.

Відкриття Планка стало подією, яка ознаменувала початок квантової ери.

### **3.5.2 Фотони**

Відомі усім досліди з інтерференції і дифракції доводять, що світло – це хвиля. Ньютон, намагаючись пояснити скінченну швидкість поширення світла, припустив, що розжарене тіло випромінює частинки – корпускули, які передають світло. Але при цьому йому не вдалося пояснити явища інтерференції і дифракції, і корпускулярну теорію було надовго забуто.

Хвильова природа світла, яку всебічно дослідив Френель, здавалася абсолютно переконливою. У 1873 році Джеймс Клерк Максвелл пророкував, що світло, як і будь-яка інша хвиля, потрапляючи на поверхню, повинна чинити на неї тиск. Світловий тиск дуже малий і виміряти його експериментальним шляхом надзвичайно важко. Але цей блискучий експеримент здійснив Петро Миколайович Лебедев. Він виміряв світловий тиск не тільки на поверхні твердого тіла, але й на газі, і після його дослідів здавалося, що будь-які інші додаткові докази хвильової природи світла позбавлені сенсу – настільки переконливими були прояви того, що світло – це хвильовий процес. Генріх Герц, який експериментально довів хвильову природу електромагнітного випромінювання й справедливості теорії Максвелла, писав через два роки після свого відкриття: "З часів Юнга й Френеля ми знаємо, що світло – це хвильовий рух. Сумніватися в цих фактах більше неможливо: спростувати ці факти фізик неспроможний. З погляду роду людського хвильова теорія є очевидністю". Торжество хвильової теорії було очевидним, а теорія світлових корпускул Ньютона була надовго забута.

Нагадаємо, що Планк, пояснюючи закономірності теплового випромінювання, змушений був увести квантування енергії випромінюючого осцилятора (наприклад, електрона, що коливається відносно положення рівноваги в атомі). Але на поширення світла його ідеї дискретності не поширювалися й вважалося, що випромінювання й поширення світла відбувається у вигляді електромагнітної хвилі. Планк увів свій квант дії так, щоб не зашкодити хвильовій оптиці, створеній та апробованій протягом двох століть. Але, як писав Ейнштейн, "Планк посадив у вухо фізикам блоху". У 1905 році Ейнштейн опублікував роботу "Про евристичну точку зору на виникнення й перетворення світла", в якій уперше було висунуто гіпотезу світлових квантів і відкрито наступну важливу сторінку у квантовій фізиці. У цій роботі він писав: "... Напрошується питання: чи не є закони виникнення й перетворення світла такими, начебто світло складається з таких же квантів енергії?". Таким чином, Ейнштейн поширив планківську ідею квантування осциляторів на електромагнітне випромінювання. Із цього погляду, планківський осцилятор змінює

свою енергію, випромінюючи або поглинаючи відповідний квант світла. Ці кванти світла пізніше одержали назву "фотонів". Термін "фотон" запропонував Дж. Льюїс у 1926 році, і цей термін відразу прижився. Фотон став повноправною елементарною частинкою.

Висунуту ідею світлових квантів-фотонів Ейнштейн спочатку застосував для пояснення явища фотоефекту.

Уперше фотоефект спостерігав Генріх Герц, досліджуючи результати приймання електромагнітних хвиль. Він виявив, що при освітленні розрядного проміжку приймального резонатора світлом електричної дуги (він містить велику частку ультрафіолетового випромінювання) пробій виникає набагато легше, що може бути пов'язано з іонізацією повітря. Фотоефект, як і рентгенівські промені й радіоактивність, було відкрито випадково. Але історія науки показує, що подібні "випадки" випадають на долю тільки першокласних експериментаторів.

У 1887 році О. Г. Столетов досліджував фотоефект більш детально й виявив, що освітлення металевої пластини спричинене потоком негативно заряджених частинок (електрон ще не був відомий – його відкрив Томсон лише в 1897 році), причому величина електричного струму пропорційна інтенсивності опромінення.

Пізніше фотоефект вивчали багато дослідників. Докладний опис явища розпочав у 1902 році Філіпп Ленард. У 1905 році він одержав Нобелівську премію за дослідження катодних променів. Він установив дивний факт: енергія електронів, які вилітають при фотоефекті, зовсім не залежить від інтенсивності випромінювання, однак значною мірою залежить від його частоти: зі зменшенням частоти (збільшенням довжини хвилі) енергія електронів зменшувалася, а якщо довжина хвилі перевищувала певне критичне значення – фотоефект узагалі припинявся. Це був той самий Ленард, який пізніше здобув славу Герострата, ставши офіційним главою фізики в гітлерівській Німеччині й очоливши боротьбу з теорією відносності.

Отримані результати, однак, ніяк не узгоджувалися із загальновизнаною хвильовою теорією світла. Метал, як відомо, містить електрони, на які повинна діяти сила з боку електричного поля хвилі. Якщо ця сила досить велика, вона з успіхом могла б виривати електрони з металу. Але із цього погляду впливає, що цей так званий фотоелектричний ефект не відбудеться без джерела сильного світла. Якби світло було дуже слабким, то й електричне поле, пов'язане з ним, було б теж слабким, і слабких електричних сил було б недостатньо, щоб перебороти сили притягання, які звичайно утримують електрони всередині металу. Ми могли б також припустити, що якщо збільшувати інтенсивність світла, то швидкість, з якою вилітають електрони, зросте, оскільки вони вириваються більшою силою. Нарешті, ця залежність могла б не бути простою, але в цілому ми могли б припустити, що світло більшої частоти повинно бути менш ефективним. Якщо сила змінює свій напрямок за надзвичайно короткий період, то перш ніж електрон вийде з металу, сила змінить свій напрямок і буде штовхати його назад.

Експеримент дав, однак, зовсім інші результати.

Цю суперечність і вирішив А. Ейнштейн. Тут виявилася чудова особливість Ейнштейна – він більше довіряв інтуїції і фактам, а не загальноприйнятій думці. У явищі фотоефекту він побачив не прикре виключення з правила, а сигнал природи про існування ще невідомих законів. Просто спочатку були вивчені хвильові властивості світла, а в явищі фотоефекту проявилися нові, раніше невідомі



властивості.

Впровадивши уявлення про кванти світла, Ейнштейн застосовує його до явища фотоефекту. Він звернув увагу на те, що результати дослідження фотоефекту повністю збігаються з гіпотезою про світлові кванти. Якщо світло складається зі світлових квантів, що мають енергію  $E = h \cdot \nu$  ( $h$  – стала Планка), то, коли такий квант потрапляє на поверхню металу, він може бути поглинутим, тобто вибути зі світлового пучка, таким чином енергія кванта стає активною. Якщо ця кількість енергії  $h \cdot \nu$  потрапляє на електрон, електрон може завдяки цьому вивільнитися з металу (на це витрачається енергія  $A$ , яка дістала назву роботи виходу електрона), й набуде до того ж деяку швидкість, тобто електрон дістане кінетичну енергію:

$$T = \frac{m \cdot v^2}{2}$$

Це твердження можна записати у вигляді простого рівняння:

$$h \cdot \nu = A + \frac{m \cdot v^2}{2}.$$

Якщо прийняти цю гіпотезу, то явище фотоефекту відразу стане зрозумілим. Якщо частота світла (і відповідно енергія кванта) мала ( $h \cdot \nu < A$ ), то електрони не можуть вибиватися з металу. Якщо ми перейдемо в зону великих частот (з червоної частини спектра у фіолетову чи ультрафіолетову), то енергія кванта зросте настільки, що її буде достатньо для вибивання електронів ( $h \cdot \nu > A$ ). При цьому швидкість вибитих електронів буде залежати тільки від енергії кванта (частоти світла) і не залежатиме від їхньої кількості (інтенсивності світла).

Застосувавши свою теорію світлових квантів до явища фотоефекту, Ейнштейн не відразу знайшов прихильників. Навіть Планк, рекомендуючи запросити Ейнштейна на роботу в Берлін, просив "не занадто сильно докоряти" йому гіпотезою щодо явища фотоефекта. Навіть після експериментів Міллікена, метою яких була перевірка рівняння Ейнштейна, гіпотеза світлових квантів не викликала у фізиків довіри. У 1913 році Планк, Нернст, Рубенс і Варбург висунули Ейнштейна в члени Пруської академії наук. У заключній частині рекомендації вони писали: "У цілому можна сказати, що напевно чи існує яка-небудь з важливих проблем сучасної фізики, у вирішенні якої Ейнштейн не зробив би вагомого внеску. Те, що він іноді не потрапляє в ціль, як, наприклад, у випадку з гіпотезою світлових квантів, не можна вважати негативним аргументом, оскільки неможливо висунути нову ідею, навіть у найбільш точній науці, без деякої частки ризику".

Негативне ставлення фізиків до гіпотези світлових квантів позначилося навіть на формулюванні Нобелівського комітету. Ейнштейн одержав Нобелівську премію 1921 року (її було вручено йому в 1922 році) "за внесок у теоретичну фізику й особливо за відкриття закону фотоефекту". Про відкриття квантів електромагнітного поля – ні слова!

Як пояснити таке вперте неприйняття цієї гіпотези? На це є дві причини. Перша – очевидна – неможливість на той час узгодити гіпотезу квантів з добре перевіреними властивостями світла – інтерференцією і дифракцією. Друга пов'язана з тим, що, на відміну від відкриттів Планка і Бора, ця гіпотеза не приводила до настільки докладних і точних передбачень.

Світлові кванти перестали бути гіпотетичними частинками тільки в 1923-1924 роках після досліджень, які виконав А. Комптон. Він вивчав проходження

рентгенівських променів (тобто електромагнітного випромінювання з довжиною хвилі порядку атомних розмірів або коротше) через речовину й проаналізував розсіяне випромінювання. Сам по собі процес розсіювання хвилі – саме те, чого і слід було очікувати відповідно до старих уявлень. Електромагнітна хвиля діє на електрони в атомах, змушуючи їх швидко коливатися; такі електричні заряди, які швидко осилують, діють як маленькі передавачі електромагнітних хвиль і тому спричиняють випромінювання у всіх напрямках. Однак ми повинні були б сподіватися, що частота розсіяного випромінювання буде такою ж, як і частота пучка, що потрапляє на поверхню. Однак Комптон зробив відкриття, що довжина хвилі розсіяного випромінювання більша, ніж того випромінювання, яке потрапляє на поверхню, і збільшення довжини хвилі залежить від кута, під яким спостерігається розсіяне випромінювання (розсіяні промені "червоніші" від первинних!).

Чудо це можна зрозуміти, якщо згадати гіпотезу Ейнштейна про кванти світла, яку він запропонував для пояснення явищ фотоефекту. "Фотон ударився об електрон" – така ідея теорії Комптона для пояснення результатів, які він спостерігав. Взявши за основу його твердження, замість рентгенівських променів з довжиною хвилі  $\lambda$  і частотою  $\nu = \frac{c}{\lambda}$  – потрібно уявити собі потік часток-квантів з енергією

$E = h \cdot \nu$  й імпульсом  $p = \frac{h \cdot \nu}{c}$ . Зіштовхуючись з електронами атомів мішені, вони пружно (як більярдні кулі) взаємодіють з ними, віддають їм частину своєї первинної енергії і розсіюються з меншою енергією  $E = h \cdot \nu$  і меншою частотою (тобто збільшується довжина хвилі). Результати виконаних нескладних обчислень добре узгоджуються з даними спостережень; ми переконуємося, що гіпотеза світлових квантів набуває тепер ще більш конкретної форми. Ми повинні уявляти їх як деякі частинки, що переносять не тільки енергію, але й імпульс, і здатні зіштовхуватися з електронами, подібно до того, як один електрон може зіштовхуватися з іншими електронами. Можна спостерігати не тільки розсіяне випромінювання, але також і електрони, які повинні викидатися при розсіюванні рентгенівських чи гамма-променів; такі електрони (їх називають електронами віддачі) були виявлені насправді. Вимірювання швидкостей цих електронів віддачі, що вилітають у даному напрямку, знову повністю підтверджують пророкування теорії.

Не слід вважати, що ефект Комптона – це щось штучне, придумане тільки для того, щоб зміцнити позиції теорії світлових квантів. Ми щомиті зіштовхуємося з результатом подібного, але зворотного ефекту – розсіювання швидких електронів на фотонах малої енергії (зворотний ефект Комптона). Електрони високих енергій, які генерують зірки в процесі термоядерних реакцій, що відбуваються в них, взаємодіють з фотонами міжзоряного простору і, втрачаючи енергію при пружних зіткненнях з фотонами, передають їм свою енергію. У результаті виникає могутнє космічне рентгенівське випромінювання, дії якого зазнає і Земля.

Підсумуємо деякі наші міркування про світлові кванти-фотони.

Усі факти, викладені в цьому розділі, є, здавалося б, переконливим доказом справедливості квантових (корпускулярних) уявлень про природу світла. Однак не слід забувати, що є не менш вагомні аргументи на користь того, що світло є хвильовим процесом (інтерференція, дифракція світла). Так що ж таке світло?

У. Брегг, один з тих, хто вперше здійснив дифракцію рентгенівських променів на кристалі, писав: "Невже ми повинні вважати, що світло складається з корпускул у

понеділок, вівторок і середу, поки ми проводимо досліди з фотоефектом і ефектом Комптона, і уявляти собі його у вигляді хвиль у четвер, п'ятницю і суботу, коли ми працюємо з явищами дифракції й інтерференції?" Це питання можна перефразувати так: що таке світло – неперервні електромагнітні хвилі, які випромінює джерело, чи потік дискретних фотонів? Необхідність вдаватися в різних ситуаціях до різних, взаємовиключних понять видається штучною.

Такі подвійні властивості світла, однак, є тільки одним із проявів корпускулярно-хвильового дуалізму. Світло одночасно має властивості і хвилі, і частинки. Просто в різних експериментальних ситуаціях ми фіксуємо або хвильові, або корпускулярні властивості світла. У прояві тих чи інших властивостей є певна закономірність.

Щодо коротких хвиль (хвиль великих частот), то більш чітко виявляються його корпускулярні властивості: із цим пов'язане існування червоної межі фотоефекту й фотохімічних реакцій; хвильові властивості короткохвильового випромінювання виражені слабо – дифракцію рентгенівських променів удалася виявити тільки після того, коли як дифракційні ґрати було використано природний кристал. Для довгохвильового випромінювання квантові властивості виражені слабо, а основну роль відіграють його хвильові властивості. Саме в цій частині спектра спостерігаються явища інтерференції і дифракції.

Зараз ми не будемо детально обговорювати ситуацію, пов'язану з неоднозначністю властивостей світла – з його корпускулярно-хвильовим дуалізмом, і відкладемо обговорення цього питання в більш узагальненому вигляді.

### **3.5.3 Планетарний атом**

На початку століття існували різні, часто суперечливі уявлення про те, як влаштований атом. Але більшість учених розділяли точку зору Дж. Дж. Томсона: атом – це рівномірно позитивно заряджена куля розміром близько  $10^{-10}$  м, усередині якої "плавають" електрони, негативний заряд яких компенсує позитивний заряд, так що атом у цілому електрично нейтральний.

Хоч багато хто і згоджувався із такою моделлю атома, однак деякі фізики мали іншу точку зору. Так, ще в 1903 році японський фізик Х. Нагаока стверджував інше: "...простори всередині атома величезні порівняно з розмірами електричних ядерців, які його утворюють, іншими словами, атом є своєрідною складною астрономічною системою, подібною до кільця Сатурна". Але така модель планетарного атома мала один нездоланий недолік. Електрон, що обертається по коловій орбіті, зазнає доцентрового прискорення, і відповідно до теорії Максвелла повинен випромінювати електромагнітні хвилі (за законами класичної електродинаміки не випромінює тільки заряд, що рухається прямолінійно з постійною швидкістю). Тому, втрачаючи енергію на випромінювання, електрон повинен упасти на позитивне ядро (це відбудеться дуже швидко – за час  $10^{-11}$  сек) і атом припинить існування. Іншими словами, така планетарна модель приводила до нестійкості атома. Однак, реальний атом стійкий, тому це не дозволяло ставитися з оптимізмом до такої планетарної моделі. Теорія Дж. Дж. Томсона не суперечила вимогам стійкості атома.

Вирішальну відповідь на питання про будову атома дав Ернест Резерфорд у результаті виконаних у 1909-1911 роках дослідів із розсіювання  $\alpha$ -частинок (ядер гелію), які випромінює препарат радію, якщо на шляху цих  $\alpha$ -частинок поставити металеву фольгу. Був проведений підрахунок кількості частинок, що розсіюються під різними кутами, а результати проведених за результатами експериментів

розрахунків підтвердили, що атом має планетарну структуру. У 1911 році Резерфорд підбив підсумки проведених експериментів у своїй доповіді "Розсіювання  $\alpha$  і  $\beta$ -променів і будова атома". Атом відповідно до висновків Резерфорда подібний до Сонячної системи: у центрі атома знаходиться позитивно заряджене ядро надзвичайно малих розмірів ( $\sim 10^{-14} \div 10^{-15}$  м), але в цьому ядрі зосереджена майже вся маса атома; навколо ядра на відстані  $\sim 10^{-10}$  м обертаються електрони. Це дуже нагадує Сонячну систему: планети теж обертаються навколо Сонця. Резерфорд спостерігав розсіювання  $\alpha$ -частинок, спричинене атомами, – це результат відштовхування позитивно заряджених ядер гелію від позитивно заряджених ядер атомів.

Експериментальне підтвердження гіпотези про планетарний атом не лише не вирішило, а, навпаки, загостило основне питання: адже електродинаміка стверджує, що така система існувати не може; електрон, що обертається за її законами, неминуче впаде на ядро. Потрібно було робити вибір: або електродинаміка, або планетарний атом. Щоб вийти із цього скрутного становища, потрібний був Нільс Бор.

При вирішенні цієї здавалося б нерозв'язної проблеми Бор вчинив так, як Олександр Македонський з Гордієвим вузлом: він не розплутував його, а розрубав мечем.

Значення робіт Резерфорда, які підтвердили справедливність планетарної моделі атома, дуже влучно охарактеризував Н. Бор: "Вирішальним моментом в атомній моделі Резерфорда було те, що вона з усією ясністю показала: стійкість атомів не можна пояснити на основі класичної фізики, і квантовий постулат – це єдино можливий вихід з гострої дилеми. Саме ця гострота невідповідності змусила мене абсолютно повірити в правильність квантового постулату".

Бор відразу ж став прихильником планетарної моделі. Утім, через багато років, у 1922 році, він скаже Гейзенбергу: "Я ніколи не сприймав планетарну систему буквально..."

Ключем до вирішення проблеми атомної стійкості були прості закони, що визначають спектр випромінювання елементів.

У 1913 році Н. Бор сформулював свої знамениті постулати.

1-ий постулат – про стаціонарні стани. В атомі існують орбіти, рухаючись по яких електрон не випромінює.

2-ий постулат – про квантові стрибки. Електрон випромінює світло, тільки переходячи з однієї стаціонарної орбіти на іншу, тобто дискретними порціями. Коли електрон знаходиться на орбіті з щонайнижчою енергією, йому нікуди переходити (якщо він не одержує енергію ззовні). Так було пояснено стійкість атомів.

Бор переосмислив формулу Ейнштейна для фотоефекту, припустивши, що частоту випромінюваного світла визначає співвідношення:

$$h \cdot \nu = E_2 - E_1,$$

де  $E_2$  і  $E_1$  – два можливих значення енергії атома.

Але як визначити умову, що визначає стаціонарну орбіту? У будь-якого кругового руху, крім радіуса орбіти й швидкості руху по ній, є ще одна характеристика – момент кількості руху  $L$ , або орбітальний момент. Він дорівнює добутку маси на швидкість і на радіус орбіти, тобто:

$$L = m \cdot v \cdot r.$$

Бор стверджував: орбітальний момент електрона в атомі  $L$  не може бути довільним, він дорівнює цілому кратний від величини  $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ :

$$m \cdot v \cdot r = n \cdot h, \text{ де } n - \text{ціле число: } n = 1, 2, 3 \dots$$

Ця умова дозволяє виділити стаціонарні орбіти (єдино можливі в атомі) з нескінченної кількості всіх, які тільки можна уявити. А оскільки в цьому виділенні основну роль відіграє квант дії  $\hbar$ , то такий підхід називається квантуванням.

Стаціонарні орбіти (а, отже, і рівні енергії) нумеруються цілими числами  $n$ , що пробігають нескінченний ряд значень:  $n = 1, 2, 3 \dots$ . Ніякі інші рівні енергії, крім дозволених значень  $E_n$  в атомі неможливі. Відсутність неперервності практично всіх характеристик руху електрона в атомі – його енергії, швидкості, радіуса орбіти – характерна риса квантової теорії.

Потрібно відзначити, що успіх постулатів Бора визначався двома обставинами. По-перше, виконані відповідно до теорії Бора розрахунки лінійчастих спектрів елементів цілком збігалися з результатами спостережень; по-друге, розміри атомів ( $\sim 10^{-10}$  м), обчислені за формулою Бора, збігалися з передбаченнями кінетичної теорії матерії.

Незважаючи на незвичайність постулатів Бора, його теорія швидко набула визнання/тому що дозволяла групувати розрізнені раніше атомні явища навколо незрозумілої, але простої моделі.

Ці роботи Бора дали вирішальний поштовх усьому подальшому розвитку фізики, але тоді він ще не виявив себе як філософ, яким став пізніше. "Він виступив як фізик-теоретик із глибокою інтуїцією, схильний до оцінок і якісного розуміння явищ більшою мірою, ніж до їхнього математичного описування", – відзначає академік А. Б. Мігдал. Гейзенберг у статті "Квантова теорія і її інтерпретація" пише: "Математична ясність сама по собі не мала для Бора якоїсь особливої цінності. Він побоювався, що формальна математична структура сховає фізичну сутність проблеми, і був переконаний, що закінчений фізичний опис повинен, безумовно, передувати математичному формулюванню".

Хоча теорія Бора й описувала всі найголовніші властивості атомів, зміст правил квантування залишався загадковим. Бор так і назвав ці правила постулатами, тобто недоведеними припущеннями.

Тільки геніальним осяянням можна пояснити те, що Бор осмислив свою теорію до того, як з'ясувалися хвильові властивості частинок.

Гейзенберг так писав про постулати Бора: "Мова образів Бора – це мова поезії, що лише почасти має стосунок до зображуваної ним дійсності і яку ніколи не можна розуміти буквально.... Постулати Бора подібні до пензля й фарб, які самі по собі ще не є картиною, але з їх допомогою можна її створити".

А в 1949 році Альберт Ейнштейн так згадував про епоху створення квантової механіки: "Усі мої спроби пристосувати теоретичні основи фізики до нових результатів зазнали невдачі. Це було так, неначе з-під ніг пішла земля й ніде не було видно твердого ґрунту, на якому можна було б будувати. Мені завжди здавалося чудом, що цієї хиткої основи, повної протиріч, виявилось досить, щоб дозволити Бору – людині з геніальною інтуїцією і тонким чуттям – встановити найголовніші закони спектральних ліній та електронних оболонок атомів, включаючи їх значення для хімії. Це мені здається дивом і тепер. Це – найвища музикальність в області думки".

У наш час ідеї Бора перетворилися з предмета науки на елемент культури –

найвище, чого може досягти будь-як теорія.

З березня 1972 року космічна станція "Піонер-10" стартувала до Юпітера. На її борту знаходилася пластинка, на якій було вигравірувано інформацію, яку люди Землі вирішили повідомити іншим цивілізаціям: розміщення Землі в Сонячній системі, силуети чоловіка й жінки та схему атома водню.

У 30-і роки Нільс Бор відвідав Радянський Союз. Приїхавши до Грузії, в один із днів він із групою друзів відпочивав в Алазанській долині; неподалік від них розташувалися селяни, які пили вино й співали пісні. Нільс Бор підійшов до них. "Це знаменитий фізик Нільс Бор", – почали пояснювати селянам грузинські фізики. Але тамада різким жестом зупинив їх пояснення, і, звертаючись до співтрапезників, проголосив тост: "Друзі! Наш гість – найбільший учений світу, професор з Данії Нільс Бор. Він створив атомну фізику. Його праці вивчають школярі всіх країн. Побажаємо йому і його супутникам довгих років життя, здоров'я і щастя!". Слова тамади тихо перекладали Бору, і коли тамада закінчив, із землі піднявся старий, підійшов до Бора, взяв обома руками руку Бора й поцілував її. Слідом піднявся інший горець, наповнив вином чашу і, вклонившись Бору, випив її. Бора вразила нереальність того, що відбувалося: він заплакав від подиву й подяки.

### 3.5.4 Гіпотеза де Бройля. "Хвилі матерії"

Нагромадження суперечливих фактів про властивості світла (в одних випадках – типовий хвильовий процес, в інших – типова частинка-фотон), з одного боку, і постулати Бора, що пояснюють стійкість атома, – з іншого боку, вимагали однозначних пояснень.

їх запропонував Луї де Бройль у 1923 році. Де Бройль по-справжньому вірив у єдність природи і не міг навіть припустити, що світло – щось особливе, ні на що інше в природі не схоже. Він висунув гіпотезу, що не тільки світло, але і всі тіла в природі повинні володіти як корпускулярними, так і хвильовими властивостями одночасно. Але зрозуміти, що таке "хвиля матерії", звичайній людині важко; хвиля й частинка здаються нам зовсім несумісними поняттями. При слові "частинка" ми можемо уявити собі піщинку, камінь або навіть земну кулю; коли ми говоримо про хвилю, то уявляємо бурхливе море або струну, що бринить. І об'єднати ці уявлення в одному образі неможливо.

Фотон – частинка світла – має імпульс  $p = \frac{h}{\lambda}$ , де  $\lambda$  - довжина хвилі світла, якому відповідає цей фотон. Де Бройль припустив, що це співвідношення є універсальним, тобто руху частинок, що мають імпульс  $p$ , відповідає довжина хвилі  $\lambda = \frac{h}{p}$ . Ці хвилі одержали назву "хвилі де Бройля", або "хвилі матерії". Оскільки імпульс частинки дорівнює добутку її маси на швидкість руху ( $p = m \cdot v$ ), то довжина хвилі де Бройля  $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$ .

Дуже довго фізики не могли зрозуміти зміст гіпотези де Бройля. Сам автор уявляв хвилю – пілота, що на своєму горбу несе електрон; пройшло багато часу, поки звикли до думки, що хвиля де Бройля і є сам електрон.

Історія гіпотези, яку висунув де Бройль, більше ніж повчальна. Бувши за фахом істориком, він захопився фізикою під впливом старшого брата, визнаного вченого в галузі рентгенівських променів. У 1963 Луї де Бройль згадував: "Мій брат вважав > рентгенівські промені певною комбінацією хвилі й частинки, але, не будучи теоретиком, він не мав особливо чітких уявлень про цей предмет.... Він

наполегливо звертав мою увагу на важливість і безсумнівну реальність дуальних аспектів хвилі й частинки. Ці довгі бесіди допомогли мені глибоко осмислити необхідність обов'язкового зв'язку хвильової і корпускулярної точки зору".

Свої ідеї де Бройль виклав у дисертації, що називалася "Дослідження з теорії квантів". Керівником роботи був Поль Ланжевен, фізик класичної школи. Він поставився до ідей свого учня доброзичливо, але дуже стримано. Дисертація потрапила на рецензування до А. Ейнштейна й справила на нього велике враження. Він написав М. Борну: "Прочитай її! Хоч і здається, що її написав божевільний, написана вона солідно". Творець хвильової механіки Е. Шредінгер згодом подякував Ейнштейнові за те, що той "дав йому щигля в носа, вказавши на важливість ідеї де Бройля".

Прямий доказ існування хвильових властивостей електронів було отримано через три роки завдяки експериментам американських фізиків К. Девіссона і Л. Джермера. Вивчаючи відбивання електронів від поверхні кристалів, вони виявили, що електрони добре відбиваються тільки в тому випадку, якщо бомбардують кристал під певним кутом до його поверхні. Подібний ефект спостерігається і при взаємодії рентгенівських променів із кристалом – це було добре відомо. Підставивши у відомі формули, що описують дифракцію хвиль на кристалі, довжину хвилі де Бройля замість довжини хвилі рентгенівських променів, одержали повний збіг теорії й експерименту.

Як і багато інших відкриттів, дифракцію електронів було виявлено цілковито "випадково", хоч випадок говорить тільки до підготовленого розуму. Незабаром син знаменитого Дж. Дж. Томсона, що відкрив електрон, – Джозеф Томсон спостерігав дифракцію не на монокристалі, як Девіссон і Джермер, а на полікристалічній металевій фользі. Він одержав прекрасні фотографії дифракції електронів, що повністю нагадували дифракцію рентгенівських променів. Це було природно, оскільки електрони, прискорені потенціалом усього лише 100 вольтів, мають довжину хвилі де Бройля приблизно  $10^{-10}$  м – тобто її можна порівняти з довжиною хвилі рентгенівських променів і розмірами атома.

Пізніше явище дифракції частинок знайшло широке застосування для вивчення структури твердого тіла і його поверхні. Створено й широко використовуються для цих цілей електронні мікроскопи й електронографи.

### **3.5.5 Співвідношення невизначеностей**

На початку 1927 року практично одночасно відбулися дві важливі події. Гейзенберг здогадався, що поняття "хвиля" и "частинка" стосовно квантових об'єктів можна застосовувати строго тільки порізно й виразив цей здогад кількісно у вигляді співвідношення невизначеностей. Бор запропонував загальний принцип додатковості, окремим випадком якого було співвідношення невизначеностей Гейзенберга.

Аналізуючи можливості вимірювання координати й імпульсу квантового об'єкта (наприклад, електрона), Гейзенберг стверджував: неможливо одночасно і до того ж точно виміряти координату й імпульс. Беручи до уваги формулу де Бройля

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{h}{p},$$

це означає: не можна одночасно й у той же час точно визначити положення  $x$  атомного об'єкта й довжину його хвилі  $\lambda$ . Отже, одночасне використання понять "частинка" й "хвиля" є обмеженим. Чисельно таке обмеження виражає нерівність –

співвідношення невизначеностей:

$$\Delta x \cdot \Delta p > h.$$

Одночасно визначити і координату, і імпульс частинки не можна точніше, ніж це допускає співвідношення невизначеностей. Чим точніше задано координату, тобто чим менше  $\Delta x$ , тим менш точно можна задати імпульс, тому що величина  $\Delta p$  обернено пропорційна  $\Delta x$ . І навпаки, чим точніше задано імпульс частинки, тим гірше визначено її координату.

Обмеження, які встановлює співвідношення невизначеностей, є незмінним законом природи і ніяк не пов'язані з недосконалістю наших приладів. Посилання на всемогутність науки тут є недоречними; сила науки полягає не в тому, щоб порушувати закони природи, а в тому, щоб відкрити їх, зрозуміти й використовувати.

Пригадаємо одну обставину, добре відому з історії фізики. Винахідники дуже довго намагалися побудувати чи хоча б спроектувати вічний двигун, тобто машину, яка виконує роботу без підведення енергії ззовні. Петро I навіть заснував академію для проведення таких вишукувань. Однак аналіз будь-якого конкретного проекту вічного двигуна вже є помилковим. Сукупність усіх цих невдалих проектів, чи уявних експериментів, і привела до висновку, що вічного двигуна в природі не існує. Це твердження є одним з формулювань закону збереження енергії.

Подібним чином уявні досліди з вимірювання координати й імпульсу частинки привели Гейзенберга й Бора до іншого, не менш фундаментального закону – принципу невизначеностей: координата й імпульс частинки як точні фізичні величини одночасно не існують. Принципово не існує така процедура їх вимірювання, яка б привела до їх точного визначення. Це – не суб'єктивна неповноцінність експериментаторів, а об'єктивний закон природи.

На тих, хто бажає спростувати співвідношення невизначеностей, чекає доля винахідників вічного двигуна. Такі досліди намагався придумати сам Ейнштейн, але і він не зміг стати над природою. Цей приклад повчальний для тих, хто і в наш час намагається обійти обмеження, які накладає принцип невизначеностей.

Принцип невизначеностей не заперечує факту існування координати й імпульсу як точних фізичних величин: він тільки стверджує, що ці величини не існують одночасно як точні. Кожну з них окремо можна точно задати чи як завгодно точно виміряти.

Це твердження означає відмову від традиційних фізичних уявлень. Коли ми говоримо про траєкторію частинки, то розуміємо, що для кожного моменту часу відомо її положення (координата) й швидкість (імпульс). Принцип невизначеності позбавляє смислу поняття траєкторії, коли йдеться, звичайно, тільки про мікрочастинки. Для макрочастинок стала Планка – занадто мала величина, а значить координата й швидкість можуть бути визначені разом з будь-якою потрібною точністю, тобто траєкторія макрочастинки існує завжди.

Таким чином, квантова механіка створила особливу концепцію механічного руху – не по траєкторії. Рух по траєкторії був можливим завдяки точному передбаченню майбутнього, знаючи минуле. У квантовій механіці передбачення має імовірнісний характер. Це не означає відмови від закономірностей руху – просто закони квантової механіки описують не самі величини, а імовірності їхньої появи. Можна, наприклад, визначити ймовірність того, що електрон виявиться в тій чи іншій точці простору, але не можна передбачити заздалегідь, в яку саме точку він



потрапить.

Отже, на відміну від класичних законів руху, квантові закони самі містять у собі поняття ймовірності і це не пов'язано з недосконалістю наших приладів, а є сутністю природи речей.

Для пояснення причин, які призводять до обмежень, відображених у співвідношенні невизначеностей, Гейзенбергу й Бору довелося переглянути ще одну ідеалізацію класичної фізики – поняття спостереження. Сучасна фізика відрізняється від античної насамперед тим, що замінила умовивід дослідом. Сучасна фізика не заперечує, що явища природи існують незалежно від того, чи можемо ми їх спостерігати (так само, як і від нашої свідомості). Але вона стверджує: об'єктом спостереження ці явища стають тільки тоді, коли ми вкажемо точний спосіб вимірювання їх властивостей. У фізиці поняття "спостереження" та "вимірювання" нероздільні.

Спостерігаючи за світилами, люди колись вірили в те, що вони впливають на особисті долі людей. У наш час ми іронізуємо з приводу цього забобону (не будемо в даний момент обговорювати недавно відроджену моду на астрологічні прогнози, гадання, зняття псування, пристріту й т.і.). Але, імовірно, і наші не дуже далекі предки, які мали здатність науково мислити, посміялися б над твердженням, що коли-небудь з'являться такі неживі об'єкти, на які істотно впливають спостереження або вимірювання. Усякому зрозуміло, сказали б учені минулого, що Місяць і планети рухаються по своїх орбітах незалежно від астрономів і астрологів. Таким чином, механіка, яка виникла завдяки астрономічним вимірюванням, ніколи в минулому не ставила перед собою питання, якою є зворотна дія спостереження на об'єкт, і це, безумовно, не було потрібно доти, доки вивчався рух великих та важких тіл: планет, супутників, снарядів, ракет, машин і механізмів. Це питання є очевидно зрозумілим, і ніколи воно не виникало як окреме припущення – навіть під час найдокладнішого студіювання механіки. А механіка була основою всього точного природознавства.

Постараємося в наочній формі пояснити сутність радикальних змін у механіці, що виникли у зв'язку з відкриттям квантових законів руху.

Для цього обговоримо Деякі пункти, що не дискутувалися раніше, у доквантовій фізиці. Справа тут у необґрунтованій екстраполяції фізичних понять на такі об'єкти, до яких ці поняття незастосовні. Розглянемо процес фізичного вимірювання. Не усвідомивши змісту того, що відбувається при вимірюванні величини, неможливо визначити цю величину як фізичну. Перші вимірювання в науці були пов'язані зі знаходженням місця світил на небосхилі; звідси, як зазначалося, бере свій початок механіка.

Скільки б ми не аналізували сутність процедури вимірювання, вдаючись до цього прикладу, останнє, що може спасти на думку – це її вплив на вимірюваний об'єкт. Фіксуючи положення світила чи фотографуючи швидкісним методом кулю, що летить, ми ніяк не змінюємо їхній подальший стан. Так можна дійти висновку, що виникла майже позасвідомо впевненість у тому, що фізичний об'єкт узагалі не повинен зазнавати жодного впливу з боку вимірювального приладу, оскільки в протилежному випадку неможливо реєструвати об'єктивні закономірності, що не залежать від бажання та свідомості експериментатора. Точніше, ми вважаємо, що експериментатор не повинен користуватися такими вимірювальними приладами, які здатні певним неконтрольованим чином діяти на об'єкт, що вимірюється. Зараз, неначе у ретроспективу добре видно, що ця вимога явно суперечить концепції

атомізму. Але доки атом залишався радше умовивідним, аніж фізичним поняттям, ніхто, схоже, навіть не розмірковував про те, що прилад для вимірювань окремого атома сам не може бути меншим за атом. А якби й знайшовся мудрець, що своїм розумом дійшов до цього, його ідеї зустріли б, швидше за все, іронічну оцінку. Навіть тоді, коли квантова теорія вже існувала в її теперішньому вигляді, ідеї Бора і Гейзенберга щодо особливої ролі вимірювань у світі атомів багато вчених зустріли з великою недовірою. Причому Ейнштейн теж був серед цих багатьох.

Отже, у чому полягає взаємозв'язок між фізичним законом і фізичним вимірюванням? Оскільки чинність фізичного закону не залежить від волі спостерігача, на поставлене питання хотілося б відповісти так: те саме вимірювання, проведене в однакових умовах над тим самим об'єктом, завжди дає однаковий результат. Чи завжди це вірно? Для початку скористаємося наочною аналогією. Припустимо, що хтось захотів довідатися про показання секундоміра в темряві. Доведеться діяти на дотик. Але дотик до стрілки секундоміра, мабуть, вплине на її рух, і результат виявиться недостатньо точним, особливо якщо треба буде вимірювати проміжок часу між двома подіями. Як правило, ми використовуємо світлові хвилі, відбиті від стрілки, вважаючи, що це не позначається на її русі. Однак ще в 1900 році П. М. Лебедев експериментально довів, що світло тисне на тіла; ще раніше це було передбачено в електромагнітній теорії світла. Якщо уявити собі дуже легку стрілку секундоміра, то освітлення стане не менш грубою операцією, ніж обмацування. Чи можна тоді довідатися, які показання секундоміра? Один раз усе-таки можна, але після цього через грубе втручання хід секундоміра порушиться, причому так, що наступне показання ніяк не буде пов'язане з попереднім. Іншими словами, не можна виміряти проміжок часу, який розділяє два показання.

Атом з електроном, що рухається в ньому, – реальний аналог-маленького механізму, положення частинок якого неможливо визначити, не порушивши при цьому істотно сам рух. Причому це неможливо не технічно, а принципово. Чим точніше вимірюється координата електрона, тим сильніше змінюється його швидкість. Причому, і це дуже важливо, таку зміну швидкості не можна ні обчислити наперед, ні додатково визначити при вимірюванні координати.

Що відбудеться, якщо ми спробуємо виміряти координату електрона в атомі? Розміри атома –  $10^{-10}$  м. Тому для того, щоб одержати якесь розумне значення координати, треба хоч якось уточнити її – наприклад, виміряти з точністю до  $10^{-10}$  м. Адже достатньо сказати, що електрон знаходиться в атомі, і цим координату буде задано з точністю до  $10^{-10}$  м, і ніяких вимірювань не потрібно.

Щоб домогтися точності  $10^{-11}$  м при вимірюванні координати, треба спрямувати на атомний електрон інший електрон, довжина дебройлівської хвилі якого  $10^{-11}$  м. Якщо вони зіштовхнуться, це значить, що атомний електрон дійсно був зареєстрований у настільки малій області простору. Електрон, що налітає, мав швидкість  $7 \cdot 10^7$  м/с – це легко обчислити за його дебройлівською довжиною хвилі. Так само просто обчислити і його енергію – одержимо 14000 еВ. Якщо такий енергійний електрон зіштовхнеться з атомним, він передасть йому значну частину своєї енергії. Яку саме? На це питання відповісти неможливо, тому що зіткнення відбулося приблизно в межах точності  $10^{-11}$  м, точніше сказати не можна, беручи до уваги, що такою була дебройлівська довжина хвилі електрона, що налітає. Отже, ми не знаємо точно, як відбувався пронес зіткнення: чи зіштовхнулися електрони "в лоб", чи тільки злегка "зачепили" один одного. Електрон, задіяний у вимірюваннях, одержав у результаті самого вимірювання координати невизначений імпульс

(невизначену енергію). Ми бачимо, до якої міри визначення координати в квантовій механіці не схоже на прикладання лінійки до нерухомого предмета, як це робилося в класичній частині. Квантове вимірювання істотно впливає на вимірюваний об'єкт, і тим сильніше, чим більшої точності вимірювання вдається досягти. У класичній механіці завжди вважалося, що вимірювання зовсім не позначається на тій системі, над якою воно здійснюється. Спостереження за планетами, звичайно, не діє на їх рух. Але зовсім інша справа, коли йдеться про вимірювання характеристик електронів.

Невідомий імпульс, переданий при вимірюванні координати, саме такий, як цього вимагає принцип невизначеності, коли задано точність вимірювання координати. Ми вже вказували, що невизначеність координати  $\Delta x$  є величиною порядку  $\lambda$ . Частинка, що налітає, може передати який завгодно імпульс – від нульового до повного імпульсу  $p$ . Отже, невизначеність імпульсу  $\Delta p$  дорівнює  $p$ . За співвідношенням де Бройля

$$p = \frac{h}{\lambda}, \text{ отже } \Delta x \cdot \Delta p = p \cdot \lambda = h.$$

На прикладі зіткнення електронів ми розглядаємо один з уявних експериментів, аналіз яких привів Гейзенберга і Бора до створення принципу невизначеності. При цьому зрозуміло, що справа тут не в недосконалості методів вимірювання, а в самій природі вимірювального процесу стосовно мікросвіту.

Якщо проаналізувати, звідки наша впевненість у тому, що класичні об'єкти завжди рухаються по траєкторіях, то стане зрозумілим, що це пов'язано з необмеженою можливістю здійснювати вимірювання, не впливаючи на самі об'єкти.

Коли йдеться про квантові об'єкти, то такої можливості немає, і не через технічну недосконалість методів вимірювання, а тому і тільки тому, що постійна Планка хоч і мала, але має скінченну величину. Отже, є всі підстави стверджувати, що координата й імпульс електрона не є спільними фізично реальними поняттями в одному і тому ж його стані. Або одне, або інше, або, нарешті, обидва з деякою невизначеністю. Безглуздо запитувати, чи тому їх не можна виміряти, що вони разом не існують, чи, навпаки, вони разом не існують тому, що їх не можна одночасно виміряти. Це те саме твердження.

Квантова механіка зовсім не повинна відповідати на питання, що таке електрон або як він "улаштований". Це – завдання теорії елементарних частинок – науки, далеко ще не завершеної. Назва "механіка" начебто підкреслює, що вивчаються певні закони руху, а не природа об'єктів, що рухаються. Подібно до цього класична механіка вивчає рух планет навколо Сонця, не виявляючи інтересу до того, яка їх будова. Квантова механіка пояснює рух електронів біля ядра в атомі на основі тих, і тільки тих властивостей ядер та електронів, які є важливими для даного, конкретного завдання. Це завдання квантова механіка вирішує із такою ж повнотою, як класична механіка вирішує основне завдання астрономії. У цьому розумінні квантова й класична механіки довершені однаковою мірою. Рівняння класичної механіки впливають із квантових рівнянь автоматично, якщо встановити в них, що постійна Планка  $k$  дорівнює нулю. (Точніше кажучи, у цьому граничному переході довжина хвилі, що відповідає руху частинки, вважається нескінченно малою порівняно з простором, у якому відбувається рух. Але довжина хвилі пропорційна сталій Планка, так що формально можна спрямувати до нуля). Тоді невизначеності  $\Delta x$  і  $\Delta p$  начебто розв'язуються і їх можна незалежно зробити як

завгодно малими. Але це якраз і означає, що набирає сили поняття траєкторії.

Квантові закони руху не скасовують класичних, вони тільки встановлюють кількісну межу їх застосовності. Вона впливає із співвідношення невизначеності, причому за участі класичних понять координати й імпульсу. Доти, поки  $\Delta x$  і  $\Delta p$  малі порівняно з відповідними величинами  $x$  і  $p$ , що характеризують даний, конкретний рух по траєкторії, класичні закони руху застосовні. Але якщо невизначеності величин дорівнюють самим величинам або перевищують їх, необхідні квантові закони. На відміну від класичних, вони передбачають результати дослідів не однозначно, а ймовірнісним чином.

Форма цієї хмари не довільна – її визначають закони квантової механіки. Незбуджений атом водню дуже схожий на кулю, але форма збуджених атомів уже відрізняється від сферичної, і тим більше, чим сильніше збуджений атом. Збуджуючи атом, ми витрачаємо енергію саме на перебудову його електронної хмари. Кожній формі хмари відповідає своя, цілком визначена енергія. Тому, щоб перевести атом з однієї форми в іншу, ми повинні затратити строго визначену порцію енергії – квант  $h\nu$ , як того і вимагає другий постулат Бора.

Говорячи про форму тіл, ми, як правило, припускаємо, що в них є також і розміри. Це не завжди вірно: у більярдної кулі є і форма, і розміри, але про розміри хмари говорити вже важко, хоч її форма звичайно не викликає сумнівів. Найбільш несподіваний наслідок нової моделі атома полягає в тому, що атом не має визначених геометричних розмірів. Розмірів у тому розумінні, який ми вкладаємо в це поняття, маючи перед очима більярдну кулю. Звичайно, оскільки атом має певні обриси, можна виділити з нього ту його частину, у якій щільність електронної хмари максимальна, і назвати цю частину його розміром. Таке визначення правомірне, і ми його використовуємо (ми постійно говоримо про розміри атома), але при цьому варто пам'ятати, що визначити строго розміри атома не можна – це завжди питання розумної угоди.

Уже один цей наслідок квантової механіки дозволяє пояснити багато властивостей тіл, які ми спостерігаємо. Наприклад, різноманітність геометричних форм кристалів не повинна нас особливо дивувати: з однакових цеглин побудовані найрізноманітніші будинки, але нам не здається дивним, що цеглини – це просто цеглини, а не будинок у мініатюрі. У тіл, що оточують нас, є колір, запах, є розміри, але атоми, з яких побудовані ці тіла, не мають жодної із цих якостей. Точно так само вони не мають певної форми. Незмінні лише закони квантової механіки, від яких залежить ця форма.

Але чому атом, в якого немає навіть певних розмірів, такий стійкий? Нас не повинно дивувати і це: Адже Земля не стоїть на трьох китах, а, навпаки, повиснувши в порожнечі, мільйони років зберігає свою орбіту незмінною. Секрет її стійкості – у русі й незмінності динамічних законів, які керують цим рухом. У цьому ж причина стійкості атомів, хоч закони, які керують рухом електронів, зовсім не

схожі на закони небесної механіки.

Справедливості заради треба зауважити, що квантова стійкість є значно надійнішою, ніж динамічна стійкість класичної механіки: зруйнований атом відновлює свою структуру, але орбіта Землі вже ніколи не стане такою, як колись, якщо її хоч один раз порушить втручання стороннього космічного тіла.

Атоми різних елементів відрізняються між собою масою і зарядом ядра. Але за яким принципом слід розрізняти два атоми того самого елемента? Для кавунів таке питання неактуальне: ніхто ніколи не бачив зовсім однакових кавунів. Відрізнити одну цеглину від іншої вже складніше, і завдання трохи спрощується, якщо цеглини биті. З атомами ситуація аналогічна. Якщо маси й заряди ядер атомів однакові, то розрізнити їх можна тільки за формою електронної хмари, яка залежить від сили збудження атома. Усі незбуджені атоми того самого елемента не відрізняються між собою, як цеглини, виготовлені за однією формою.

Цей сучасний образ атома замінив планетарну модель атома Бора. Звичайно, і теперішні "портрети" не слід розуміти занадто буквально: це аж ніяк не "фотографії атома". Ні за допомогою простих, ні за допомогою складних приладів ми не можемо прямо виміряти розподіл електронної щільності всередині атома, тому що це неминуче зруйнує його ("Щоб довідатися смак пудингу, його треба з'їсти", – говорять англійці). І все-таки в нас є підстави довіряти створеній картині: з її допомогою ми можемо послідовно пояснити всі досліди, які спричинили формування такого образу атома. За останні сто років не було проведено жодного досліду, який би суперечив змальованій нами картині. Тому краще говорити не про її істинність, а про її плідність – про те, наскільки вона допомагає нам пояснити й передбачити особливості атомних явищ. І тут з'ясовується разюча річ: нам не так уже й необхідно знати, "як виглядає атом насправді". Для нас достатньо вивчити рівняння квантової механіки, і ми можемо передбачати все: як зміниться колір тіла при нагріванні, які спектральні лінії воно при цьому випромінюватиме; ми можемо передбачити форму кристалів і їх теплопровідність. Ми можемо, нарешті, побудувати атомну електростанцію й атомний криголам – і вони будуть справно працювати. І все це – без найменших посилань на справжню форму атома.

Але якби роль квантової механіки зводилася лише до побудови математичної схеми, що дозволяє обчислювати характеристики атомних явищ, які піддаються фізичним вимірюванням, то створення механіки атома можна бути б вважати закінченим. Однак фізика покликана дати нам щось більше – раціональну картину світу. Виконати настільки велику програму, вдаючись лише до одних формул і чисел, не можна – для цього необхідно відшукати образи й сформулювати відповідні їм поняття. Особливо це важливо для всіх нефізиків, які не знають і не розуміють формул квантової механіки. Для них мова образів і понять – єдиний спосіб проникнути вглиб атома. З часів Демокріта ми просунулися на цьому шляху досить далеко і маємо більш-менш задовільну сучасну картину атома.

Співвідношення невизначеностей і ймовірнісне трактування явищ мікросвіту не були прийняті беззастережно, причому серед супротивників були не тільки неспеціалісти, але і вчені першої величини, чий внесок у науку є величезним і незаперечним.

У 1927 році після доповіді Бора Лоренц, видатний голландський фізик, висловився про квантову механіку як завершену теорію атомних явищ: "Для мене електрон є частинкою, яка в кожен даний момент знаходиться у певній точці простору; і якщо я уявляю, що ця частинка в наступний момент буде знаходитися в

іншій точці, то я повинен уявити собі її траєкторію у вигляді лінії в просторі.... Мені б хотілося зберегти цей колишній науковий ідеал – описувати все, що відбувається у світі, за допомогою зрозумілих образів".

Саме такий напрямок думок легко зрозуміти: будь-яка нова теорія неминуче повинна переборювати інерцію устояних стереотипів мислення. Дивним є інше: як багато великих фізиків, у тому числі і творців квантової механіки, сумнівалися в її основних положеннях і завершеності. Серел них Планк, Ейнштейн, Шредінгер, де Бройль, Лауе.... Причому з роками їхні сумніви зміцнювалися – незважаючи на вражаючі успіхи квантової механіки.

Ейнштейн:

"До квантової механіки я ставлюся захоплено-недовірливо" (1926 р.).

"Філософія заспокоєння Гейзенборга-Бора (чи релігія?) так тонко придумана, що є для віруючого до пори до часу м'якою подушкою, з якої його не так легко зігнати. Нехай спить..." (1928 р.).

"Великий початковий успіх квантової теорії не може примусити мене повірити в гру в кості, яка лежить в його основі" (1944 р.).

"Бог не грає в кості", – повторював Ейнштейн до кінця життя,

Знаменно, що всі ці твердження так чи інакше містять нагадування про віру. Ейнштейн і Шредінгер, Планк і Лауе – усі вони визнавали могутність квантової механіки, але не вірили в її завершеність, хоч всі їхні спроби довести її несправедливість або суперечливість закінчувалися невдачею. Їхня позиція вимагала мужності: копенгагенська інтерпретація досить швидко стала догмою і будь-яка спроба засумніватися в її основах могла коштувати фізику його професійної репутації. А проте суперечки про квантову фізику продовжуються і донині.

Своєю запеклістю і непримиренністю суперечки ці іноді нагадують ворожнечу релігійних сект усередині однієї і тієї ж релігії. Ніхто з учасників суперечки не бере під сумнів існування бога квантової механіки, але кожен уявляє собі свого бога, і тільки свого. І, як завжди в релігійних суперечках, логічні докази є марними, тому що протилежна сторона їх просто неспроможна сприйняти: існує первинний емоційний бар'єр, акт віри, об який розбиваються всі невідпірні докази опонентів, так і не встигнувши проникнути у сферу свідомості.

Сумніви фізиків щодо основ квантової механіки аж ніяк не сприяють зміцненню довіри до неї серед маси неспеціалістів. Але задача справжнього вченого не в тому, щоб за будь-яку ціну утвердити свої погляди й авторитет, а в тому, щоб відшукати істину і підкоритися їй, навіть якщо вона суперечить його апіорним переконанням.

У чому суть цієї нескінченної суперечки? Вона схожа до спроби відшукати головну істину й останнє поняття, з яких логічно випливає все інше. Незважаючи на всю різноманітність сумнівів у супротивників ортодоксальної теорії і витонченості обговорюваних ними парадоксів, суть їхніх заперечень зводиться до заперечення ймовірнісної інтерпретації квантової механіки й усталеного в ній визначення "стан фізичної системи".

Численні опоненти дотепер не можуть упокоритися з тим, що в рамках квантової механіки всі питання про справжні характеристики індивідуальних квантових об'єктів і явищ, які не піддаються спостереженням, строго заборонені. Щоб перебороти цю заборону, було зроблено безліч спроб ввести в теорію так звані приховані параметри, що детально описують "справжні" властивості об'єктів, знання про які ми незабаром втрачаємо, усереднюючи відповідно до введених параметрів.

Усі ці спроби, однак, виявилися марними й ніяк не посприяли збагаченню квантової теорії.

Суперечкам про інтерпретацію квантової механіки немає краю: гордість людини і її віра у всемогутність людського розуму нелегко упокорюються з відкритими нею ж межами знання.

Характерно, що ніхто з опонентів не заперечує плідності й істинності висновків квантової механіки стосовно її застосовності. Нільс Бор, добре усвідомлюючи цей слабкий пункт позиції опонентів, із властивим йому м'яким гумором любив розповідати історію про свого сусіда по замиському будинку. У цього сусіда на дверях було прибито підкову. Одного разу хтось запитав його, невже він насправді вірить, що вона приносить у дім щастя. "Ні, звичайно, – відповів сусід, – але говорять, вона допомагає навіть тим, хто в неї не вірить".

Але – "не хлібом єдиним жива людина", і поки не зникли безкорисливі сумніви, суперечку цю не можна вважати вичерпаною. Вона, звичайно, не змінить основ існуючої теорії, але, можливо, полегшить пошуки нових шляхів і розуміння нововідкритих явищ.

### **3.5.7 Причинність класична і причинність квантова**

Імовірнісна інтерпретація квантової механіки дуже багатьом довелася не по душі і викликала численні спроби повернення до колишньої, класичної схеми опису. Це прагнення будь-що-будь використовувати старі знання в нових умовах людської зрозуміло, але нічим не виправдано. Воно нагадує бажання відставного солдата осмислити все різноманіття життя з позицій статуту стройової служби. Безумовно, його обурить безладдя в диско клубі, і досить важко пояснити йому, що там діють трохи інші закони, чим на армійському плацу.

Ще не так давно несумлінні інтерпретатори квантової механіки з підозрілою запопадливістю намагалися скасувати її тільки на тій підставі, що вона не узгоджувалася з придуманими ними схемами. Вони обурювалися "свободою волі", що нібито було даровано електрону, шельмували співвідношення невизначеностей і всерйоз доводили, що квантова механіка – непотрібна наука, раз вона розглядає не реальні події, а їх імовірності. Але навіть ті, хто шанобливо поставився до теорії атома, не завжди чітко усвідомлювали, як розуміти причинність атомних явищ, якщо кожне з них є випадковим, і наскільки достовірними є її передбачення, якщо всі вони засновані на понятті ймовірності.

Життєве поняття причинності – "усяке явище має свою причину" – не потребує пояснень, однак для науки воно даремне. Причинність у науці вимагає закону, за допомогою якого можна простежити послідовність подій у часі. Якщо вдатися до мови формул, то цей закон набуває вигляду диференціального рівняння, яке дістало назву рівняння руху. У класичній механіці такі рівняння – рівняння руху Ньютона – дозволяють визначити наперед траєкторію руху частинки, якщо точно задати її початкову швидкість і координату. Саме така, швидко окреслена схема пояснення й передбачення явищ природи завжди була ідеалом причинного опису в класичній фізиці. Вона не залишає місця для сумнівів і невірних суджень, і щоб підкреслити цю її якість, причинність у класичній фізиці назвали детермінізмом.

У квантовій фізиці така причинність відсутня. Але там є своя, квантово-механічна причинність і свій закон – рівняння Шредінгера. Закон цей ще могутніший порівняно з рівнянням Ньютона, оскільки вловлює і виділяє закономірності навіть у хаосі випадкових квантових подій – подібно до калейдоскопу, що у випадковому сполученні скелець дозволяє побачити фігури, які

мають зміст і красу.

Випадковість одиничних квантових подій – не результат дії невідомих причин, а первинний елементарний закон, якому вони підпорядковуються, це – відправна точка теорії, а не факт, що потребує пояснення. Імовірність – властивість і категорія, властива самій квантовій реальності, а не зручний математичний прийом, який використовують для описування результатів експерименту.

Незважаючи на логічну красу таких побудов, звикнути до них і визнати їх природними все-таки досить важко. Як завжди в квантовій фізиці, ці логічні труднощі пояснюються особливостями нашої мови й нашого виховання. Поняття "закономірність" і "випадковість", "вірогідність" та "імовірність" виникли задовго до квантової механіки, і зміст, що у них звичайно вкладають, не залежить від бажання квантових фізиків.

Проблема ймовірності – це проблема спостереження: що відбудеться, якщо ми зробимо щось. У класичній фізиці два однакові експерименти за однакових початкових умов завжди повинні привести до одного і того ж кінцевого результату. У цьому суть класичної причинності, чи детермінізму. Своєрідність квантово-механічної причинності полягає в тому, що навіть за незмінних умов вона може передбачити лише ймовірність результату окремого експерименту, однак цілком вірогідно передбачає розподіл результатів, коли кількість тих же самих експериментів велика. З квантової точки зору, традиційним є таке формулювання закону причинності: "знаючи точне сьогодення, можна з упевненістю передбачити майбутнє". Однак воно містить невірну передумову: через співвідношення невизначеностей ми в принципі не можемо знати сьогодення у всіх деталях. Висновок, однак, залишається вірним, якщо розуміти його тепер по-новому.

Можна без кінця жонглювати парадоксами на зразок "закономірна випадковість", "достовірна ймовірність", однак це нічого не додасть до наших знань про атом. Просто потрібно хоча б колись зрозуміти, що ймовірнісний опис атома не є результатом усереднення поки ще невідомих субатомних явищ, а є принциповою межею можливостей сьогоденної науки. Доки залишаються чинними співвідношення невизначеностей Гейзенберга, ми не можемо безмежно уточнювати наші знання про індивідуальні квантові об'єкти. По суті, нам це не потрібно: усі тіла в природі складаються з величезної кількості атомів, а властивості таких систем квантова механіка передбачає цілком правильно, тобто без жодної довільності.

Відповіді квантової механіки на питання, що ми задаємо природі, залежать від того, який бік атомного явища ми хочемо вивчити більш прискіпливо.

Вивчаючи природу, ми завжди свідомо чи несвідомо поділяємо її на дві частини – на об'єкт і спостерігача. Такий поділ не є однозначним; він залежить від того, яке явище ми вивчаємо і що ми хочемо про нього довідатися. Якщо під явищем ми розуміємо рух окремої частинки, то ця подія дискретна, випадкова і здебільшого не підлягає спостереженню. Але якщо явищем ми називаємо результат спостереження за рухом численних однакових квантових об'єктів, то ця подія безупинна, закономірна й описується хвильовою функцією.

Квантова механіка вивчає тільки такі явища та об'єкти. Для них вона дає достовірні та єдино правильні передбачення, що досі жодного разу не були спростовані досвідом.

### **3.5.8 Принцип додатковості**

Принцип додатковості, сформульований Н. Бором у 1927 році, є однією з найглибших філософських та природничонаукових ідей нашого часу. З цією ідеєю



можна порівняти лише такі ідеї, як принцип відносності або уявлення про фізичне поле.

Поштовхом до створення Бором його принципу додатковості виявилися результати Гейзенберга – його знамените "співвідношення невизначеностей". Бор звернув увагу на той факт, що координату та імпульс частинки не можна виміряти не тільки одночасно, але й за допомогою одного приладу. Ці вимірювання мають виконуватися з використанням приладів, що істотно розрізняються; несумісність цих приладів природно зумовлюється суперечливістю властивостей, що досліджуються з їх допомогою. Ці властивості дійсно несумісні, але однаково необхідні для повного опису об'єкта. Додатковість – так визначив Бор ці властивості.

Справді, потік світла ми досліджуємо із двох позицій. По-перше, за допомогою різних спеціальних методів досліджуються спектральні характеристики світла – які довжини хвиль є у випромінюванні, а, по-друге, – його енергетичні характеристики, оскільки визначається розподіл енергії в спектрі. У першому випадку вивчаються хвильові властивості світла, а в другому – корпускулярні, тому що енергію переносять фотони. Ці характеристики вивчаються за допомогою принципово різних приладів; вони є взаємодоповнюючими, так як хвильові та корпускулярні показники однаковою мірою необхідні для повного опису такого явища, як світло.

У перекладі на мову абстрактних понять наведене міркування можна узагальнити у такий спосіб. Квантовий об'єкт – це "річ у собі", поки ми не визначили способу його спостереження. Різні властивості вимагають використання різних способів, іноді несумісних між собою. Фактично виникає "експериментальна ситуація", дійовими особами якої виступають взаємозалежні "об'єкт" і "спостереження"; одне без одного вони не мають сенсу. Результат реалізації експериментальної ситуації (явище) відбиває вплив приладу на досліджуваний об'єкт. Вибираючи різні прилади, ми змінюємо експериментальну ситуацію і вивчаємо різні явища. І хоча додаткові явища не можна вивчити одночасно, в одному досліді, вони однаково необхідні для повного опису об'єкта дослідження.

Корпускулярно-хвильовий дуалізм викликає в недосвідченої людини цілком природний опір – поняття "частинка" і "хвиля" нам важко об'єднати у свідомості. Цю причину несумісності в нашій свідомості додаткових понять, однак, можна пояснити. Щоб пояснити результати дослідження мікросвіту, ми змушені вдаватися до наочних образів, які виникли ще в донаукові часи, і ці образи є не зовсім придатними для наших цілей. Серед основних положень формальної логіки – "правило виключеного третього": із двох протилежних висловлювань одне є істинним, інше – хибним, а третього бути не може. У класичній фізиці не було випадку, який би викликав сумнів у цьому правилі, оскільки поняття "частинка" і "хвиля" дійсно протилежні й несумісні. Але виявилось, що у квантовій фізиці вони однаково добре застосовні для опису властивостей тих самих об'єктів, і використовувати їх треба одночасно. Бор пояснив, що не можна беззастережно застосовувати класичні поняття для опису квантових явищ. У квантовій фізиці змінюються не тільки поняття, але і постановка питань про сутність фізичних явищ. Паулі навіть пропонував назвати квантову механіку "теорією додатковості" за аналогією з теорією відносності Ейнштейна.

На ідеально поставлене питання можна відповісти коротко: "так" чи "ні". Бор довів, що питання "хвиля чи частинка" стосовно до атомного об'єкта поставлено

неправильно, таких роздільних властивостей атом не має, і тому на це питання не можна дати однозначну відповідь "так" чи "ні". Квантовий об'єкт – це не частинка і не хвиля, і ні те, ні інше одночасно. Квантовий об'єкт – це щось третє, таке, що не дорівнює сумі властивостей хвилі й частинки, аналогічно, як русалка – це не сума жінки й риби. У нас немає органів відчуттів і образів, щоб уявити собі властивості цієї атомної реальності. Дві додаткові властивості квантового об'єкта не можна розділити, не зруйнувавши при цьому повноту і єдність природи.

Гейзенберг відкинув ідеалізацію класичної фізики – поняття "стан фізичної системи, незалежний від спостереження". Цим він передбачив один з наслідків принципу додатковості, оскільки "стан" і "спостереження" – додаткові поняття. Узяті порізно – вони неповні, і тому можуть бути визначені тільки спільно, одне через інше. Більш строго, вони взагалі не існують порізно: ми завжди спостерігаємо не взагалі щось, а неодмінно якийсь стан. Г навпаки: усякий стан – це річ у собі доти, поки ми не знайдемо спосіб його спостереження.

Поняття "хвиля" й "частинка", "стан" і "спостереження" – це ідеалізації, необхідні для розуміння квантового світу. Класичні картини є додатковими в тому розумінні, що для повного опису сутності квантових явищ необхідне їх гармонійне сполучення. Однак у межах звичної логіки вони можуть існувати незалежно, якщо області їх застосовності взаємно обмежені.

Ці й інші подібні приклади, як показав Бор, є окремими проявами загального правила\* будь-яке істинно глибоке явище природи не можна визначити однозначно за допомогою слів нашої мови; воно вимагає для свого визначення принаймні двох взаємовиключних додаткових понять. Це означає, що за умови збереження нашої мови й звичної логіки мислення у формі додатковості встановлює межі для точного формулювання понять, які відповідають істинно глибоким явищам природи. Такі визначення або однозначні, але неповні, або повні, але тоді неоднозначні, оскільки містять у собі додаткові поняття, несумісні в межах звичайної логіки. Серед таких понять – поняття "життя", "квантовий об'єкт", "фізична система" і навіть саме поняття "Пізнання природи".

Бор провадив величезну й напружену роботу, досліджуючи застосування поняття додатковості й в інших, крім фізики, галузях знання. Цю задачу він вважав не менш істотною, ніж чисто фізичні дослідження.

Чи зводяться біологічні закономірності до фізико-хімічних процесів? На перший погляд, усі біологічні процеси визначаються рухом частинок, з яких складається жива матерія. Граничне вираження такої точки зору – визначення фізіології як "фізичної хімії азотовмісних колоїдів". Але такий погляд відображає тільки одну сторону справи. Інша сторона, більш важлива – закономірності живої матерії, що хоч і визначаються законами фізики і хімії, але не зводяться до них. Для біологічних процесів характерна фіналістична закономірність, яка відповідає на питання "навіщо?". Фізику ж цікавлять тільки питання "чому?" і "як?". Віталісти вважають істотною тільки біологічну закономірність, заперечуючи фізико-хімічний аспект біологічних процесів.

Правильне розуміння біології є можливим тільки на основі додатковості фізико-хімічної причинності й біологічної цілеспрямованості. Поняття додатковості дозволяє здійснювати опис живих процесів на основі взаємодоповнюючих підходів.

У статті "Світло і життя" Бор зауважує, що "безупинний обмін речовин між організмом і навколишнім середовищем необхідний для підтримання життя, внаслідок чого чітко виділення організму як фізико-хімічної системи уявляється

неможливим. Тому можна вважати, що будь-яка спроба провести різку грань, що дозволяє здійснити вичерпний фізико-хімічний аналіз, ви кличе такі зміни в обміні речовин, які є несумісними із життям організму...".

Дійсно, намагаючись вивчити деталі механізму життєдіяльності клітини, ми піддаємо її різним, часом згубним впливам – нагріванню, пропущенню електричного струму, дослідженню в електронному мікроскопі і т.д. Зрештою ми зруйнуємо клітину і тому нічого не довідаємося про неї як про цілісний живий організм. Проте відповідь на питання "Що таке життя?" вимагає і аналізу, і синтезу одночасно. Процеси ці несумісні, але не суперечливі, а додаткові, і необхідність брати їх до уваги одночасно – лише одна з причин, із яких досі не існує відповіді на питання про сутність життя.

Бор багато міркував над застосуванням поняття додатковості в психології. Він казав: "Ми всі знаємо старе висловлення стосовно того, що, намагаючись аналізувати наші переживання, ми перестаємо їх відчувати. У цьому сенсі слова ми виявляємо, що між психологічними дослідженнями, для опису яких доцільно вживати слова "думки" і "почуття", існує співвідношення додатковості, подібне тому, яке існує між даними про поведінку атомів".

Фізична картина явища і його математичний опис є додатковими. Створення фізичної картини вимагає нехтування деталями й не веде до математичної точності. І навпаки, спроба точного математичного опису явища утруднює його розуміння.

Наука – це тільки один зі способів вивчення навколишнього світу; інший, додатковий спосіб, втілений у мистецтві. Спільне існування мистецтва й науки – одна з ілюстрацій принципу додатковості. Стрижень науки – логіка й досвід; основа мистецтва – інтуїція і прозріння. Вони не суперечать, а доповнюють одне одного: справжня наука подібна до мистецтва – точно так само, як справжнє мистецтво завжди містить у собі елементи науки. У вищих своїх проявах вони нерозрізнені і нероздільні, як властивості "хвиля-частинка" в атомі. Вони відображають різні додаткові сторони людського досвіду й лише взяті разом дають нам повне уявлення про світ. Ми тільки не знаємо, на жаль, "співвідношення невизначеностей" для сполученої пари понять "наука-мистецтво", а тому і міру збитковості при однобічному сприйнятті життя.

Ця аналогія, як і будь-яка аналогія, і неповна, і нестрога. Вона тільки допомагає відчути єдність і суперечливість усієї системи людських знань.

На питання "Що є додатковим стосовно поняття істини?" Бор відповів: "Зрозумілість".

### **3.6 Світ елементарних частинок**

У другій половині ХХ ст. фізики, які мали справу з вивченням фундаментальної структури матерії, одержали воістину дивні результати. Було відкрито багато нових субатомних частинок. Їх звичайно називають елементарними частинками, але далеко не всі серед них є справді елементарними. Багато які з них, у свою чергу, складаються з іще більш елементарних частинок.

Нові частинки, як правило, відкривають у реакціях розсіювання вже відомих частинок. Для цього зіштовхують частинки з якомога більшими енергіями, а потім досліджують продукти їхньої взаємодії і фрагменти, на які розпалися новоутворені частинки. До 50-х рр. основним джерелом первинних частинок були космічні промені, а в наш час – прискорювачі, які створюють інтенсивні пучки частинок з високими енергіями.

Світ субатомних частинок воістину різноманітний. Серед них і "цеглинки", з

яких побудована речовина: протони й нейтрони, що складають атомні ядра, а також електрони, які обертаються навколо ядер. Але є і такі частинки, котрі в речовині, що нас оточує, практично не зустрічаються – резонанси. Час їхнього життя – найменші частки секунди. По закінченні цього надзвичайно короткого проміжку часу вони розпадаються на звичайні частинки. Таких нестабільних частинок з коротким періодом існування надзвичайно багато: їх відомо вже понад три сотні.

У 50–70-і рр. фізики були фактично спантеличені численністю, різноманітністю і незвичайністю нещодавно відкритих субатомних частинок. Якщо наприкінці 40-х рр. було відомо 15 елементарних частинок, то наприкінці 70-х рр. їх було близько чотирьохсот. Зовсім незрозуміло, для чого стільки частинок. Чи є елементарні частинки хаотичними й випадковими уламками матерії чи, можливо, за взаємодіями цих частинок приховується чіткий порядок, що вказує на існування фундаментальної структури суб'ядерного світу? Розвиток фізики в наступні десятиліття показав, що така структура, без сумнівів, існує. Світу субатомних частинок властиві об'єктивні закономірності й глибокий структурний порядок. В основі цього порядку – фундаментальні фізичні взаємодії.

### **3.6.1 Фундаментальні фізичні взаємодії**

#### **3.6.1.1 Гравітація**

У своєму повсякденному житті людина зіштовхується з великою кількістю сил, які діють на тіла: сила вітру чи потоку води; тиск повітря; могутній викид хімічних речовин, які спричиняють вибух; м'язова сила людини; вага предметів; тиск квантів світла; притягання й відштовхування електричних зарядів; сейсмічні хвилі, що викликають часом катастрофічні руйнування; вулканічні виверження, що призводили до загибелі цивілізацій; і т.д. Одні сили діють безпосередньо, контактуючи з тілом, інші, наприклад гравітація, діють на відстані, через простір. Але, як з'ясувалося в результаті розвитку природознавства, незважаючи на таку велику різноманітність, усі діючі в природі сили можна звести до чотирьох фундаментальних взаємодій. Саме ці взаємодії в кінцевому підсумку відповідають за всі зміни у світі, саме вони є джерелом усіх матеріальних перетворень тіл, процесів. Кожна з чотирьох фундаментальних взаємодій подібна до трьох інших і в той же час має свої відмінності. Вивчення властивостей фундаментальних взаємодій є головним завданням сучасної фізики.

Гравітація першою з чотирьох фундаментальних взаємодій стала предметом наукового дослідження. Створена в XVII ст. ньютонівська теорія гравітації (закон всесвітнього тяжіння) дозволила вперше усвідомити справжню роль гравітації як сили природи.

Гравітація має ряд особливостей, що відрізняють її від інших фундаментальних взаємодій. Найбільш незвичайною особливістю гравітації є її мала інтенсивність. Гравітаційна взаємодія протона з електроном у 1039 разів менша від сили їх електричної взаємодії. Якби розміри атома водню визначалися гравітацією, а не взаємодією між електричними зарядами, то радіус нижчої (найближчої до ядра) орбіти електрона перевищував би радіус доступної для спостереження частини Всесвіту. Як може така слабка взаємодія бути панівною силою у Всесвіті?

Уся справа в другій незвичайній рисі гравітації – у її універсальності. Ніщо у Всесвіті не може уникнути гравітації. Кожна частинка зазнає дії гравітації і сама є джерелом гравітації, спричинює гравітаційне притягання. Гравітація зростає в міру утворення все більших скупчень речовини. І хоч притягання одного атома мізерно мале, але сукупна сила притягання з боку всіх атомів може бути значною. Це

виявляється й у повсякденному житті: ми відчуваємо гравітацію тому, що всі атоми Землі спільно притягають нас. Зате в мікросвіті роль гравітації дуже незначна. Ніякі квантові ефекти в гравітації поки що не доступні для спостереження.

Крім того, гравітація – дальнодіюча сила природи. Це означає, що, хоч інтенсивність гравітаційної взаємодії зменшується з відстанню, вона поширюється в просторі і може позначатися на дуже віддалених від джерела тілах. В астрономічному масштабі гравітаційна взаємодія, як правило, відіграє головну роль. Завдяки силі дальної гравітація утримує Всесвіт від розпаду на частини: вона утримує планети на орбітах, зірки в галактиках, галактики в скупченнях, скупчення в Метагалактиці.

Сила гравітації, що діє між частинками, завжди є силою притягання: вона прагне зблизити частинки. Гравітаційне відштовхування не виявлене.

Поки ще немає однозначної відповіді на питання, що таке гравітація – деяке поле, викривлення простору-часу чи те й інше разом. Щодо цього існують різні думки й концепції. Тому немає і завершеної теорії квантово-гравітаційної взаємодії.

### **3.6.1.2 Електромагнетизм**

За величиною електричні сили набагато перевершують гравітаційні, тому, на відміну від слабкої гравітаційної взаємодії, електричні сили, що діють між тілами звичайних розмірів, можна легко спостерігати. Електромагнетизм відомий людям, з незапам'ятних часів (полярні сяйва, спалахи блискавки й ін.).

Протягом тривалого часу електричні й магнітні процеси вивчалися незалежно одні від інших. Як ми вже знаємо, вирішальний крок у пізнанні електромагнетизму зробив у середині XIX ст. Дж. К. Максвелл, який об'єднав електрику й магнетизм у єдину теорію електромагнетизму – першу єдину теорію поля.

Існування електрона (одиниці електричного заряду) було доведене в 90-і рр. XIX ст. Але не всі матеріальні частинки є носіями електричного заряду. Електрично нейтральними є, наприклад, фотон і нейтрино. У ньому відмінність електрики від гравітації. Усі матеріальні частинки створюють гравітаційне поле, тоді як електромагнітне поле пов'язане тільки із зарядженими частинками.

Тривалий час загадкою була і сама природа магнетизму. Як і електричні заряди, однойменні магнітні полюси відштовхуються, а різнойменні – притягаються. На відміну від електричних зарядів, магнітні полюси зустрічаються не порізно, а тільки парами – північний полюс і південний. Добре відомо, що у звичайному магнітному стрижні один кінець діє як північний полюс, а інший – як південний. Ще з найдавніших часів робилися спроби одержати за допомогою поділу магніту лише один ізольований магнітний полюс – монополь. Але всі вони закінчувалися невдачею: при розрізанні виникали два нових магніти, кожен з яких мав і північний, і південний полюси. Можливо, існування ізольованих магнітних полюсів у природі виключено? Однозначної відповіді на це питання поки що не існує. Деякі сучасні теорії допускають можливість існування монополя.

Електрична й магнітна сили (як і гравітація) є дальнодіючими, їхня дія відчутна на великих відстанях від джерела. Електромагнітна взаємодія виявляється на всіх рівнях матерії – у мегасвіті, макросвіті і мікросвіті. Як і гравітація, вона підпорядковується закону обернених квадратів.

Електромагнітне поле Землі простягається далеко в космічний простір, могутнє поле Сонця заповнює всю Сонячну систему; існують і галактичні електромагнітні поля. Електромагнітна взаємодія визначає також структуру атомів і відповідає за переважну більшість фізичних і хімічних явищ і процесів (за винятком

ядерних). До неї зводяться всі звичайні сили: сили пружності, тертя, поверхневого натягу, вона визначає агрегатні стани речовини, оптичні явища й ін.

### **3.6.1.3 Слабка взаємодія**

До виявлення існування слабкої взаємодії фізика просувалася повільно. Слабка взаємодія відповідальна за розпадання частинок; з її проявом зіштовхнулися після відкриття радіоактивності й дослідження бета-розпаду.

У бета-розпаді виявилася найвищою мірою дивна особливість. Дослідження приводили до висновку, що в цьому розпаді начебто порушується один із фундаментальних законів фізики – закон збереження енергії. Здавалося, що частина енергії кудись зникала. Щоб "врятувати" закон збереження енергії, В. Паулі припустив, що при бета-розпаді разом з електроном вилітає, несучи із собою відсутню енергію, ще одна частинка. Вона нейтральна і має надзвичайно високу проникну здатність, унаслідок чого її не вдавалося слостеріати. Е. Фермі назвав частинку-невидимку "нейтрино".

Але пророкування нейтрино – це тільки початок проблеми, її постановка. Потрібно було пояснити природу нейтрино, але тут залишалося багато загадкового. Справа в тому, що електрони й нейтрино могли випромінювати лише нестабільні ядра. Але було незаперечно доведено, що всередині ядер немає таких частинок. Як же вони виникали? Було висловлено припущення, що електрони й нейтрино не існують у ядрі в "готовому вигляді", а якимось чином утворюються в процесі розпаду ядра. Подальші дослідження показали, що нейтрони, які входять до складу ядра, полишені самі на себе, через кілька хвилин розпалаються на протон, електрон і нейтрино, тобто замість однієї частинки з'являється три нові. Аналіз приводив до висновку, що відомі сили не можуть викликати такий розпад. Він, очевидно, породжувався якоюсь іншою, невідомою силою. Дослідження показали, що цій силі відповідає деяка слабка взаємодія.

Слабка взаємодія за величиною значно менша від усіх взаємодій, крім гравітаційної, і в системах, де вона присутня, ефекти слабкої взаємодії знаходяться в тіні електромагнітної та сильної взаємодій. Крім того, слабка взаємодія поширюється на дуже незначні відстані. Радіус слабкої взаємодії дуже малий. Слабка взаємодія припиняється на відстані, більшій за 10 нм від джерела, і тому вона не може впливати на макроскопічні об'єкти, а обмежується мікросвітом, субатомними частинками. Коли почалося лавиноподібне відкриття великої кількості нестабільних суб'ядерних частинок, то виявилось, що більшість з них беруть участь у слабкій взаємодії.

Теорію слабкої взаємодії було створено наприкінці 60-х рр. З моменту побудови Максвеллом теорії електромагнітного поля створення цієї теорії стало найбільшим кроком на шляху до єдності фізики.

### **3.6.1.4 Сильна взаємодія**

Остання серед фундаментальних взаємодій! – сильна взаємодія; вона є джерелом величезної енергії. Найхарактерніший! приклад енергії, що вивільняється сильною взаємодією, – Сонце. У надрах Сонця і зірок безупинно протікають термоядерні реакції, що їх викликає сильна взаємодія. Але й людина навчилася використовувати сильну взаємодію: створена воднева бомба, відкриті та удосконалюються технології керованої термоядерної реакції.

До уявлення про існування сильної взаємодії фізика йшла у процесі вивчення структури атомного ядра. Якесь сила повинна утримувати позитивно заряджені протони в ядрі, не дозволяючи їм розлітатися під дією електростатичного

відштовхування.

Гравітація занадто слабка і не може це забезпечити; очевидно, необхідна якась взаємодія, причому більш сильна, ніж електромагнітна. Згодом цю взаємодію було виявлено. З'ясувалося, що хоча за своєю величиною сильна взаємодія істотно перевершує всі інші фундаментальні взаємодії, але поза межами ядра вона не відчувається. Як і у випадку слабкої взаємодії, радіус дії нової сили виявився дуже малим: сильна взаємодія виявляє себе на відстані, що визначається розмірами ядра, тобто приблизно 10~15 м. Крім того, з'ясувалося, що сильну взаємодію відчують не всі частинки. Так, її відчують протони і нейтрони, але електрони, нейтрино та фотони їй не підвладні. У сильній взаємодії беруть участь звичайно тільки важкі частинки. Вона є відповідальною за утворення ядер та багато інших взаємодій елементарних частинок.

Теоретичне пояснення природи сильної взаємодії розвивалося важко. Прорив позначився лише на початку 60-х рр., коли була запропонована кваркова модель. У цій теорії нейтрони та протони розглядаються не як елементарні частинки, а як складені системи, побудовані з кварків.

Таким чином, у фундаментальних фізичних взаємодіях чітко окреслено різницю між силами далекодіючими та силами близькодіючими. З одного боку, взаємодії необмеженого радіуса дії (гравітація, електромагнетизм), а з іншого боку – малого радіуса (сильна та слабка взаємодії). Світ фізичних процесів розгортається в межах цих двох полярностей і є втіленням єдності гранично малого і гранично великого – близькодії в мікросвіті та далекодії у всьому Всесвіті.

#### **3.6.1.5 Проблеми єдності фізики**

Пізнання є узагальненням дійсності, і тому мета науки – пошук єдності в природі, пов'язування розрізнених фрагментів знання в цілісну картину. Для того щоб створити єдину систему, потрібно віднайти глибинну сполучну ланку між різними галузями знання, певне фундаментальне відношення. Пошук таких зв'язків і відносин – одне з головних завдань наукового дослідження. Кожного разу, коли вдається встановити такі нові зв'язки, значно поглиблюється розуміння навколишнього світу, формуються нові способи пізнання, які вказують шлях до невідомих раніше явищ.

З'ясування глибинних зв'язків між різними складовими природи – це одночасно і синтез знання, і новий метод, який спрямовує наукові дослідження по незнаних шляхах. Виявивши зв'язок між притяганням тіл у земних умовах і рухом планет, Ньютон ознаменував своїм відкриттям народження класичної механіки, яка є основою технологічної бази сучасної цивілізації. Відкриття зв'язку між термодинамічними властивостями газу й хаотичним рухом молекул поставило на міцну основу атомно-молекулярну теорію речовини. У середині минулого століття Максвелл створив єдину електромагнітну теорію, яка поєднала як електричні, так і магнітні явища. Пізніше у 20-х рр. нашого століття Ейнштейн спробував об'єднати в єдиній теорії електромагнетизм і гравітацію.

Але до середини ХХ ст. становище у фізиці радикально змінилося: було відкрито дві нові фундаментальні взаємодії – сильну й слабку. Створюючи єдину фізику, доводиться рахуватися вже не з двома, а з чотирма фундаментальними взаємодіями. Це трохи остудило запал тих, хто сподівався на швидке вирішення даної проблеми. Однак сам задум усерйоз не піддавався сумніву, і захопленість ідеєю єдиного опису не минула.

Існує точка зору, що всі чотири (чи хоча б три) взаємодії являють собою

явища однієї природи і можна створити їх єдиний теоретичний опис Перспектива створення єдиної теорії світу фізичних елементів (на основі однієї-єдиної фундаментальної взаємодії) залишається дуже привабливою. Це головна мрія фізиків. Але тривалий час вона залишалася лише мрією, і до того ж дуже невизначеною.

Однак у другій половині ХХ ст. з'явилися передумови для здійснення цієї мрії і впевненість, що ця справа аж ніяк не віддаленого майбутнього. Схоже, що незабаром вона цілком може перетворитися на реальність. Вирішальний крок на шляху до єдиної теорії було зроблено в 60 – 70-х рр. – йдеться про створення спочатку теорії кварків, а потім і теорії електрослабкої взаємодії. Є підстави вважати, що ми стоїмо на порозі більш могутнього й глибокого об'єднання, ніж коли-небудь раніше. Фізики переконуються все більше в тому, що нарешті починають вимальовуватися контури єдиної теорії усіх фундаментальних взаємодій – Великого об'єднання.

### **3.6.2 Класифікація елементарних частинок**

#### **3.6.2.1 Характеристики субатомних частинок**

Історично першими експериментально виявленими елементарними частинками були електрон, протон, а потім нейтрон. Здавалося, що цих частинок і фотона (кванта електромагнітного поля) достатньо для побудови відомих форм речовини – атомів і молекул. Такий підхід передбачав, що речовина складається з протонів, нейтронів та електронів, а фотони здійснюють взаємодію між ними. Однак незабаром з'ясувалося, що світ улаштований значно складніше. Було встановлено, що кожній частинці відповідає своя античастинка, яка відрізняється від неї лише знаком заряду. Для частинок з нульовими значеннями всіх зарядів античастинка збігається з частинкою (наприклад, фотон). У міру розвитку експериментальної ядерної фізики до цих частинок додалися ще понад 300 частинок.

Характеристиками субатомних частинок є маса, електричний заряд, спин, час існування частинки, магнітний момент, просторова парність, лептонний заряд, баріонний заряд та ін.

Коли йдеться про масу частинки, мають на увазі її масу спокою, оскільки вона не залежить від стану руху. Частинка, що має нульову масу спокою, рухається зі швидкістю світла (фотон). Не існує двох частинок з однаковими масами. Електрон – найлегша частинка з ненульовою масою спокою. Протон і нейтрон важчі за електрон майже в 2000 разів. А найважча з отриманих у прискорювачах елементарних частинок (Z-частинка) має масу в 200 000 разів більшу порівняно з масою електрона.

Електричний заряд змінюється в досить вузькому діапазоні й завжди кратний фундаментальній одиниці заряду – заряду електрона (-1). Деякі частинки (фотон, нейтрино) зовсім не мають заряду.

Важлива характеристика частинки – спин – власний момент імпульсу частинки. Так, протон, нейтрон та електрон мають спин  $1/2$ , а спин фотона дорівнює 1. Відомі частинки зі спіном  $0, 3/2, 2$ . Частинка зі спіном 0 при будь-якому куті повороту виглядає однаково. Частинка зі спіном 1 набуває попереднього вигляду після повного оберту на  $360^\circ$ . Частинка зі спіном  $1/2$  набуває колишнього вигляду після оберту на  $720^\circ$  і т.д. Частинка зі спіном 2 набуває попереднього положення через півоберту ( $180^\circ$ ). Частинок зі спіном більш як 2, можливо, узагалі не існує.

Залежно від спіну всі частинки поділяються на дві групи: бозони – частинки із цілими спінами 0, 1 і 2; ферміони – частинки з напівцілими спінами ( $1/2, 3/2$ ).



Частинки характеризуються також тривалістю існування. За цією ознакою вони поділяються на стабільні й нестабільні. Стабільні частинки – це електрон, протон, фотон і нейтрино. Нейтрон стабільний, коли знаходиться в ядрі атома, але вільний нейтрон розпадається приблизно за 15 хвилин. Всі інші відомі частинки нестабільні; час їхнього існування коливається від декількох мікросекунд до  $10^{21}$  с.

Велику роль у фізиці елементарних частинок відіграють закони збереження, які встановлюють рівність між певними комбінаціями величин, що характеризують початковий і кінцевий стани системи. Арсенал законів збереження у квантовій фізиці більший, ніж у класичній фізиці. Він поповнився законами збереження різних парностей (просторової, зарядової), зарядів (лептонного, баріонного й ін.), внутрішніх симетрій, властивих тому чи іншому типу взаємодій. При цьому виявилось, що чим інтенсивніша взаємодія, тим більше їй відповідає законів збереження, тобто тим більше вона симетрична. У квантовій фізиці закони збереження завжди є законами заборони. Але якщо закони збереження дозволяють якийсь процес, то він обов'язково відбувається реально.

Вершиною розвитку уявлень про закони збереження у квантовій фізиці є концепція спонтанного порушення симетрії, тобто існування стійких асиметричних розв'язків для деяких типів задач. У 60-х рр. експериментально було підтверджено так зване порушення комбінованої чіткості. Інакше кажучи, виявилось, що в мікросвіті існують абсолютні розходження між частинками й античастинками, між "правим" і "лівим", між минулим і майбутнім (стріла часу, чи необоротність мікропроцесів, а не тільки макропроцесів).

Виділення й пізнання характеристик окремих субатомних частинок – важливий, але тільки початковий етап пізнання їх світу. На наступному етапі потрібно ще зрозуміти, яка роль кожної окремої частинки, які її функції в структурі матерії.

Фізики з'ясували, що насамперед властивості частинки визначаються її здатністю (чи нездатністю) брати участь у сильній взаємодії. Частинки, які беруть участь у сильній взаємодії, утворюють особливий клас і називаються адронами. Частинки, які беруть участь у слабкій взаємодії і не беруть участі в сильній, називаються лептонами. Крім того, існують частинки – носії взаємодій.

Розглянемо властивості цих основних типів частинок.

### **3.6.2.2 Лептони**

Хоча лептони можуть мати електричний заряд, а можуть і не мати, спин у них у всіх дорівнює  $1/2$ . Серед лептонів найбільш відомий електрон. Електрон – це перша з відкритих елементарних частинок. Як і всі інші лептони, електрон, очевидно, є елементарним (у власному розумінні цього слова) об'єктом, тобто він не складається з якихось інших частинок.

Інший добре відомий лептон – нейтрино. Нейтрино є найбільш розповсюдженими частинками у Всесвіті. Всесвіт можна уявити безкрайнім нейтринним морем, у якому зрідка зустрічаються острови у вигляді атомів. Але незважаючи на таку поширеність нейтрино, вивчати їх дуже складно: нейтрино майже невловимі. Не беручи участь ні в сильній, ні в електромагнітній взаємодіях, вони проникають через речовину, начебто її взагалі немає. Нейтрино – це якісь "примари" фізичного світу.

Досить поширеними в природі є мюони, на частку яких припадає значна частина космічного випромінювання. Мюон – одна з перших відомих нестабільних субатомних частинок, відкрита в 1936 р. У всіх відношеннях мюон нагадує

електрон: має той же заряд і спін, бере участь у тих же взаємодіях, але має велику масу й нестабільний. Приблизно за дві мільйонні частки секунди мюон розпадається на електрон і два нейтрино. Наприкінці 70-х рр. було виявлено третій заряджений лептон, який одержав назву "тау-лептона". Це дуже важка частинка, її маса близько 3500 мас електрона, але у всьому іншому він поводить себе подібно електрону й мюону.

Назва	Маса	Заряд
Електрон	1	-1
Мюон	206,7	-1
Тау-лептон	3536,0	-1
Електронне нейтрино	0*	0
Мюонне нейтрино	0	0
Тау-нейтрино	0	0

**\* Існують експериментальні дані, які свідчать про те, що нейтрино всіма мають невелику масу (одна десятильйонна маси електрона), що є надзвичайно важливо для космології і теорії елементарних частинок.**

Значно розширився список лептонів у 60-х рр. Було встановлено, що існує кілька типів нейтрино: електронне нейтрино, мюонне нейтрино і тау-нейтрино. Таким чином, загальна кількість різновидів нейтрино дорівнює трьом, а загальне число лептонів – шести. Зрозуміло, у кожного лептона є своя античастинка; таким чином, загальна кількість різних лептонів дорівнює дванадцяти. Нейтральні лептони беруть участь тільки в слабкій взаємодії; заряджені – у слабкій та електромагнітній (див. таблицю)

### 3.6.2.3 Адрони

Якщо лептонів дванадцять, то адронів сотні; і переважна більшість з них – резонанси, тобто вкрай нестабільні частинки. Той факт, що адронів існують сотні, наводить на думку, що адрони – не елементарні частинки, а складаються з більш дрібних частинок. Всі адрони зустрічаються у двох різновидах – електрично заряджені й нейтральні. Найбільш відомі й поширені такі адрони, як нейтрон і протон. Інші адрони мають дуже нетривалий час існування і швидко розпадаються. Це клас баріонів (важкі частинки гіперони й баріонні резонанси) і велике сімейство мезонів (мезонні резонанси). Адрони беруть участь у сильній, слабкій та електромагнітній взаємодіях.

Існування й властивості більшості відомих адронів було встановлено в дослідах на прискорювачах. Відкриття безлічі різноманітних адронів у 50–60-х рр. укрив спантеличило фізиків. Але згодом частинки вдалося класифікувати за масою, зарядом і спіном. Поступово стала вибудовуватися більш-менш чітка картина. З'явилися конкретні ідеї про те, як систематизувати хаос емпіричних даних, розкрити таємницю адронів у цілісній науковій теорії. Вирішальний крок було зроблено в 1963 р., коли було створено кваркову модель адронів.

### 3.6.2.4 Частинки – носії взаємодій

Перелік відомих частинок не вичерпується лептонами й адронами, які є будівельним матеріалом речовини. У цей перелік не включено, наприклад, фотон. Є ще один тип частинок, які не є будівельним матеріалом матерії, а безпосередньо забезпечують чотири фундаментальні взаємодії, тобто утворюють своєрідний "клей", що не дозволяє світу розпадатися на частини.

Носієм електромагнітної взаємодії є фотон. Теорію електромагнітної взаємодії обґрунтовує квантова електродинаміка.

Носії сильної взаємодії – глюони. Глюони – носії взаємодії між кварками, які пов'язують їх попарно або трійками.

Носіями слабкої взаємодії є три частинки –  $W^{\pm}$  і  $Z^0$ -бозони. Їх було відкрито лише в 1983 р. Радіус слабкої взаємодії надзвичайно малий, тому його носіями повинні бути частинки з великими масами спокою. Відповідно до принципу невизначеності час існування частинок з такою великою масою спокою повинен бути надзвичайно коротким – усього лише близько  $10^{-26}$  с.

Висловлюється думка про можливе існування носія гравітаційного поля – гравітон. Подібно до фотонів, гравітони рухаються зі швидкістю світла; отже, це частинки з нульовою масою спокою. Але цим подібність між гравітонами й фотонами вичерпується. У той час як фотон має спин 1, спин гравітона дорівнює 2. Ця важлива відмінність визначає напрямки сили: при електромагнітній взаємодії однойменно заряджені частинки (електрони) відштовхуються, а при гравітаційній – усі частинки притягаються одна до одної. Власне кажучи, гравітони можна зафіксувати за допомогою експерименту. Але оскільки гравітаційна взаємодія дуже слабка й у квантових процесах практично не виявляється, то безпосередньо зафіксувати гравітони дуже складно й поки що цього зробити не вдалося.

Класифікація частинок – їх поділ на лептони, адрони й носії взаємодій – вичерпує світ відомих нам субатомних частинок. Кожен вид частинок відіграє свою роль у формуванні структури матерії, Всесвіту.

### **3.6.3 Теорії елементарних частинок**

#### **3.6.3.1 Квантова електродинаміка**

Квантова механіка дозволяє описувати рух елементарних частинок, але не їх виникнення або знищення, тобто застосовується лише для описування систем з незмінною кількістю частинок. Узагальненням квантової механіки є квантова теорія поля – це квантова теорія систем з нескінченною кількістю ступенів свободи (фізичних полів), яка враховує вимоги і квантової механіки, і теорії відносності. Потреба в такій теорії пояснюється квантово-хвильовим дуалізмом, існуванням хвильових властивостей у всіх частинок. У квантовій теорії поля взаємодію трактують як результат обміну квантами поля, а польові величини оголошуються операторами, які пов'язують з актами народження й знищення квантів поля, тобто частинок.

У середині ХХ ст. було створено теорію електромагнітної взаємодії – квантову електродинаміку (КЕД). Це продумана до найдрібніших деталей і оснащена досконалим математичним апаратом теорія взаємодії заряджених елементарних частинок (насамперед, електронів або позитронів) шляхом обміну фотонами. У КЕД для опису електромагнітної взаємодії використовується поняття віртуального фотона. Ця теорія задовольняє основним принципам як квантової теорії, так і теорії відносності.

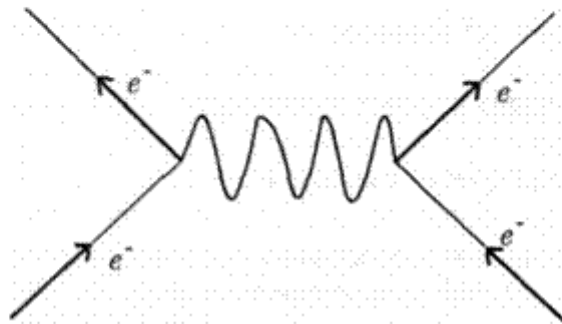
У центрі теорії – аналіз актів випромінювання або поглинання одного фотона однією зарядженою частинкою, а також анігіляції електрон-позитронної пари у фотон або породження фотонами такої пари.

Якщо в класичному описі електрони уявляються у вигляді твердої точкової кульки, то в КЕД електромагнітне поле, яке оточує електрон, розглядається як хмара віртуальних фотонів, що невідступно рухається разом з електроном, оточуючи його квантами енергії. Фотони виникають і зникають дуже швидко, а електрони

рухаються в просторі не по цілком визначених траєкторіях. Ще можна тим чи іншим способом визначити початкову й кінцеву точки шляху – до і після розсіювання, але сам шлях у проміжку між початком і кінцем руху залишається невизначеним.

Розглянемо, наприклад, акт випромінювання (віртуального) фотона електроном. Після того, як електрон випромінює фотон, той породжує (віртуальну) електрон-позитронну пару, що може анігілювати з утворенням нового фотона. Останній може бути поглинутим вихідним електроном, але може породити нову пару й т.д. Таким чином, електрон вкривається хмарою віртуальних фотонів, електронів і позитронів,

**які перебувають у стані динамічної рівноваги. Усі ці процеси можна уявити графічно (діаграми Р. Фейнмана). При цьому відомі тільки початкове й кінцеве положення електронів, а визначити момент, коли відбувається обмін фотонами і яка з частинок випромінює фотон, а яка поглинає, неможливо. Ці характеристики сховані за зав'язкою квантової невизначеності.**



Опис взаємодії за допомогою частинки-носія в КЕД призвів до розширення поняття фотона. Уводяться поняття реального (кванта видимого нами світла) і віртуального (швидкоплинного, примарного) фотона, якого "бачать" тільки заряджені частинки, котрі зазнають розсіювання.

Щоб перевірити, як узгоджується теорія з реальністю, фізики зосередили увагу на двох ефектах, які викликали особливий інтерес. Перший стосувався енергетичних рівнів атома водню – найпростішого атома. Згідно з КЕД, рівні повинні бути злегка змішеними щодо положення, яке б вони займали за умови відсутності віртуальних фотонів. Друга вирішальна перевірка КЕД стосувалася надзвичайно малої поправки щодо власного магнітного моменту електрона. Теоретичні й експериментальні результати перевірки КЕД збігаються надзвичайно точно – більш як дев'ять знаків після коми. Настільки вражаюча відповідність дає право вважати КЕД найбільш досконалою з усіх наявних природничо-наукових теорій. За створення КЕД С. Томанага, Р. Фейнман і Дж. Швінгер були визнані гідними Нобелівської премії за 1965 р. Великий внесок у становлення КЕД належить і видатному фізику-теоретику Л. Д. Ландау

Після подібного тріумфу КЕД було прийнято як модель для квантового опису трьох інших фундаментальних взаємодій. Зрозуміло, полям, пов'язаним з іншими взаємодіями, повинні відповідати інші частинки-носії.

### 3.6.3.2 Теорія кварків

Термін "кварк" обрано зовсім не довільно. У романі Дж. Джонса "Поминки за Фіннеганом" героєві сниться сон, у якому чайки, що ширяють над бурхливим морем, кричать різкими голосами: "Три кварки для містера Марка!" Така довільність цілком співзвучна з абстрактно-ненаочним характером понять сучасних фізичних теорій.

Теорія кварків – це теорія будови адронів. Основна ідея цієї теорії дуже проста: всі адрони побудовані з більш дрібних частинок – кварків. Кварки несуть

дробовий електричний заряд, що становить або  $-1/3$ , або  $+2/3$  заряду електрона. Комбінація з двох і трьох кварків може мати сумарний заряд, який дорівнює нулю або одиниці. Усі кварки мають спин  $1/2$ , отже, є ферміонами. Основоположники теорії кварків Гелл-Манн і Цвейг, щоб врахувати всі відомі в 60-і рр. адрони,увели три сорти (аромати) кварків:  $u$  (від  $up$  – верхній),  $d$  (від  $down$  – нижній) і  $s$  (від  $strange$  – дивний).

Кварки можуть поєднуватися між собою одним із двох можливих способів: або трійками, або парами кварк – антикварк. Із трьох кварків складаються порівняно важкі частинки – баріони; найбільш відомі баріони – нейтрон і протон. Більш легкі пари кварк – антикварк утворюють частинки, які одержали назву мезонів. Наприклад, протон складається з двох  $u$  – та одного  $d$  кварка ( $uud$ ), а нейтрон – із двох  $d$ - кварків і одного  $u$ -кварка ( $udd$ ). Щоб це "тріо" кварків не розпадалося, необхідна сила, яка б їх утримувала, якийсь "клей".

Виявилося, що підсумкова взаємодія між нейтронами й протонами в ядрі являє собою просто залишковий ефект більш могутньої взаємодії між самими кварками. Це пояснює, чому сильна взаємодія здається настільки складною. Коли протон "прилипає" до нейтрона чи іншого протона, у взаємодії беруть участь шість кварків, кожний з яких взаємодіє з усіма іншими. Значна частина енергії витрачається на міцне "склеювання" тріо кварків, а невелика – на скріплення двох тріо кварків один з одним.

Та обставина, що з різних комбінацій трьох основних частинок можна одержати усі відомі адрони, стала тріумфом теорії кварків. У 1969 р. удалося одержати прямі фізичні докази існування кварків у серії експериментів по розсіюванню на протонах електронів, розігнаних до високих енергій. Експеримент показав, що розсіювання електронів відбувалося так, ніби електрони налітали на крихтіні тверді вкраплення і відбивалися від них під самими неймовірними кутами. Такими твердими вкрапленнями усередині протонів є кварки. Але в 70-і рр. були відкриті нові адрони (пси-частинки, іпсилон-мезон та ін.). Цим було завдано відчутний удар першому варіанту теорії кварків, оскільки в тому варіанті теорії вже не було місця для жодної нової частинки. Усі можливі комбінації з кварків та їхніх антикварків було вже вичерпано. Проблему вдалося вирішити шляхом введення трьох нових ароматів. Вони одержали назву –  $charm$  (зачарований) чи  $c$ ;  $b$ -кварк (від  $beauty$  – гарний); згодом було уведено ще один аромат –  $t$  (від  $truth$  – справжній).

Кварки скріплюються між собою сильною взаємодією. Переносять сильну взаємодію глюони (колірні заряди). Розділ фізики елементарних частинок, що вивчає взаємодію кварків і глюонів, зветься квантовою хромодинамікою. Як квантова електродинаміка є теорією електромагнітної взаємодії, так квантова хромодинаміка є теорією, сильної взаємодії.

У даний час більшість фізиків вважає кварки справді елементарними частинками – точковими, неподільними і такими, що не мають внутрішньої структури. У цьому відношенні вони нагадують лептони, і вже давно є гіпотеза, що між цими двома різними, але подібними за своєю структурою сімействами повинен існувати глибокий взаємозв'язок. Таким чином, найбільш ймовірне число насправді елементарних частинок (не враховуючи частинки, що переносять фундаментальні взаємодії) на кінець XX ст. дорівнює 48. Із них: лептонів  $(6 \times 2) = 12$  плюс кварків  $(6 \times 3) \times 2 = 36$ .

### 3.6.3.3 Теорія електрослабкої взаємодії

У 70-і рр. XX ст. у природознавстві відбулася видатна подія: дві

фундаментальні взаємодії з чотирьох фізики об'єднали в одну. Картина фундаментальних взаємодій дещо спростилася. Електромагнітна й слабка взаємодії, здавалося б, дуже різні за своєю природою, постали як різновид єдиної електрослабкої взаємодії. Теорію електрослабкої взаємодії в остаточній формі створили два фізики, які працювали незалежно один від одного, – С. Вайнберг і А. Салам. Теорія електрослабкої взаємодії вирішальним чином уплинула на подальший розвиток фізики елементарних частинок наприкінці ХХ ст.

Головна ідея, на основі якої побудовано цю теорію, полягає в описуванні слабкої взаємодії мовою концепції калібрувального поля, відповідно до якого ключем до розуміння природи взаємодій є симетрія. Одна з фундаментальних ідей у фізиці другої половини ХХ ст. – це переконаність, що всі взаємодії існують лише для того, щоб підтримувати в природі певий набір абстрактних симетрій. Яке відношення має симетрія до фундаментальних взаємодій? Адже, на перший погляд, твердження про існування подібного взаємозв'язку здається дуже парадоксальним.

Насамперед про те, що слід розуміти під симетрією. Прийнято вважати, що предмет симетричний, якщо він залишається незмінним після тієї чи іншої операції з його перетворення. Так, сфера симетрична, тому що виглядає однаково при повороті на будь-який кут щодо її центра. Закони електрики симетричні щодо заміни позитивних зарядів негативними і навпаки. Таким чином, під симетрією розуміють інваріантність системи щодо певної операції.

Існують різні типи симетрій: геометричні, дзеркальні, негеометричні. Серед негеометричних є так звані калібрувальні симетрії. Калібрувальні симетрії мають абстрактний характер, органи чуття їх безпосередньо не фіксують. Вони пов'язані зі зміною відліку рівня, масштабу або значення якоїсь фізичної величини. Система має калібрувальну симетрію, якщо її природа залишається незмінною за таких перетворень. Так, наприклад, у фізиці робота залежить від різниці висот, а не від абсолютної висоти; напруга – від різниці потенціалів, а не від їхніх абсолютних величин і ін. Симетрії, на яких ґрунтується перегляд розуміння фундаментальних взаємодій, саме такого роду.

Калібрувальні перетворення симетрій можуть бути глобальними й локальними. Глобальні перетворення змінюють систему в цілому, у всьому її просторово-часовому об'ємі; у фізиці це виражається в тому, що у всіх точках простору-часу значення хвильової функції зазнає тих самих змін. Локальними калібрувальними перетвореннями називаються перетворення, які змінюються від точки до точки; інакше кажучи, хвильова функція в кожній точці характеризується своєю особливою фазою, якій відповідає певна частинка.

Глобальне калібрувальне перетворення теоретично можна змінити на локальне калібрувальне перетворення. Для зв'язку між ними й підтримки симетрії в кожній точці простору необхідні нові силові поля – калібрувальні. У природі існує ряд локальних калібрувальних симетрій, і необхідна відповідна кількість калібрувальних полів для їх компенсації. Так, силові поля можна розглядати як засіб, за допомогою якого в природі створюються властиві їй локальні калібрувальні симетрії. Значення концепції калібрувальної симетрії полягає в тому, що завдяки їй теоретично моделюються всі чотири фундаментальні взаємодії, які зустрічаються в природі. Усі їх можна розглядати як калібрувальні поля.

Найпростіша калібрувальна симетрія в електромагнетизму. Інакше кажучи, електромагнітне поле є не просто певним типом силового поля, що існує в природі, а проявом найпростішої (сумісної з принципами спеціальної теорії відносності)

калібрувальної симетрії, у якій калібрувальні перетворення відповідають змінам потенціалу від точки до точки. Учення про електромагнетизм формувалося протягом століть на основі копітких емпіричних досліджень, але виявляється, що ці ж результати досліджень можна одержати чисто теоретично, ґрунтуючись на знанні лише двох симетрій – найпростішої локальної калібрувальної симетрії і так званої симетрії Лоренца–Пуанкаре спеціальної теорії відносності. Ґрунтуючись тільки на існуванні цих двох симетрій, не проводячи жодного експерименту з електрики й магнетизму, можна побудувати рівняння Максвелла, вивести всі закони електромагнетизму, довести існування радіохвиль, можливість створення динамо-машини й т.д. А застосування ідей локальної калібрувальної інваріантності до перетворень Лоренца автоматично приводить до побудови теорії гравітації, подібної до загальної теорії відносності.

Щоб утвердити поле слабкої взаємодії як калібрувальне, насамперед необхідно встановити точну форму відповідної калібрувальної симетрії. Справа в тому, що симетрія слабкої взаємодії набагато складніша, ніж електромагнітного. Адже і сам механізм слабкої взаємодії є більш складним. По-перше, при розпаді нейтрона, наприклад, у слабкій взаємодії беруть участь частинки принаймні чотирьох різних типів (нейтрон, протон, електрон і нейтрино). По-друге, дія слабких сил приводить до зміни їх природи (перетворенню одних частинок на інші за рахунок слабкої взаємодії). Навпроти, електромагнітна взаємодія не змінює природи частинок, що беруть участь у ньому.

З'ясувалося, що для підтримки симетрії в описі слабкої взаємодії необхідні три нові силові поля, на відміну від єдиного електромагнітного поля. Було отримано і квантовий опис цих трьох полів: повинні існувати три нові типи частинок – носіїв взаємодії, по одному для кожного поля. Усі разом вони називаються важкими векторними бозонами зі спіном 1 і є носіями слабкої взаємодії. Частинки  $W^+$  і  $W^-$  є переносниками двох із трьох пов'язаних зі слабкою взаємодією полів. Третє поле відповідає електрично нейтральній частинці-носієві, який одержав назву  $Z^0$ -частинки. Існування  $Z^0$ -частинки означає, що слабка взаємодія не обов'язково повинна супроводжуватися переносом електричного заряду.

У створенні теорії електрослабкої взаємодії ключову роль відіграло поняття спонтанного порушення симетрії: не всяке рішення задачі повинно мати всі властивості його вихідного рівня. Так, частинки, зовсім різні при низьких енергіях, при високих енергіях можуть виявитися насправді однією і тією ж частинкою, що перебуває в різних станах. Таким чином, ідея Вайнберга і Садама про спонтанне порушення симетрії поєднала електромагнетизм і слабку взаємодію в єдину теорію калібрувального поля.

Чому ж електромагнітна і слабка взаємодії мають настільки несхожі властивості? Теорія Вайнберга – Салама пояснює ці відмінності порушенням симетрії. Якби симетрія не порушувалася, то обидві взаємодії були б порівнянними за величиною. Порушення симетрії спричинює різке зменшення слабкої взаємодії, оскільки воно безпосередньо пов'язане з масами  $W^-$  і  $Z^0$ -частинок. Можна сказати, що слабка взаємодія настільки мала тому, що  $W^-$  і  $Z^0$ -частинки дуже масивні. Лептони рідко зближаються на настільки малі відстані ( $r \sim 10^{-18}$  м), щоб на них ставав можливим обмін важкими векторними бозонами.

Але при великих енергіях (більш як 100 ГеВ), коли частинки  $W$  і  $Z$  можуть вільно народжуватися, обмін  $W^-$  і  $Z^0$ -бозонами здійснюється настільки ж легко, як і обмін фотонами (безмасовими частинками), відмінність між фотонами й бозонами



стирається. У цих умовах повинна існувати повна симетрія між електромагнітною і слабкою взаємодією – електрослабка взаємодія.

Найбільш переконливою експериментальною перевіркою Нової теорії могло б бути підтвердження існування гіпотетичних  $W$ - і  $Z$ -частинок. Їх відкриття в 1983 р. стало можливим тільки тоді, коли було створено дуже могутні прискорювачі Новітнього типу й означало торжество теорії Вайнберга – Салама. Було остаточно доведено, що електромагнітна й слабка взаємодії насправді були просто двома компонентами єдиної електрослабкої взаємодії. У 1979 р. Вайнбергу С, Саламу А., Глешоу С. було присуджено Нобелівську премію за створення теорії електрослабкої взаємодії.

#### **3.6.3.4 Квантова хромодинаміка**

Наступний крок на шляху до пізнання фундаментальних взаємодій – створення теорії сильної взаємодії. Для цього необхідно надати сильній взаємодії рис калібрувального поля. Сильну взаємодію можна уявити як результат обміну глюонами, який забезпечує зв'язування кварків (попарно або трійками) в адрони.

Задум тут такий. Кожен кварк має аналог електричного заряду, який є джерелом глюонного поля. Його назвали кольором. (Як у випадку з терміном "кварк", термін "колір" тут обрано довільно і ніякого стосунку до звичайного кольору він не має).

Якщо електромагнітне поле породжується зарядом тільки одного сорту, то більш складне глюонне поле створюється за участі трьох різних кольорових зарядів. Кожен кварк "пофарбований" в один із трьох можливих кольорів, які (цілком довільно) назвали червоним, зеленим і синім. І, відповідно, антикварки бувають античервоні, антизелені й антисині.

На наступному етапі теорія сильної взаємодії розвивалася за тією ж схемою, що і теорія слабкої взаємодії. Вимога локальної калібрувальної симетрії (тобто інваріантності щодо змін кольору в кожній точці простору) приводить до необхідності введення силових компенсуючих полів. Усього потрібно вісім нових силових компенсуючих полів. Частинками – носіями цих полів є глюони, і, таким чином, із теорії випливає, що повинно бути аж вісім різних типів глюонів. Як і фотон, глюони мають нульову масу спокою і спин 1. Глюони також мають різні кольори, але не чисті, а змішані (наприклад, синьо-антизелений), тобто глюони складаються з "кольору" й "антикольору". Тому випромінювання або поглинання глюона супроводжується зміною кольору кварка ("гра кольорів"). Так, наприклад, червоний кварк, втрачаючи червоно-антисиній глюон, перетворюється на синій кварк, а зелений кварк, поглинаючи синьо-антизелений глюон, перетворюється на синій кварк. У протоні, наприклад, три кварки постійно обмінюються глюонами, змінюючи свій колір. Однак такі зміни мають не довільний характер, а підпорядковуються твердому правилу: у будь-який момент часу "сумарний" колір трьох кварків повинен являти собою біле світло, тобто суму "червоний + зелений + синій". Це правило поширюється і на мезони, що складаються з пари кварк – антикварк. Оскільки антикварк характеризується антикольором, така комбінація завідомо безбарвна ("біла"), наприклад червоний кварк у комбінації з античервоним кварком утворить безбарвний мезон.

З погляду квантової хромодинаміки (квантової теорії кольору) сильна взаємодія є не що інше, як прагнення підтримувати певну абстрактну симетрію природи: збереження білого кольору всіх адронів при зміні кольору їхніх складових частин. Квантова хромодинаміка чудово пояснює правила, яким підпорядковуються



всі комбінації кварків, взаємодія глюонів' між собою (глюон може розпадатися на два глюони або два глюони злитися в один – тому і з'являються нелінійні члени в рівнянні глюонного поля), взаємодія кварків і глюонів (кварки вкриті хмарами глюонів і кварк-антикваркових пар), складна структура адрона, який складається з "одягнених" у хмари кварків, і ін.

Можливо, поки що передчасно оцінювати квантову хромодинаміку як остаточну й завершену теорію сильної взаємодії, але експериментальний статус її досить міцний і досягнення є багатообіцяючими.

### **3.6.3.5 На шляху до великого об'єднання**

Зі створенням квантової хромодинаміки з'явилася надія на побудову єдиної теорії усіх (чи хоча б трьох із чотирьох) фундаментальних взаємодій. Моделі, які поєднують в єдине ціле хоча б три з чотирьох фундаментальні взаємодії, називаються моделями Великого об'єднання. Теоретичні схеми, які поєднують усі відомі типи взаємодій (сильну, слабку електромагнітну й гравітаційну) називаються моделями супергравітації.

Досвід успішного об'єднання слабкої й електромагнітної взаємодій на основі ідеї калібрувальних полів вказав можливі шляхи для подальшого розвитку принципу єдності фізики, об'єднання фундаментальних фізичних взаємодій. Один з них базується на тому дивному факті, що константи взаємодії електромагнітної, слабкої і сильної взаємодій стають рівними за однієї і тієї ж енергії. Цю енергію назвали енергією об'єднання. Коли значення енергії перевищують  $10^{14}$  MeV або відстані становлять  $10^{-31}$  м, сильні й слабкі взаємодії можна описати за допомогою єдиної константи, тобто вони мають загальну природу. Кварки й лептони тут практично не помітні.,

У 70-90-і рр. було розроблено кілька конкуруючих між собою теорій Великого об'єднання. Усі вони базуються на одній і тій же ідеї. Якщо електрослабка й сильна взаємодії дійсно являють собою лише дві сторони Великої єдиної взаємодії, то останній також повинно відповідати калібрувальне поле з деякою складною симетрією. Вона повинна бути досить загальною, здатною охопити всі калібрувальні симетрії, які існують і у квантовій хромодинаміці, і в теорії електрослабкої взаємодії. Відкриття такої симетрії – головне завдання на шляху до створення єдиної теорії сильної та електрослабкої взаємодії. Існують різні підходи, що породжує конкуруючі варіанти теорії Великого об'єднання.

Проте всі ці гіпотетичні варіанти Великого об'єднання мають ряд загальних особливостей. По-перше, у всіх гіпотезах кварки й лептони – носії сильної та електрослабкої взаємодій – є складовими єдиної теоретичної схеми. Дотепер вони розглядалися як зовсім різні об'єкти. По-друге, залучення абстрактних калібрувальних симетрій приводить до відкриття нових типів полів, які мають нові властивості, наприклад здатність перетворювати кварки в лептони.

У найпростішому варіанті теорії Великого об'єднання для перетворення кварків на лептони потрібно двадцять чотири поля. Дванадцять із квантів цих полів уже відомі: фотон, дві W-частинки, Z-частинка і вісім глюонів. Інші дванадцять квантів – нові надважкі проміжні бозони, об'єднані загальною назвою X- і K-частинки (мають колір та електричний заряд). Ці кванти відповідають полям, які підтримують більш широку калібрувальну симетрію і перемішують кварки з лептонами. Отже, X- і Y-частинки можуть перетворювати кварки на лептони (і навпаки).

На основі теорій Великого об'єднання вдалося передбачити принаймні дві

важливі закономірності, які можна перевірити експериментально: нестабільність протона й існування магнітних монополів. Експериментальне виявлення розпаду протона й магнітних монополів могло б стати вагомим доказом на користь теорій Великого об'єднання. На перевірку цих передбачень спрямовані зусилля експериментаторів. Відкриття розпаду протона було б найфандіознішим експериментом ХХІ ст. Але поки що твердо обґрунтованих експериментальних даних із цієї проблеми немає.

А про пряме експериментальне виявлення Х- і У-бозонів поки що взагалі не йдеться. Річ у тім, що теорії Великого об'єднання мають справу з енергією частинок понад  $10^{14}$  м GeV. Це дуже висока енергія. Важко сказати, коли вдасться одержати частинки настільки високих енергій у прискорювачах. Сучасні прискорювачі ледве досягають енергії 100 GeV. І тому основною областю застосування й перевірки теорій Великого об'єднання є космологія. Без цих теорій неможливо описати ранню стадію еволюції Всесвіту, коли температура первинної плазми досягала  $10^{27}$  К. Саме за таких умов могли народжуватися й анігілювати над важкі бозони Х і У.

Але об'єднання трьох з чотирьох фундаментальних взаємодій – це ще не єдина теорія в справжньому розумінні слова. Адже залишається ще гравітація. Теоретичні моделі, в яких поєднуються всі чотири взаємодії, називаються супергравітацією.

Супергравітація базується на ідеї суперсиметрії, тобто такого переходу від глобальної калібрувальної симетрії до локальної, який би дозволив переходити від ферміонів (носіїв субстрату матерії) до бозонів (носіїв структури матерії, переносників взаємодій) і навпаки. Одна з теоретичних моделей зводить воєдино 70 частинок зі спіном 0; 56 частинок зі спіном 1/2; 28 частинок зі спіном 1; 8 частинок зі спіном 3/2 (їх назвали гравітіно) і 1 частинку зі спіном 2 (гравітон). Усі ці частинки були об'єднані єдиною суперсилою при колосальному значенні енергії  $10^{19}$  GeV ( $T = 10^{32}$  К,  $r = 10^{-35}$  м). У теоріях суперсиметрії виникла також ідея введення нових додаткових вимірів (10, 11 чи навіть 26) простору, які дозволять описати всі прояви властивостей речовини й переносників взаємодій. Тільки три з них виявляються в нашому світі, а інші залишилися скрученими, замкнутими в масштабі  $r = 10^{-35}$  м. Разом з тим на шляху об'єднання гравітації з іншими фундаментальними взаємодіями поки ще залишається багато проблем.

Таким чином, послідовне об'єднання фундаментальних взаємодій почалося із синтезу електрики й магнетизму в рамках теорії Максвелла в ХІХ ст. Об'єднання слабкої й електромагнітної взаємодій дістало надійне підтвердження в 1983 р. завдяки відкриттю Х- і У-частинок. Даних, які підтверджували б Велике об'єднання, поки що немає, але на них чекають. Забезпеченість теоретичними передумовами для створення єдиної теорії усіх фундаментальних взаємодій швидко зростає. Можливо, що вже на початку ХХІ ст. це найграндіозніше завдання всієї історії пізнання матерії буде вирішено. У певному розумінні це означає кінець фізичної науки як науки про фундаментальні основи матерії.

Але не слід відкидати й інші варіанти розвитку фізики у ХХІ ст. – відкриття нових фундаментальних взаємодій, нових субкваркових частинок, появу інших трактувань єдності матерії й ін. Особливо вагомими на цьому шляху є ті незвичайні уявлення, які у наш час з'являються там, де взаємодіють мікросвіт із мегасвітом, ультрамале з ультравеликим, фізика з астрономією і космологією.

### **3.7 Проблеми енергетики (ядерні і термоядерні реактори)**

#### **3.7.1. Поділ ядер урану**

Нейтрон – це ключ, який відкрив шлях до використання запасів

внутрішньоядерної енергії. Тепер ми знаємо про нього багато: він не має заряду, його маса трохи перевищує масу протона, а всі атомні ядра являють собою щільне упакування із суміші протонів і нейтронів. Джеймс Чедвік, співробітник лабораторії Е. Резерфорда, відразу ж після відкриття нейтрона в 1932 році висунув гіпотезу про протонно-нейтронну структуру ядра. Ця гіпотеза цілком себе підтвердила й жодного разу не піддалася сумнівам.

Першим, хто відразу ж зрозумів, що нейтрон – це ідеальний засіб для дослідження ядерних реакцій, був великий італійський фізик Енріко Фермі. Головна відмінність і перевага нейтрона – його електронейтральність, що дозволяє йому безперешкодно проникати в ядра будь-яких навіть найважчих елементів.

Е. Фермі більше відомий як теоретик, однак Нобелівську премію він одержав за роботи з експериментальної фізики. Будь-яка з наукових спеціалізацій була для нього завузькою, він був натуралістом у найточнішому й найширшому розумінні цього слова. Така універсальність – якість для XX століття надзвичайно рідкісна – виявилася вкрай необхідною для вирішення проблеми атомної енергії, де кожен крок був кроком у невідоме.

Улітку 1934 року група молодих італійських фізиків (старшому – Е. Фермі – було лише 33 роки) захоплено експериментувала: вони опромінювали нейтронами різні елементи й спостерігали, що відбувається. Ідея їхніх дослідів полягала в одержанні штучних ізотопів. Дійсно, коли нейтрон поглинається яким-небудь ядром, воно перетворюється в ізотоп того ж елемента, що у свою чергу прагне позбутися зайвого нейтрона. Найпростіший шлях – перетворити нейтрон у протон, вивільнивши при цьому електрон. Коли відбувається такий  $\beta^-$  розпад, утворюється ядро нового елемента, яке має заряд і масу на одну одиницю більші, ніж у вихідного ядра. За короткий період "команда Фермі" опромінила 68 елементів і синтезувала майже півсотні нових ізотопів.

Але головне відкриття чекало на них 22 жовтня 1934 року: нейтрони в сотні разів ефективніше захоплюються ядрами, якщо на шляху нейтронів установити шматок парафіну або опустити мішень під воду. Подив учених не проходив аж дві години -- доти, поки Фермі з властивою йому елегантністю не окреслив контури нового фізичного явища. Суть його надзвичайно проста: молекули води  $H_2O$  складаються з водню й кисню, а маса нейтрона практично дорівнює масі протона. Тому при зіткненні нейтрона з ядрами водню він швидко сповільнюється – у десятки разів швидше, ніж при зіткненнях з важкими ядрами, – а після цього легко вступає в ядерні реакції.

Подив звичайно є наслідком зіткнення несподіваних чинників з інерцією мислення. За багато років фізики звикли до думки, що ядро – це хоч і не підвладне відчуттям, але щось дуже міцне, і щоб його змінити, необхідно якнайсильніше розігнати снаряд – нехай це буде протон чи  $\alpha$ -частинка. Із цією метою було навіть винайдено прискорювачі. А для нейтрона все виявилось навпаки: чим повільніше він рухався, тим легше ядра поглинали його. На відкриття ядерних реакцій, зумовлених повільними нейтронами, чекало велике майбутнє: без нього не можна було б запустити ядерний реактор. У 1938 році Енріко Фермі був удостоєний Нобелівської премії "За відкриття штучної радіоактивності, викликаної бомбардуванням повільними нейтронами".

Серед великої кількості елементів, які Е. Фермі зі своїми співробітниками опромінювали повільними нейтронами того літа 1934 року, був і уран, що займав тоді останнє місце в таблиці Д. І. Менделєєва. Заряд його дорівнює 92, тому якщо

ядро урану захопить нейтрон з наступним випромінюванням електрона, то його заряд збільшиться на одиницю, а уран перетвориться на наступний за ураном "трансурановий елемент" з номером 93.3 дослідів Фермі такий висновок впливав настільки природно, що він відразу ж став науковою сенсацією і надбанням газет. Багато хто з радіохіміків почали пошук "трансуранових" елементів.

Німецькі радіохіміки Отто Ган і Фріц Штрассман у 1937 році повторили досліди Фермі з опромінення урану нейтронами. Детальний хімічний аналіз продуктів, що утворилися після опромінення урану, поставив їх у безвихідь: було зафіксовано барій, лантан, церій – елементи, що знаходяться в середній частині 'таблиці Менделєєва! Нам важко зрозуміти зараз їхнє здивування: уже в школі ми дізнаємося, що ядро урану зазнає поділу, і не бачимо в цьому нічого дивного. Спробуємо, однак, глянути на це явище очима першовідкривачів і, якщо не зрозуміти, то хоча б відчутти корінь їхніх сумнівів. Насамперед, вони – хіміки, і хімічний елемент для них – якась надзвичайно стійка індивідуальність, яка залишається неушкодженою, пройшовши через жар і холод, нескінченні розчинення, кристалізації і бурхливі хімічні реакції. Лише недавно вони, на превелику силу, звикли до того, що іноді, у процесі радіоактивного розпаду ядер, один елемент може перетворитися на інший. Але найбільше, чого можна було б у цьому випадку домогтися, – це пересунути елемент у таблиці Менделєєва на одну, максимум на дві клітинки. Але ж порядковий номер барію – 56 – майже вдвічі менший, ніж порядковий номер урану 11 якщо повірити в те, що барій дійсно утворився з урану, доведеться припустити, що елементи в таблиці Менделєєва можна переміщати, як завгодно, – жоден хімік змириться із цим не міг.

Зміст результатів, які отримали в Німеччині О. Ган і Ф. Штрассман, розтлумачили Лізе Мейтнер і її племінник Отто Фріш: Гай і Штрассман спостерігали розпад ядра урану внаслідок захоплення ним нейтрона (трохи пізніше вони, на пропозицію біолога У. Арнольда, ввели загальноприйнятий тепер термін "поділ ядра" – за аналогією з поділом клітини, точнісінько так само, як за чверть століття до них Резерфорд увів поняття "ядро атома" за аналогією з ядром клітини). Але, найголовніше те, що вони відразу зрозуміли, що при такому поділі повинна виділятися величезна енергія: при поділі ядер, що містяться в 1 грамі урану, виділяється енергія, яку можна отримати при спалюванні 3 тонн вугілля!

Із цього моменту події ввійшли в стрімкий і крутий розвиток, і рахунок часу пішов не на роки й місяці, а на тижні й дні. Уже через кілька тижнів явище поділу ядра спостерігали десятки дослідників у багатьох лабораторіях – від Нью-Йорка до Ленінграда.

Обговорюючи явище поділу ядра урану, Енріко Фермі звернув увагу на те, що нейтрони, які виникають при поділі, можуть спричинити наступні акти поділу, тобто в урані можлива ланцюгова реакція. Але ніхто не бачив вибуху внаслідок опромінення урану нейтронами. Н. Бор припустив, що це пов'язано з тим, що ядра урану бувають двох видів: природний уран містить, в основному, важкий ізотоп  $U^{238}$  (99,28 %), а вміст легкого  $U^{235}$  – незначний і становить тільки 0,72 %. Повільні нейтрони спричиняють поділ тільки легкого ізотопу  $U^{235}$ , а важкий ізотоп  $U^{238}$  поглинає швидкі нейтрони, що народжуються в процесі поділу, і ланцюгова реакція обривається.

Відразу ж постало три нових питання: Скільки нейтронів і з якою енергією вилітає з ядра урану-235 при кожному поділі? Що відбувається з ядрами ізотопів урану-238 після захоплення нейтрона? За яких умов можна здійснити незатухаючу

ланцюгову ядерну реакцію в урані?

Відповідь на перше питання було отримано через півтора місяці – у березні 1939 року у Франції (Жоліо-Кюрі), Росії (Флеров і Петржак), США (Фермі і Сциллард) показали, що при кожному поділі ядра урану-235 вивільняється 2-3 нейтрони із середньою енергією 13 МеВ. Точна кількість нейтронів поділу (2,42), виміряне згодом, залишалося державною таємницею аж до 1950 року.

Намагаючись знайти відповідь на друге питання, установили, що поділ урану-235 найбільш ефективно відбувається, якщо нейтрони уповільнені до дуже малих енергій – 0,04 еВ (такі енергії мають частинки газу, якщо його температура становить близько 100 °С, і тому такі нейтрони називаються "тепловими"). Найбільш ефективно уран-238 захоплює нейтрони, якщо їх енергія становить 6,8 еВ; при цьому уран-238, поглинаючи нейтрон і вивільняючи електрон (Р-розпад), перетворюється на трансурановий елемент непуній-239.

Таким чином, щоб стала можливою ланцюгова реакція, необхідний сповільнювач нейтронів, який повинен, по-перше, зменшити їх енергію в 10 мільйонів разів – від 1 МеВ, з яким вони вивільняються в процесі поділу ядра урану-235, до енергії 0,1 еВ, і, по-друге, здійснити це так швидко, щоб нейтрони встигли сповільнитися до того, як зіштовхнуться з ядром урану-238. Нарешті, сам сповільнювач не повинен поглинати нейтрони.

Вибір матеріалу для сповільнювача виявився небагатим: вуглець або важка вода D20, тобто вода, у якій водень замінений його важким ізотопом дейтерієм. Важка вода найкраще відповідає вимогам, але її важко добувати: у літрі звичайної води міститься тільки 0,15 г важкої. Із двох можливостей Жоліо-Кюрі (Франція) і Гейзенберг (Німеччина) вибрали важку воду, а Фермі (США) і Курчатов (СРСР) зупинилися на графіті.

Спосіб зниження втрат нейтронів при їх захопленні ураном-238 реалізується в гетерогенному реакторі. Суть ідеї проста й полягає в тому, що замість того, щоб перемішувати рівномірно уран і сповільнювач, потрібно розмістити блоки урану в просторі на деякій відстані один від одного, на зразок атомів у кристалічній решітці, а потім заповнити цей об'єм сповільнювачем. У цьому випадку нейтрони поділу, вилітаючи з блоків урану з енергією 1,3 МеВ, велику частину шляху будуть проходити в сповільнювачі і на той час, коли вони досягнуть іншого блоку урану, уже проминуть небезпечну область енергій (у радянській урановій програмі це явище було названо "блок-ефектом").

Шлях до створення ядерного реактора було відкрито.

### **3.7.2 Ядерні реактори**

2 грудня 1942 року о 15 годині 25 хвилин за місцевим часом на тенісному корті під трибунами стадіону в Чикаго Енріко Фермі вперше в історії людства здійснив керовану ядерну реакцію в "атомному казані". Перший ядерний реактор являв собою сплюснений еліпсоїд діаметром 8 метрів і висотою 6 метрів, складений з 385 тонн графітових брикетів, між якими на відстані 21 см один від одного було розміщено 46 тонн уранових блоків вагою 2 кг кожний, тобто реактор був схожий на кристал з кубічною решіткою. Потужність цього реактора – 40 Вт – була меншою від потужності палаючого сірника, і після 28 хвилин роботи ядерну реакцію в ньому було зупинено. Це був початок атомної ери: відтепер шляху назад, у доатомну еру, не було.

Роботи з використання енергії поділу урану, що проводилися в США (6 грудня 1941 року уряд США прийняв рішення про початок робіт із проблеми атомної

бомби), були строго засекречені. У Радянському Союзі звернули увагу, що у всіх іноземних журналах припинилися публікації з ядерної фізики, що означало засекреченість цілої галузі науки. Нічим іншим не можна було пояснити зникнення цих публікацій. Причому вони зникли як з німецьких наукових журналів, так і з англійських та американських, тобто схоже було на те, що в цих країнах розвиваються секретні роботи. Прізвища вчених, які займаються ядерними проблемами, не з'являлися, вони просто зникли із журналів. Із цього приводу було багато міркувань, і всі прийшли до висновку, що в США, Англії і Німеччині розпочато роботи зі створення ядерної зброї. Причому США й Англія тримали в секреті свої роботи навіть від СРСР – союзника по антигітлерівській коаліції..

11 лютого 1943 року уряд СРСР прийняв рішення про організацію робіт з уранового проекту. Керівником робіт було затверджено Ігоря Васильовича Курчатова – одного із провідних спеціалістів в галузі ядерної фізики і, що не менш важливо, людину, яка мала видатні організаторські здібності й величезну особисту привабливість.

Для про ведення робіт було організовано Лабораторію № 2 АН СРСР (нині – Інститут атомної енергії ім. І. В. Курчатова). Основним і першочерговим завданням Лабораторії № 2 було проведення досліджень, які дозволили б здійснити ланцюгову реакцію поділу урану. Грандіозну програму створення реактора і здійснення керованої ланцюгової реакції можна було виконати, розробивши детальну теорію реактора й експериментально перевіривши її, а також одержавши сотні тонн графіту високого ступеня чистоти й десятків тонн дуже чистого урану. Такий графіт і уран у Радянському Союзі ніколи раніш не вироблялися. Але війна й необхідність якнайшвидшого створення атомної зброї спресували час. До 1946 року було створено принципово нові виробництва надчистих уранових і графітових блоків, і 25 грудня 1946 року о 19 годині І. В. Курчатов за участі чотирьох співробітників запустив перший радянський урановий реактор Ф-1.

Створення реактора Ф-1 стало найбільшим досягненням радянської науки й техніки, першим етапом генерального розвитку й вирішення атомної проблеми. Це був величезний подвиг учених, інженерів, робітників, які створили перший реактор, а також працівників уранової і графітової промисловості. Отримані на реакторі невеликі кількості плутонію дозволили вивчити його хімічні властивості й розробити технологію вилучення плутонію з опроміненого урану. (10 червня 1948 року в СРСР було введено в дію промисловий ядерний реактор з виробництва плутонію, а 29 серпня 1949 року було випробувано першу радянську атомну бомбу з плутонію-239, чим було покладено край монополії США на ядерну зброю). Слід також зазначити, що експериментальні можливості першого радянського реактора Ф-1 були значно ширші, ніж в американського (повна потужність реактора Ф-1 досягала 4000 кВт, а американського не перевищувала 200 Вт).

15 грудня 1948 року неподалік від Парижа під керівництвом Ірен і Фредеріка Жоліо-Кюрі було введено в дію французький атомний реактор.

Перша у світі атомна електростанція потужністю 5000 кВт почала працювати 27 червня 1954 року в м. Обнінську під Москвою.

Із тих пір пройшло не так багато часу, але вже зараз понад 400 ядерних реакторів у 26 країнах світу виробляють більш як 300 мільйонів кіловатт електроенергії – близько 16 % всієї електроенергії на Землі, тобто більше, ніж усі гідроелектростанції світу. У Франції АЕС виробляють понад 80 % електроенергії, в Україні – понад 50 %.

Історія оволодіння атомною енергією унікальна в багатьох відношеннях: за вагомістю проблеми, обставинами, що супроводжували її вирішення, і наслідками, які усвідомили ще далеко не всі. У науці так траплялося й раніше, що два дослідники незалежно один від одного відкривали те саме явище. Сам по собі цей факт не є дуже дивним, якщо ми віримо в об'єктивність законів природи. Але вперше трапилося так, що сотні й тисячі людей, розділені океанами, пожежею війни і стіною таємності, послідовно, крок за кроком прямували до однакових висновків, ставили й вирішували ті самі наукові, технологічні й інженерні задачі і приблизно в тій же послідовності. Тільки в 1955 році, після 15 років практично повної ізоляції, учені із 79 країн зібралися в Женеві на Першу міжнародну конференцію з мирного використання атомної енергії і змогли переконатися, що їхні незалежні вимірювання й формули збіглися з великою точністю. Начебто Книга Природи відкрилася перед усіма одночасно, а вони лише записали її письмена.

Усі фізичні процеси, що відбуваються всередині ядерного реактора, ми знаємо тепер досить детально. Щоб почалася ланцюгова реакція, фактично досить одного нейтрона. У товщі урану вони завжди є: щосекунди в 1 кг урану спонтанно відбувається поділ 7 ядер, і нейтрони, які вилітають при цьому, можуть бути "сірником", що підпалює "уранове багаття". Нейтрони, що вилетіли, перш ніж дати початок новому поколінню нейтронів, живуть у реакторі менш як тисячну частку секунди. За цей час вони встигають зазнати 114 зіткнень з ядрами вуглецю, пройти шлях, довжина якого 54 см, сповільнитися до теплових швидкостей і спричинити новий поділ ядра урану. Кількість нейтронів у реакторі наростає лавиноподібно й через кілька секунд досягає рівня, який заздалегідь задано розташуванням стрижнів-поглиначів нейтронів. У кожному кубічному сантиметрі об'єму могутнього реактора міститься приблизно півмільярда нейтронів, які завжди "перебувають у дорозі" від одного ядра урану до іншого. У цілому ж усередині корпусу реактора встановлюється деякий стаціонарний розподіл нейтронів, так зване "нейтронне поле", яке має досить складну конфігурацію. Ним можна керувати, іноді воно коливається. Це поле завжди є предметом пильної уваги фізиків і повсякденних турбот інженерів.

У цілому, незважаючи на складність фізичних процесів, що відбуваються в "атомному казані", його принципова схема виявилася надзвичайно простою. "Урановий реактор уособлює найгеніальніше й найдивовижніше досягнення науки за всю історію людства", – писав Фредерік Содді наприкінці життя, через 50 років після початку своїх дослідів з ураном.

### **3.7.3 Світові енергетичні ресурси та необхідність вирішення проблеми керованого термоядерного синтезу**

Пошуки людиною нових джерел енергії для задоволення своїх потреб сягають корінням витоків цивілізації на Землі. Протягом останнього часу щонайменше кілька міжнародних конфліктів були спричинені боротьбою за оволодіння територіями, багатими на енергетичні ресурси. Безплідні простори ніколи не були об'єктом завоювання та експлуатації. Будемо сподіватися, що ядерні процеси синтезу й поділу зможуть, нарешті, повністю вирішити проблему забезпечення енергією всього людства.

Ми наближаємося тепер до сутності питання про важливість вирішення проблеми керованого синтезу легких ядер. Саме керованого, а не спонтанного, як це відбувається в результаті страхітливого за потужністю вибуху водневої бомби. Чому, незважаючи на відсутність вирішального успіху, їй, продовжують приділяти

таку велику увагу у всіх передових промислово розвинутих країнах?

На перший погляд, відповідь на диво проста: вирішивши цю проблему, людство одержить необмежене щодо потужності, дешеве джерело енергії, яке буде однаковою мірою доступним для всіх націй. Несподівана простота відповіді в поєднанні з деякою домішкою пафосу (йдеться і про долю людства, і про безмежні можливості!) може викликати скепсис, та й актуальність сучасних досліджень у цій галузі здається сумнівною. Адже ще далеко не вичерпані запаси вугілля й нафти, ще не витрачені ресурси гідроенергії, майже не використовується сонячна енергія, ми лише почали експлуатувати ядерне паливо – уранові й торієві руди.

З позицій даного моменту все це, звичайно, вірно в рамках статичного, незмінного світу. Але ми живемо в умовах світу динамічного, який стрімко змінюється. Щоб завтра перед людством не постала загроза енергетичного голоду, основи енергетики майбутнього повинні закладатися вже сьогодні. Тут не повинно залишатися навіть тіні сумніву або двозначності, тому пояснимо наведену думку. Простежимо, насамперед, як змінювалася кількість населення Землі. Зрозуміло, точність оцінок, що стосуються далекого минулого, є недостатньою, але це не змінює загальної картини: знадобилося кілька сотень тисяч років, щоб людство до 1830 року розмножилося до одного мільярда, за наступні сто років додався другий мільярд, і тільки тридцять років знадобилося для появи на Землі ще одного мільярда людей. У даний час річний приріст становить приблизно 2 %, тобто близько 140 мільйонів чоловік.

10000 років до нашої ери	$(1 - 10) \cdot 10^6$
Початок нашої ери	$250 \cdot 10^6$
1650 р.	$500 \cdot 10^6$
1850 р.	$1,1 \cdot 10^9$
1950 р.	$2,4 \cdot 10^9$
1975 р.	$4,0 \cdot 10^9$
2000 р.	$7,0 \cdot 10^9$

Добре відомо, що найбільше значення для стрімкого зростання кількості населення мав прогрес медицини (зниження дитячої смертності, відкриття антибіотиків). Перед майбутніми поколіннями незабаром постануть складні проблеми розселення людей і регулювання чисельності людства. Але незалежно від цього люди повинні їсти, одягатися, мати захист від холоду, не кажучи вже про задоволення Духовних потреб, які невпинно зростають. Утім, не у віддаленому майбутньому, а вже у наш час проблема голоду – одна із найдошкульніших. Напівголодне існування від колиски до смертної години – доля четвертої частини людства. Якщо врахувати темпи приросту населення, то навіть радикальне вирішення соціальних проблем не усуває необхідності створення синтетичної їжі



(завдання біологів) і забезпечення установок білкового синтезу енергетикою (завдання фізиків).

Сказаного досить, щоб оцінити всю серйозність ситуації. Розглянемо тепер становище з енергетичним балансом. Доцільно поділити джерела енергії на дві групи: відтворювані джерела та "основний капітал". До першої групи належать енергія вітру, рік і морських припливів, сільськогосподарського й деревного палива, геотермія (внутрішнє тепло Землі), сонячна енергія. До другої групи належать джерела енергії, які утворилися в земній корі в результаті геологічної еволюції: вугілля, нафта, горючі гази і, зрозуміло, ядерне паливо. У наш час у загальному балансі енергоспоживання перше місце належить вугіллю, нафті й горючим газам. Людство витрачає поки що основний капітал. В історичному аспекті відбувалося витіснення дров і сільськогосподарського палива вугіллям і нафтою.

Для подальших кількісних оцінок зручно ввести одиницю енергії:  $1Q = 10^{21} \text{ Дж}$ .

Енергії  $1Q$  достатньо, щоб нагріти до кипіння два з половиною Ладозьких озера. Історія матеріальної культури й демографічні оцінки показують, що за період від початку нашої ери до 1850 року людство витратило  $6 + 9Q$  енергії. Споживання за наступні сто років становило близько  $4Q$ . У 1970 році світове споживання було на рівні  $0,2Q$ , а в 2000 році воно становило  $1Q$ . Якщо наявні темпи зростання енергоспоживання збережуться, то до 2050 року воно досягне  $10Q$ . Таким чином, через 50 років людство повинно буде щорічно витрачати стільки ж енергії, скільки воно витратило з часів імперії Августа до наших днів.

Природно, виникає питання, якою мірою це зростання забезпечене наявними ресурсами. Перш ніж розглядати оцінку запасів, наведену нижче, корисно звернутися до одного цікавого міркування. Припустимо, що людство дійсно почне витрачати запаси потенційної енергії (у кінцевому підсумку перетворюючи її на тепло) на рівні, що становить помітну частку від загальної енергії, яку Земля одержує від Сонця. У такому випадку ми повинні бути готові до того, що відбудеться зміна клімату нашої планети. Точніше: уся сонячна енергія, яка досягає поверхні Землі, становить близько  $2500Q$  на рік. Збільшення енерговиділення, скажімо, до  $20\text{--}30Q$  на рік, якщо воно буде забезпечуватися спалюванням вугілля, нафти й газу, а отже, супроводжуватиметься підвищенням вмісту вуглекислого газу в атмосфері, призведе до відчутних змін клімату Землі ("парниковий ефект"). У результаті почнеться танення материкових льодів Антарктиди й Гренландії, що у свою чергу викличе підвищення рівня Світового океану. Виникне потреба в складних гідротехнічних роботах, щоб захистити від затоплення величезні низинні території на узбережжях океану. Досить несподіваний результат! Правда, якщо енергетика світу повністю перейде на ядерне паливо, то вміст  $\text{CO}_2$  залишиться на колишньому рівні й катастрофічні зміни клімату почнуться за умови більш високих темпів додаткового енерговиділення. Проте, обговорюючи перспективи розвитку енергетики планети, не варто вдаватися до занадто далеких і сміливих екстраполяцій. У межах допустимого припущення ми можемо розглядати як гранично можливу цифру додаткового енерговиділення рівень, що становить  $30Q$  на рік.

Відтворювані джерела енергії відповідають у сукупності (крім сонячної енергії) не більш як  $2\text{--}3Q$  на рік. Однак експлуатація їх значною мірою економічно зовсім безперспективна і вони, зрозуміло, не зможуть задовольнити зростаючі потреби світу. Отже, використання мінеральної сировини триватиме.

Сумарні запаси вугілля, навіть за оптимістичними оцінками, не перевищують

150(2, нафти й газу 10 Q. При цьому, у міру витрати наявних ресурсів, видобуток копалин буде пов'язаний із зростанням технічних труднощів і буде супроводжуватися збільшенням їх вартості. У підсумку, за оцінками експертів, запаси нафти (навіть враховуючи ще не відкриті родовища) будуть вичерпані протягом 30–40 років, а вугілля – протягом 100–200 років.

Однак і ця досить похмура перспектива не дає повного уявлення про серйозність сучасного становища. Справа в тому, що ми увесь час використовували глобальні оцінки, які внаслідок усереднення створювали ілюзію відносного благополуччя, принаймні, стосовно найближчого майбутнього. Тим часом мінеральна сировина розподілена вкрай нерівномірно по країнах світу. Досить нагадати, що, наприклад, Західна Європа на 2/3 залежить від імпорту енергетичної сировини.

Нам залишається розглянути питання про використання сонячного тепла та ядерного пального. На жаль, сонячна енергія має незначну щільність. Енергетична освітленість на поверхні Землі за умови нормального падіння сонячних променів і прозорості атмосфери становить близько  $1 \text{ кВт/м}^2$ . До того ж коефіцієнт корисної дії фото- і термоелектричних перетворювачів невеликий. Тому для забезпечення потреб людства через сто років довелося б значну частину поверхні Землі (близько 10 %!) закрити сонячними генераторами. Фантастичність подібного проекту очевидна.

Існують два діаметрально протилежні ядерні процеси, що протікають з виділенням енергії: процеси розподілу й синтезу. Коли важке ядро, захоплюючи нейтрон, ділиться, то при цьому воно розпадається на дві (або більше) частини, які, як правило, мають неоднакові маси. У результаті виділяється енергія й одночасно вивільняється кілька нейтронів. Ці нейтрони знову можна використовувати для поділу інших важких ядер. Коли відбувається синтез, то два легких ядра, якщо вони мають достатню енергію, поєднуються, і утворюють легкі продукти реакції, які можуть мати значно більшу кінетичну енергію, ніж вихідні компоненти. Енергія в обох випадках має ядерне походження. Ядра, що мають середню масу, не можна використовувати ні для реакцій поділу, ні для синтезу.

З усіх ядер, які тільки існують у природі, тільки ядра урану  $\text{U}^{235}$  піддаються поділу за допомогою повільних нейтронів і придатні для використання як пальне в більшості реакторів. (Реактори, які можуть виробляти енергію за рахунок швидких нейтронів і які, отже, можуть використовувати інше пальне, мають невеликі розміри й тому малопридатні для вироблення й одержання великих кількостей тепла. Такі реактори на швидких нейтронах перебувають поки що, в основному, на стадії розробки). Однак торій  $\text{Th}^{232}$  і уран  $\text{U}^{238}$ , що зустрічаються в природному вигляді, можуть перетворюватися на  $\text{U}^{233}$  і плутоній  $\text{Pu}^{239}$  відповідно при захопленні нейтрона, у тому числі і тих нейтронів, що звільняються при поділі. Найбільш розповсюджені ізотопи торію та урану ( $\text{Th}^{232}$  і  $\text{U}^{238}$ ), які є вихідною речовиною для одержання продуктів  $\text{U}^{233}$  та  $\text{Pu}^{239}$ , що піддаються поділу, називаються паливною сировиною.

Вміст урану  $\text{U}^{235}$  у природному урані становить 0,71 %. Відносний вміст урану й торію в земній корі оцінюється величинами порядку  $4 \cdot 10^{-6}$  і  $12 \cdot 10^{-6}$  відповідно. Поклади торію відомі менше, оскільки їх пошук є економічно недоцільним.

Оцінки, одержані останнім часом, свідчать, що західні країни мають запаси урану близько одного-двох мільйонів тонн; його видобуток обходиться порівняно дешево (близько 10 доларів за фунт окису урану  $\text{U}_3\text{O}_8$ ). Кілька мільйонів тонн може бути видобуто за більш високою вартістю (10-30 доларів за фунт). Приблизно така ж

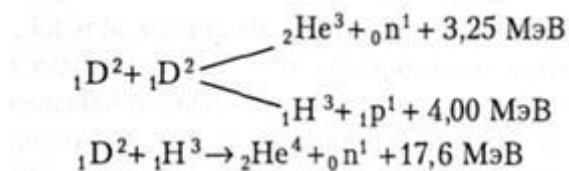
кількість паливної сировини, включаючи торій, є і в інших країнах. Тому доступними для видобутку можна вважати близько  $10^8$  тонн матеріалів, які є речовиною для поділу. За умови повного використання цих  $10^8$  тонн можна одержати 5000 Q енергії, які будуть вичерпані за кілька століть.

Крім того, що кілька століть є короткотривалим історичним періодом, використання матеріалів, що поділяються, створює серйозну проблему, пов'язану з радіоактивними відходами. У разі переходу енергетики на ядерне паливо кількість довго живучих радіоактивних відходів з ядерних реакторів стане загрозливо великою, і виникне складна й матеріально затратна проблема їх захоронення. Використання для цього морського дна загрожує отруєнням океанської фауни, не забезпечує необхідної безпеки й повинно бути відкинуто. Залишається викидання радіоактивних продуктів у далекий космос.

Таким чином, вимальовується неприємна альтернатива: жалюгідний енергетичний пайок або дуже повільне, однак постійно прогресуюче радіоактивне забруднення планети, боротися з яким надзвичайно важко.

Саме із цих позицій ми й повинні підходити до перспективи використання керованого синтезу легких ядер як основи енергетики майбутнього суспільства.

Практичний інтерес являють для нас дві реакції синтезу.



Тут  ${}_1^2\text{D}$  – важкий ізотоп водню – дейтерій,  ${}_1^3\text{H}$  – інший, більш важкий ізотоп водню – тритій,  ${}_2^4\text{He}$ ;  ${}_2^3\text{He}$  – ізономи гелію.

Дейтерій, який з усіх природних ядер є найбільш придатним для термоядерних реакцій, є в морській воді – його вміст становить 0,0153 %. Цієї кількості дейтерію достатньо для виробництва 30 Q енергії щорічно протягом 109 років.

Є підстави вважати, що вартість неядерного пального й пального, яке використовується в реакціях поділу, буде з часом зростати, у той час як вартість дейтерію (яка і зараз низька) буде знижуватися.

У процесі синтезу не утворюються шкідливі або довгоіснуючі радіоактивні речовини. Прийнято вважати, що відношення радіоактивної небезпеки для реакторів поділу і реакторів синтезу виражається як 1000:1.

Відповідь на питання про те, навіщо потрібний керований синтез, отримана, і ми можемо перейти до обговорення особливостей проведення процесу термоядерного синтезу.

Сама природа реакції синтезу створює дуже великі труднощі. Щоб два ядра могли злитися, вони повинні підійти досить близько одне до одного, незважаючи на електростатичне відштовхування між ними. Для цього ядра повинні мати велику енергію, тобто необхідне нагрівання ядерного пального. Необхідна для цього температура вища за температуру у внутрішніх областях зірок і дорівнює приблизно  $10^8 \div 10^9$  К. При таких температурах усі легкі атоми повністю іонізовані й газ складається з голих ядер і вільних електронів. Така сукупність заряджених часток називається плазмою. Фізика плазми набула фундаментального значення в середині двадцятого століття, коли широко розгорнулося вивчення процесів у космосі і стартувала програма досліджень з керованого термоядерного синтезу. Із цього часу почався її стрімкий розквіт, що пояснюється величезним пізнавальним значенням і

грандіозністю завдань, які покликана розв'язати фізика плазми. Від її успіхів залежить значною мірою здійснення тих надій, що покладаються на вирішення проблеми керованого синтезу легких ядер у плазмовому середовищі, а разом з тим і на реконструкцію енергетики майбутнього.

Коли йдеться про універсальну поширеність плазми, ми не випадково звертаємо свої погляди до зірок і космічного простору, а не до поверхні Землі. Плазма, тобто іонізований газ, атоми якого (усі або більшість) утратили частину своїх електронів і перетворилися на позитивні іони, утворюється й існує тільки в екстремальних умовах. Зрозуміло, слово "екстремальний" означає винятковість тисків, температур, потоків випромінювання та електромагнітних полів, які спостерігаються в зірках і космосі, порівняно з тими, котрі нас оточують під щитом щільної атмосфери й у межах того вузького температурного інтервалу, який необхідний для життя. Поява плазми в земних умовах – порівняно рідкісна подія; спалахи блискавок під час грози, полярні сяйва або слабке світіння на металевих вістрях при тихих коронних розрядах, імовірно, вичерпує список природних плазмових феноменів у нашому оточенні. Зате технічна цивілізація наших днів достатньо постачає нас плазмових пристроїв та інструментів. Різноманітні вогні газосвітлових реклам і набір газорозрядних приладів (випрямлячів, тиратронів, МГД-перетворювачів і т.д.) – усе це породження технічної електроніки і тих досліджень у галузі фізики газового розряду, які неухильно розвивалися протягом десятиліть.

У наш час досить гарячу й досить щільну плазму одержують у лабораторних умовах поки що тільки на короткі проміжки часу; до того ж вона ще не має повною мірою того бажаного комплексу властивостей, без якого процес керованого синтезу легких ядер неможливий.

Як уже зазначалося, для здійснення реакцій синтезу необхідно нагріти плазму до високих ( $10^8 \div 10^9$  К) температур (таку плазму називають "гарячою" або "термоядерною"). Очевидно, що головні труднощі полягають у тому, щоб ізолювати цю високотемпературну плазму від стінок апарата, в якому вона знаходиться. Інакше плазму через її величезну теплопровідність не вдасться нагріти навіть до температури в кілька сотень тисяч градусів, тому що вся енергія, яка надається їй, буде негайно поглинатися стінками. Необхідно розробити дуже ефективний метод термоізоляції, який би унеможлиблював контакт плазми з будь-якими навколишніми речовинами. Це означає, що плазма з усіх боків повинна бути оточена вакуумним простором. Але як перешкодити частинкам плазми піти за її межі, інакше кажучи, як утримати плазму від розширення у вакуум? Очевидно, що цього можна досягти лише шляхом застосування магнітного поля, силові лінії якого оточували б плазму і були паралельними стінкам апаратури. Заряджені частинки обвивалися б навколо силових ліній і рухалися б уздовж поля, практично не зміщуючись до стінок. Цю ідею магнітної термоізоляції стосовно проблеми здійснення керованого термоядерного синтезу вперше в СРСР висловили у 1950 році А. Д. Сахаров і І. Є. Тамм. Цілковитостійно до тієї ж думки прийшли приблизно в ті ж роки фізики США й Англії, але через непроникні бар'єри таємності, що існували тоді, ніхто не знав, що відбувається в цій галузі в інших країнах. Системи, в яких для термоізоляції плазми використовується магнітне поле, називаються магнітними пастками.

Другим ключовим питанням, яке необхідно вирішити, є проблема стійкості плазми. Потрібно встановити, за яких умов гаряча плазма, урівноважена магнітними

силами, може зберігати стійкість. Для цього було виконано теоретичні розрахунки й проведено різноманітні експерименти, у результаті яких було виявлено ті умови, за яких щільна гаряча плазма, повністю відірвана від стінок і утримувана у вакуумі магнітними силами, буде залишатися в рівновазі досить тривалий час. Слово "тривалий" уживається тут у тому розумінні, що кожен нейтрон протягом часу існування нагрітої плазми матиме значний шанс вступити в ядерну реакцію.

Третє питання, яке в наш час теж фактично вирішене, – це нагрівання плазми до високих, "термоядерних" температур. Розв'язати цю проблему можна різними шляхами: пропусканням сильних струмів через плазму, введенням у плазму високочастотної електромагнітної енергії або інжекцією швидких частинок, розігнаних до високих швидкостей у спеціальних пристроях.

Як виглядатиме термоядерний реактор?

У результаті злиття ядер дейтерію народжується ядро гелію (альфа-частинка) і нейтрон. Термоядерна енергія, яка виділяється у вигляді кінетичної енергії продуктів реакції, розподіляється між ними обернено пропорційно їхнім масам, так що 80 % енергії синтезу припадає на нейтрони. Альфа-частинки будуть залишатися всередині плазми, витрачаючи свою кінетичну енергію на її "підігрів". Нейтрони ж практично безперешкодно (магнітне й електричне поля на них не діють) будуть виходити з плазменного об'єму назовні. Таким чином, завдання використання енергії зводиться, в основному, до використання енергії швидких нейтронів.

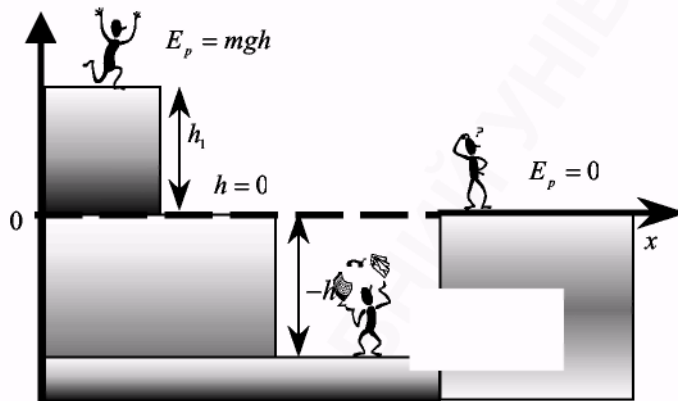
Щоб досягти цієї мети, реагуючу плазму потрібно оточити спеціальною оболонкою, в якій енергія нейтронів буде поглинатися й перетворюватися на тепло. Цю оболонку прийнято називати бланкетом (англійською – "ковдра"). У бланкеті повинні бути канали для циркуляції теплоносія, який знімає енергію, що виділяється внаслідок гальмування нейтронів. У перших реакторах буде використовуватися звичайний пароводяний спосіб перетворення теплової енергії на електричну, тобто енергія теплоносія в теплообміннику буде передаватися воді, що циркулює в другому контурі, перетворюватиме її на пару під тиском, яка, відповідно, буде обертати турбіни й генератори, що виробляють електроенергію. Пізніше, можливо, будуть розроблені інші способи перетворення термоядерної енергії на електричну, у тому числі способи прямого перетворення.

Узагальнюючи сказане, зазначимо, що завдання створення промислової термоядерної електростанції зводиться в даний час до вирішення інженерних задач, які хоч і є надзвичайно складними та дорогими, однак не можуть стати принциповими перешкодами на шляху до розв'язання проблеми. За прогнозами, які враховують думку як оптимістів, так і песимістів, проблему створення термоядерної енергетики, можливо, вдасться вирішити в першій чверті нового століття. Природа може розставити на шляху до термоядерного Ельдорадо лише обмежену кількість труднощів, і після того, як людина, завдяки своїй неупинній творчій активності, зможе їх перебороти, природа вже не зможе придумати нові.

### **Поняття енергії та роботи в механіці**

Дія на тіло або систему тіл сили пов'язане з виконанням цієї силою роботи. При цьому роботою  $A$  сили  $\vec{F}$  називається скалярний добуток  $A = \vec{F} \cdot \vec{s}$ , де  $\vec{s}$  – переміщення тіла під дією цієї сили. Крім того, виявляється, що робота пов'язана зі зміною енергії. При цьому енергія виступає як здатність даної системи виконати роботу (потенціальна енергія) або як факт виконання нею роботи (кінетична енергія).

Потенціальна енергія визначається взаємним розміщенням тіл (Земля і Сонце, електрон і ядро атома, тіло, підняте над Землею і та ін.), або частин одного і того самого тіла (різні види деформації: розтягнення, стиснення, зсув і т.п.). З одного тільки визначення потенціальної енергії випливає, що її величина залежить від початку відліку.



Таким чином, абсолютне значення потенціальної енергії є досить довільним, але різниця потенціальних енергій – конкретна величина і дорівнює роботі, яку виконує певна сила над тілом. В залежності від вибору нульового значення потенціальної енергії може створитися ситуація, коли тіло буде мати від'ємну потенціальну енергію. У цьому випадку говорять, що тіло знаходиться в потенціальній ямі, як показано на рисунку 1. Поняття потенціальної ями має виняткове значення у фізиці, зокрема в квантовій механіці.

### **Фундаментальні взаємодії та ієрархія структур в мікро– й макросвіті**

Стан і рух мікрооб'єктів описуються в рамках польової картини Світу, що ґрунтується на новій фізичній теорії. За відкриття кванта дії у 1918 р. Планку була присуджена Нобелівська премія з фізики. Це відкриття привело до створення квантової механіки, що стала початком нової ери в природознавстві – ери квантової фізики.

В основу квантової механіки покладено фундаментальне нові ідеї про квантування фізичних величин і корпускулярно–хвильовий дуалізм.

#### **2.1.1 Формування ідеї квантування фізичних величин**

Квантовими називаються фізичні величини, що можуть набувати лише визначених дискретних значень. Вираження фізичних величин через квантові числа називається квантуванням фізичних величин.

Ідея квантування сформувалася на основі ряду відкриттів наприкінці XIX – початку XX століття. Це були:

- відкриття Дж. Томсоном у 1897 р. електрона, заряд якого виявився елементарним, тобто найменшим існуючим у природі зарядом;
- закони теплового випромінювання: Кірхгофа, Віна, Стефана–Больцмана. Теорія теплового випромінювання, створена Джинсом і Релеєм, суперечила одному із найфундаментальніших законів природи – закону збереження енергії. У 1900 р. Планк на основі гіпотези квантування енергії створив несуперечну квантову теорію теплового випромінювання;
- встановлення Столетовим законів фотоефекту;
- відкриття в 1909 р. Резерфордом планетарної моделі атома, існування якого в рамках класичної механіки було неможливе. У 1913 р. Н.Бор створює першу квантову теорію атома, обґрунтовуючи як можливість його існування, так і

лінійчасті спектри атомів;

– у 1924 р. Луї де Бройль поширив ідею корпускулярно–хвильового дуалізму на речовину, висунувши гіпотезу про те, що подвійність не є особливістю одних тільки оптичних явищ, але має універсальне значення.

Сучасна фізика мікросвіту базується на уявленнях:

- Корпускулярно–хвильовий дуалізм матерії.
- Співвідношення невизначеностей Гейзенберга.
- Рівняння Шредінгера.
- Квантування фізичних величин.
- Протонно-нейтронна структура ядра, існування якого обумовлене на явність іншої, ніж електромагнітна, взаємодії – сильної взаємодії.

У квантовій фізиці мікрочастинка – квантовий об'єкт (це не частинка і не хвиля, навіть не те й інше одночасно). Квантовий об'єкт – це щось третє, яке не дорівнює простій сумі властивостей хвилі і частинки. Ми не можемо описувати властивості мікрооб'єкта, не використовуючи понять класичної фізики: частинка і хвиля, тому що робити висновки про властивості мікрочастинки ми можемо тільки за результатом її взаємодії з класичним приладом (макрооб'єктом). Тому ми повинні використовувати два різних типи приладів: один для вивчення хвильових властивостей об'єкта, інший – квантових. Ці властивості не сумісні, але вони реально характеризують мікрооб'єкт і тому не виключають, а доповнюють одна одну. У цьому полягає сутність принципу доповнення Н.Бора – одного з найбільш значущих методологічних принципів сучасного природознавства (1927 р.)

Принцип доповнення Бора виходить далеко за рамки суто фізичної науки.

Класична фізика виходить із припущення, що будь-яке явище можна спостерігати без помітного впливу на нього. У квантовій механіці це не так! Усяке спостереження квантових явищ супроводжується такою їх взаємодією із засобами спостереження, якими не можна нехтувати. Якщо ми хочемо спостерігати, що являє собою мікрооб'єкт, то ми повинні виключити усякий вплив на нього, але тоді спостереження буде неможливим. Якщо ж ми спостерігаємо за квантовою системою, то вона взаємодіє із засобами спостереження, отже, "однозначне визначення стану системи стає вже неможливим".

Спробуємо поширити принцип доповнення на всі області пізнання. Як було зазначено раніше наука і мистецтво – два шляхи пізнання Світу. Обидва шляхи ведуть до Істини, але жоден не є повним. Науковий метод – це логіка й експеримент. Мистецтво – інтуїція, осяяння, почуття, але щира наука – це мистецтво, а мистецтво містить елементи науки, тобто обидва підходи не виключають, а доповнюють один одного.

### **2.1.2 Структура ядра і ядерні реакції**

Ядро атома – це його центральна частина, у якій зосереджена практично вся маса атома. Ядро атома складається з елементарних частинок: протонів і нейтронів, називаних нуклонами. Протон ( $p$ ) має позитивний заряд, що дорівнює за модулем заряду електрона  $q_p = +|e| = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл,

і масу  $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$  кг  $= 1836m_e$ .

Число протонів ( $Z$ ) у ядрі дорівнює числу електронів в атомі і відповідає порядковому номеру хімічного елемента в таблиці Менделєєва. Число протонів  $Z$  називають зарядовим числом.

Нейтрон – незаряджена частинка ( $q_n = 0$ ) і маса нейтрона

$m_n = 1,675 \cdot 10^{-27} \text{ кг} = 1838,5 m_e$  близька до маси протона. Число нейтронів (N) і протонів (Z) у ядрі дорівнюють масовому числу (A) – числу нуклонів:

$$A = Z + N.$$

Для позначення ядер застосовується такий запис :

${}_Z^AX$  чи  ${}_Z^AX$ , де X символ хімічного елемента. Ядра з однаковим числом протонів, але різним числом нейтронів називають ізотопами, наприклад, водень має три ізотопи:  ${}_1^1\text{H}$  – водень,  ${}_1^2\text{H}$  – дейтерій,  ${}_1^3\text{H}$  – тритій.

Нуклони в ядрі утримуються за рахунок сильної (ядерної) взаємодії, що компенсує сили електростатичного відштовхування. Властивості ядерних сил відрізняються від властивостей гравітаційних та електромагнітних сил. Наведемо деякі з них.

1 Ядерні сили – близько діючі, радіус їхньої дії дорівнює  $\sim 10^{-15} \text{ м}$ . На цих відстанях вони є силами притягання, при значному зменшенні відстані між нуклонами притягання змінюється відштовхуванням.

2 Ядерні сили діють як між зарядженими, так і між нейтральними частинками, тобто вони мають властивість зарядової незалежності.

3 Ядерні сили мають властивість насичення, тобто кожен нуклону ядрі взаємодіє лише з обмеженою кількістю найближчих до нього нуклонів. Це виявляється в існуванні так званих "магічних чисел" (тобто числа протонів і нейтронів, при яких ядра виявляються особливо стабільними). "Магічними" є такі числа: для протонів – 2, 8, 14, 20, 28, 50 і 82, для нейтронів – 2, 8, 14, 20, 28, 50, 82 і 126. Можливо, що при цих числах протонів (чи нейтронів) створюються цілком заповнені шари або оболонки подібно до того, як електрони заповнюють електронні оболонки атомів.

4 Ядерні сили не є центральними і залежать від орієнтації спінів нуклонів.

5 Ядерні сили мають обмінний характер, тобто обумовлені обміном віртуальними частинками. Віртуальними називаються частинки, які не можуть бути виявлені за час їхнього існування. Ідея обмінного характеру ядерних сил була висунута в 1934 р. радянським фізиком І.Є.Таммом. У 1935 р. японський фізик Х. Юкава розрахував теоретично характеристики віртуальних частинок ядерної взаємодії, їх маса спокою повинна дорівнювати 200–300 масам електрона. Ці частинки одержали назву "мезонів", а в 1936 р. у космічному випромінюванні були виявлені частинки з  $m = 207 \cdot m_e$ , названі  $\mu$  – мезонами (мюонами), ці частинки "запідозрили" у тому, що вони є носіями ядерних сил. Однак виявилось, що мюони слабо взаємодіють із нуклонами і не можуть забезпечити ядерну взаємодію. Нарешті, у 1947 р. знову ж у космічних променях був відкритий  $\pi$  – піон (пімезон). Існує 3 види піонів з масами

$m_{\pi^+} - m_{\pi^-} = 273 \cdot m_e$  і  $m_{\pi^0} = 264 \cdot m_e$ . Тривалий час їх вважали носіями ядерної взаємодії, але з розвитком кваркової теорії з'ясувалося, що це не так. Сучасна ядерна фізика вважає фундаментальними переносниками ядерної взаємодії глюони. Глюони – це нейтральні частинки зі спіном, який дорівнює одиниці, і нульовою масою спокою. Вони є переносниками сильної взаємодії між кварками.

Для того щоб зруйнувати ядро на нуклони необхідно витратити енергію, яку називають енергією зв'язку ядра. Енергія зв'язку ядра визначається за формулою Ейнштейна  $E = \Delta mc^2$ , де  $c = 10^8 \text{ м/с}$  – швидкість світла у вакуумі;  $\Delta m$  – дефект маси.

Дефектом маси називають різницю між масою нуклонів, з яких складається ядро, і масою стабільного ядра  $m_z$ :



$$\Delta m = z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_z.$$

Енергію зв'язку звичайно розраховують у мегаелектронвольтах (MeV).

$$1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ Дж.}$$

Енергія зв'язку на один нуклон визначає в кінцевому підсумку енергію будь-якої ядерної реакції.

**Ядерні реакції** – це реакції перетворення ядер одних хімічних елементів на ядра інших елементів. Ядерні реакції супроводжуються виділенням чи поглинанням енергії. Розрізняють два типи ядерних реакцій: реакції синтезу і реакції поділу. Під час ядерних реакцій виконуються закони збереження: сумарного електричного заряду, числа нуклонів, енергії, імпульсу, моменту імпульсу. Всі ядерні реакції характеризуються енергією, яка виділяється або поглинається в процесі їх перебігу.

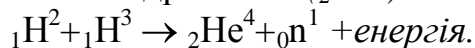
Радіоактивність – це ядерна реакція самочинного розпаду нестабільних ядер. Була відкрита в 1896 р. Беккерелем.

За законом радіоактивного розпаду частинок стверджується, що в будь-який момент часу розпадається одна і та сама частина радіоактивних ядер. Це приводить до того, що число ( $N_0$ ) радіоактивних ядер зменшується за експонентою:

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

де  $N$  – число ядер, що не розпалися у момент часу  $t$ ;  $N_0$  – число ядер, що не розпалися у початковий момент часу  $t = 0$ . Період напіврозпаду для відомих у даний час радіоактивних ядер змінюється в межах від  $3 \cdot 10^{-7}$  с до  $5 \cdot 10^{15}$  років.

**Ядерним синтезом** називається процес злиття ядер легких елементів з утворенням більш важких ядер. Оскільки ядерні сили мають малий радіус дії ( $r \sim 10^{-15}$  м), то для здійснення реакції синтезу необхідно зблизити ядра на такі відстані. Але ядра заряджені позитивно і сили кулонівського відштовхування будуть перешкоджати їхньому зближенню, тому ядрам необхідно надати кінетичну енергію, що досягається при дуже високих (порядку 10–100 млн. К) температурах. Тому ядерні реакції синтезу називають **термоядерними реакціями**. Термоядерні реакції є джерелом енергії Сонця й інших зірок. У реакціях ядерного синтезу виділяється величезна енергія, яку легко підрахувати, знаючи енергію зв'язку вихідних ядер. Наприклад, при злитті ізотопів водню (дейтерію ( ${}_1\text{H}^2$ ) і тритію ( ${}_1\text{H}^3$ )) утворюється ядро гелію ( ${}_2\text{He}^4$ ):



Усі відомі елементи були утворені в зірках у процесі ядерного синтезу, що проходить у дві фази: "спокійній" і "вибуховій". Велика кількість важких ядер утворюється при повільній "спокійній" фазі ядерного синтезу, під час якої в міру "вигорання" синтезуються усе більш важкі ядра. Цей процес продовжується мільярди років. Коли зірка, маса якої більша за певну визначену величину, вичерпує свій запас ядерного "палива" (водню), вона починає охолоджуватися і під впливом гравітаційних сил стискується, а потім відбувається вибух, при якому зірка розігрівається до декількох мільярдів градусів, що приводить до синтезу більш важких елементів (синтезуються всі елементи таблиці Менделєєва). При цьому зірка викидає велику частину своєї маси в міжзоряне середовище. Ця речовина, що викидається, містить синтезовані важкі елементи, без яких неможливе утворення планет, подібних до Землі, і не може виникнути життя, подібне до нашого. Таким чином, зірки, що "вмирають", створюють одну з необхідних умов життя.

**Ядерним поділом** називається процес розщеплення ядра важкого елемента на осколки. Справа в тім, що ядра деяких важких елементів є нестабільними через те,

що складаються з великої кількості нуклонів. Це спричиняє їхній спонтанний розпад, як, наприклад, у ядер урану 235.

Починаючи з відкриття штучної радіоактивності в 1934 році Е.Фермі, почалося вивчення можливості ланцюгової ядерної реакції поділу. Виявилося, що бомбардування важких ядер нейтронами приводить до реакції поділу. І в 1938 – 1939 рр. німецькі фізики Ган і Штрассман установили, що при бомбардуванні урану нейтронами, його ядро ділиться на два (рідше три) осколки з виділенням великої кількості енергії. Оскільки при одному акті поділу випускається 2–3 нейтрони, то в масі урану зароджується ланцюгова ядерна реакція. При цьому при кожному поділі одного ядра виділяється близько 200 МеВ енергії. Якщо ланцюгова ядерна реакція відбувається при масах урану 235, більших ніж певне значення, назване критичною масою, то реакція набуває вибухового характеру і виділення енергії здійснюється за час, менший за 1 мкс ( $10^{-6}$  с).

Завдання управління і контролю ланцюговою ядерною реакцією виникло при розробці та експлуатації ядерних реакторів і є самостійною наукою в рамках ядерної енергетики.

За даними міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) більш ніж у тридцятьох країнах світу діють чи знаходяться в стадії будівництва або проектування більше 600 промислових ядерних реакторів.

### **2.1.3 Основні частинки речовини – елементарні частинки**

Всі об'єкти навколишнього світу складаються з певних частинок, що розглядаються у сучасній фізиці як первинні основні частинки – "елементарні" частинки. Починаючи з 1933 року, було відкрито приблизно 400 елементарних частинок і цей процес продовжується. Елементарні частинки і їхні античастинки вдалося класифікувати на три групи: фотони, адрони та лептони.

**Фотон** – це квант електромагнітної взаємодії з масою спокою, яка дорівнює нулю, фотон має швидкість у вакуумі  $c = 10^8$  м/с.

Частинки двох інших груп пов'язані з речовиною.

Це група важких частинок – **адронів**. Адрони складають основну частину елементарних частинок. Вони підрозділяються на два класи: клас мезонів (піони, каони і т.п.) і клас баріонів (нуклони, гіперони). Як відомо, атомні ядра складаються з нуклонів. Група легких частинок називається лептонами. До лептонів належать електрон, мюон, таон і відповідні їм нейтрино.

Оскільки маса елементарних частинок мала, то її прийнято виражати кількістю речовини, близькою до маси нуклона, названої атомною одиницею маси (а.о.м):

$$1 \text{ а.о.м} = 1,6 \cdot 10^{-27} \text{ кг.}$$

Елементарні частинки можуть бути нейтральними або мати позитивний чи від'ємний заряд, який дорівнює елементарному заряду:

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл.}$$

Найбільш важливими з точки зору будови матерії є протони і нейтрони (складові частини ядра) та електрони (з яких складається оболонка, що оточує ядро).

Поряд з частинками, що визначають структурні властивості матерії, існує величезна кількість нестабільних частинок, що з'являються в перетвореннях нуклонів під час їх зіткнень при більших енергіях.

Елементарні частинки мають ряд властивостей (заряд, спін, тип розпаду), що дозволяють класифікувати їх за категоріями, групами і сімействами. Усім цим різним частинкам відповідають античастинки, з зарядом, що дорівнює за модулем

заряду відповідних частинок, але має протилежний знак, і трохи відмінні властивості.

При зіткненні частинки й античастинки відбувається їхня анігіляція; при цьому маси обох частинок перетворюються в електромагнітну енергію у – випромінювання.

У 1964 році М. Гелл-Манн і Дж. Цвейг висунули гіпотезу, згідно з якою всі адрони побудовані з найпростіших (фундаментальних) частинок, їх назвали кварками. Відповідно до сучасного варіанта кваркової моделі всі адрони розглядаються як комбінації шести (дев'яти?) фундаментальних частинок – кварків і відповідних їм антикварків у станах з визначеним моментом імпульсу. Заряд кварка може дорівнювати  $1/3$  та  $2/3$  заряду електрона. В адронах кварки мають надзвичайно велику енергію зв'язку, тому вони не можуть спостерігатися як самостійні об'єкти. За сучасними уявленнями кварки не мають внутрішньої структури, в цьому розумінні вони є істинно елементарними фундаментальними частинками.

Здатність елементарних частинок до взаємних перетворень з дотриманням законів збереження дозволяє припускати наявність єдиного загального поля, різними "квантовими станами" якого і є ці частинки. Нове покоління фізиків сподівається, що об'єднана теорія пояснить сильну, слабку і гравітаційну взаємодії з позицій єдності світобудови.

### **Статистичні та термодинамічні властивості макросистем**

Механіка вивчає різні види механічного руху одних тіл щодо інших без урахування внутрішньої структури цих тіл. При цьому припускається, що тіла є системами матеріальних точок, жорстко зв'язаних між собою. Предметом вивчення молекулярної фізики є структура речовини на молекулярно–атомарному рівні. Теорія будови речовини –молекулярно–кінетична теорія (МКТ) – ґрунтується на припущенні, що всі речовини складаються з маленьких частинок – атомів і молекул, які хаотично рухаються. При цьому між молекулами існують сили притягання і відштовхування. Експериментальним підтвердженням МКТ є явище броунівського руху, процес дифузії та ін. МКТ пояснює природу теплопровідності, теплового розширення тіл. З погляду МКТ структура речовини і характер руху її молекул у газоподібному, рідкому та твердому станах – різні.

У розріджених газах молекули настільки віддалені одна від одної, що сили взаємодії між ними практично відсутні. Для опису характеру руху молекул таких газів використовують модель ідеального газу. Рух молекул газу є хаотичним.

У твердих кристалічних тілах сили взаємодії між молекулами настільки великі, що забезпечують упорядковану структуру атомів і молекул, які виконують коливання у вузлах кристалічних ґраток.

Найбільш складний характер має рух молекул у рідинах, оскільки рідини займають проміжне положення між газами і кристалічними тілами. Для рідин є характерним так званий ближній порядок. Це означає, що кожна молекула коливається біля певного положення рівноваги, але час від часу перескакує на місце однієї з сусідніх молекул. Таким чином, молекули у рідині виконують коливання і одночасно рухаються по об'єму рідини, причому поступальний рух молекул у рідині має хаотичний характер.

Розміри молекул є дуже малими в порівнянні з розмірами тіл, наприклад, радіус атома водню порядку  $10^{-10}$  м. Отже, число молекул у будь-якому тілі є дуже великим. Це означає, що часто неможливо (і не потрібно) простежити рух кожної частинки, тому до вивчення молекулярної структури тіл можна підходити подвійно.

З одного боку, не вникаючи в подробиці молекулярної структури і характеру руху молекул, описувати стан системи молекул за допомогою макропараметрів: тиску, густини, температури, теплоти, енергії, ентропії і т.п. Такий метод вивчення називають термодинамічним, а розділ фізики, що вивчає співвідношення між цими параметрами (термодинамічними параметрами), називається **термодинамікою**. З іншого боку, можна досліджувати мікростани не окремих молекул, а оперувати певними середніми параметрами: середньою швидкістю, середньою енергією, середньою довжиною вільного пробігу і т.п. Такий метод називається статистичним, а відповідний розділ фізики – статистичною фізикою (іноді кінетичною теорією).

**Термодинамічні параметри.** **Тиск** ( $p$ ) – це сила, що діє на одиницю площі поверхні перпендикулярно до неї:

$$p = \frac{dF}{dS}.$$

**Температура** ( $T$ ) характеризує ступінь нагрітості тіла. Найбільш відомими шкалами є шкала Цельсія, абсолютна шкала Кельвіна і шкала Фаренгейта.

**Рівнянням стану** газу в термодинаміці називають рівняння, що зв'язує основні термодинамічні параметри:  $f(p, V, T) = \text{const.}$

Прикладом такого рівняння є рівняння Менделєєва-Клапейрона, основне рівняння МКТ і т.п.

Наша планета Земля оточена повітряною оболонкою – атмосферою, висота якої складає кілька сотень кілометрів. Чисельне значення атмосферного тиску на рівні моря ( $h = 0$ ):

$$p_0 = 1.01 \cdot 10^5 \text{ Па} = 1 \text{ атмосфері} = 760 \text{ мм рт. ст.} = 1 \text{ Бар.}$$

Тиск атмосфери дуже залежить від висоти над рівнем моря і визначається барометричною формулою

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}}.$$

Бачимо, що тиск зі збільшенням висоти над рівнем моря падає за експонентою.

Людський організм може існувати тільки у визначеному інтервалі тисків (від декількох атмосфер до 0,5 атм.).

### 2.2.3 Основні закони термодинаміки

В основу термодинаміки покладено 2 закони. **Перший закон термодинаміки** є законом збереження енергії в термодинаміці. Кількість теплоти  $\Delta Q$ , передана системі, витрачається нею на зміну внутрішньої енергії  $\Delta U$  і здійснення механічної роботи  $A$ :  $\Delta Q = \Delta U + A$ .

**Другий закон термодинаміки** – це фундаментальний закон природи. Він визначає спрямованість процесів у природі. З погляду термодинаміки Всесвіт розглядається як сукупність систем взаємодіючих між собою частинок. Розрізняють замкнуті і відкриті системи. **Замкнутою** називається система, що не обмінюється з зовнішнім середовищем ні енергією, ні речовиною, ні інформацією. **Відкритими** є всі інші системи. Процеси, що відбуваються в таких системах, за своїм характером можуть бути **оборотними і необоротними**. Оборотним називається процес, якщо: 1) його однаково легко можна провести в двох протилежних напрямках; 2) у кожному із цих напрямків система проходить через ті самі проміжні стани; 3) після проведення прямого і зворотного процесів (циклів) і система, і зовнішнє середовище повертаються у вихідний стан.

Можна навести безліч прикладів процесів у відкритих системах, що

задовольняють перші дві умови. Наприклад, танення льоду навесні та замерзання його узимку. І хоча з водою відбуваються оборотні зміни, енергія, що вивільняється при замерзанні води, не повертається назад Сонцю. Аналогічна картина спостерігається при роботі теплових машин із замкнутим циклом.

Другий закон термодинаміки забороняє пряме перетворення внутрішньої (теплової) енергії в механічну. Існує чотири математично еквівалентних формулювання II закону термодинаміки:

1 Не існує вічного двигуна другого роду, тобто машини, єдиним результатом роботи якої було б виконання механічної роботи тільки за рахунок охолодження одного джерела теплоти (наприклад, океану, що має колосальний запас внутрішньої енергії, без передачі тепла більш холодному тілу).

2 При тепловому контакті неможливий самочинний перехід від більш холодного тіла до більш гарячого.

3 Ніяка теплова машина періодичної дії не може мати ККД, що перевищує ККД ідеальної теплової машини, яка працює за циклом Карно.

4 Ентропія замкнутої системи не може зменшуватися:  $\Delta S \geq 0$ . Іноді другий закон термодинаміки називають законом зростання ентропії. Чим більша ентропія системи, тим більшим числом способів (мікростанів) може реалізуватися макростан даної системи, тому ентропія є мірою неупорядкованості (хаосу) системи багатьох частинок.

У статистичній термодинаміці ентропія – це фізична величина, що характеризує спрямованість процесів у природі (закон зростання ентропії).

Становить особливий інтерес аналіз відкритих систем, які перебувають у нерівноважному сильно упорядкованому стані. Кожен окремий живий організм – це відкрита система, яка для підтримки своєї ентропії на низькому рівні віддає теплову енергію в навколишнє середовище.

Другий закон термодинаміки в його формулюванні через поняття ентропії має такий зміст: самоупорядкування замкнутої системи приводить її до хаосу – стану термодинамічної рівноваги як найбільш ймовірному. Але II закон термодинаміки виявляється непридатним для аналізу процесів у Всесвіті, де з холодних туманностей виникають гарячі зірки. Йому суперечить і той факт, що всім реальним системам з безладом властиві упорядкування і самоорганізація. Дивно, але факт: хаос може приводити до порядку. Це означає, що порядок і хаос – два аспекти одного явища, вони взаємозалежні.

### **Основні положення фізики електромагнітних взаємодій**

Фізика електромагнітних взаємодій є, мабуть, найважливішим розділом фізики. Справа в тім, що електромагнітна взаємодія обумовлює більшість явищ нашого життя. Звичайно, для нас дуже важлива гравітація, а от ефекти сильної і слабкої взаємодій настільки "глибоко" заховані в ядрі, що ми практично їх ніколи не спостерігаємо. Електромагнітна взаємодія забезпечує існування речовини на атомарно–молекулярному рівні: вона утримує електрони біля ядер і основою природи хімічного зв'язку. Але якщо молекулярні сили мають електромагнітну природу, то і значна частина біологічних явищ визначається цим видом взаємодій. Сили в повсякденному житті також мають електромагнітний характер – це сили тертя, пружності, теплового розширення та ін. Крім того, електромагнітна енергія може існувати і поширюватися у вигляді електромагнітних хвиль. Електромагнітні хвилі – це радіохвилі, телебачення, світло, теплове і рентгенівське випромінювання. Електромагнітні явища не просто поєднують електричні та магнітні ефекти. Тут

варто підкреслити, що електрика і магнетизм – це одне і те саме явище, і для того, щоб перейти від магнітних ефектів до електричних і навпаки, досить змінити систему відліку. Те, що для одного спостерігача є електричним полем, для іншого – може бути магнітним. При цьому величина електромагнітних сил залежить від відносної швидкості джерела і спостерігача.

Джерелом електромагнітної взаємодії є електричний заряд. Історично розрізняють електростатику і магнетизм.

### Електростатика

У системі відліку, в якій заряди не рухаються, буде існувати електростатичне поле. Заряд є такою самою фундаментальною властивістю матерії, як і маса. Відомо, що заряди бувають двох типів – "знаків", їх умовно назвали "позитивними" і "негативними". Експерименти показують, що у жодної зарядженої частинки не може бути заряду меншого чи такого, що дорівнює дробовому числу заряду електрона (протона), тобто  $q = \pm Ne$ , де  $N = 0,1,2,3,\dots$  і  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл – заряд електрона (протона) – елементарний електромагнітний заряд. Одиницею електричного заряду є 1 кулон:  $[q] = 1 \text{ Кл}$ .

Одним із фундаментальних законів природи є **закон збереження електричного заряду**, сформульований у 1747 р. Франкліном: повний заряд у замкнутій системі не змінюється:

$$\sum_{i=1}^n (q_+ + q_-)_i = \text{const}.$$

Електростатика базується на законі взаємодії точкових зарядів – **законі Кулона** (1785 р.): два точкових заряди взаємодіють із силами прямо пропорційними добутку цих зарядів і обернено пропорційними квадрату відстані між ними:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2},$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність середовища. Сили Кулона є **центральними**, тобто вони діють уздовж прямої, що з'єднує заряди. У випадку однойменних зарядів це будуть сили відштовхування, а різнойменних – притягання.

Електрична взаємодія між зарядами передається за допомогою **електричного поля**. Для кількісного опису електричного поля вводять поняття напруженості ( $\vec{E}$ ) електричного поля і потенціалу ( $\varphi$ ).

### Електричний струм

Спрямований рух зарядів називають електричним струмом. Для характеристики електричного струму вводиться фізична величина – сила струму.

Одним з найважливіших в області електрики є відкритий Г.Омом у 1826 р. кількісний закон кола електричного струму – **закон Ома**: сила струму в провіднику прямо пропорційна напрузі на кінцях провідника і обернено пропорційна його опору:

$$I = \frac{U}{R}$$

чи у випадку замкнутого кола:

$$I = \frac{\varepsilon}{R + r},$$

де  $\varepsilon$  – електрорушійна сила джерела;  $r$  – його внутрішній опір.

Датський фізик Х. Ерстед у 1820 р. відкрив, що провідник зі струмом має магнітне поле. Це відкриття означало безпосередній зв'язок електричних і магнітних

явищ. Досліджуючи теплову дію електричного струму, Д. Джоуль (1841 р.) і Е.Х. Ленц (1842р.) незалежно один від одного визначили кількість теплоти, що виділяється при проходженні струму (**закон Джоуля-Ленца**). І в 1831 р. М. Фарадей відкриває **закон електромагнітної індукції**, суть якого полягає в такому: магнітне поле, що змінюється, приводить до виникнення електричного поля (ЕРС індукції). Електрорушійна сила індукції у контурі прямо пропорційна швидкості зміни магнітного потоку, який пронизує цей контур:

$$\varepsilon = \frac{d\Phi}{dt}.$$

### Магнетизм

Як відзначалося вище, навколо провідника зі струмом виникає магнітне поле. Джерелом магнітного поля є заряди, що рухаються. Подібно до електричних зарядів, магніти можуть як притягатися, так і відштовхуватися, тому повинні існувати два роди "магнітних зарядів", їх називають "полюсами", один – північним, а інший – південним. Якщо стрижневий магніт вільно підвісити, то він буде повертатися доти, доки не встановиться своєю віссю за напрямком північ – південь. Північним полюсом магніту за визначенням називається полюс, повернений до півночі, отже, Північний полюс Землі є південним полюсом земного магніту.

### Магнітні властивості речовини

Оскільки заряди, що рухаються, є джерелами магнітних полів, то й атоми речовини повинні виявляти ті чи інші магнітні властивості. Для характеристики магнітних властивостей речовини вводять поняття магнітної проникності речовини  $\mu$ . **Магнітна проникність** речовини показує, в скільки разів магнітне поле в речовині більше магнітного поля у вакуумі.

Дійсно, усередині кожного атома є електрони, що рухаються. Наявність власного магнітного поля електрона називається спіном. **Спін** – це одна із квантових величин, які описують властивості електрона в атомі. Виявляється, що спін електрона в атомі може мати тільки дві орієнтації, тому спіни електронів в атомі один щодо іншого можуть орієнтуватися або паралельно  $\uparrow\uparrow$ , або антипаралельно  $\uparrow\downarrow$ . І тут можливі 2 варіанти: або атом є "магнітиком", у цьому випадку речовина, що складається з таких атомів, називається парамагнетиком, або атом – не є "магнітиком" (спіни електронів скомпенсовані), у цьому випадку речовина називається діамагнетиком. Парамагнетики підсилюють зовнішнє магнітне поле, але через тепловий хаотичний рух атомів – "магнітиків" – це посилення незначне. Для парамагнетиків  $\mu \geq 1$ .

Атоми діамагнетиків не мають власних магнітних моментів, але при попаданні в магнітне поле в них індукуються магнітні моменти, що послаблюють зовнішнє поле, тому для діамагнетиків  $\mu \leq 1$ . Ні пара-, ні діамагнетики не можуть при звичайних температурах мати сильне магнітне поле, оскільки тепловий рух руйнує упорядковану орієнтацію спінів сусідніх атомів. Але виявляється, існують речовини, які мають винятково сильні магнітні властивості. Це феромагнетики: залізо, нікель і кобальт. Атоми феромагнетика мають настільки великі власні магнітні поля, що утворюють макроскопічні області ( $\sim 1\text{мкм}$ ) спонтанної намагніченості – домени, що є постійними магнітами. Потрапляючи в магнітне поле, домени орієнтуються уздовж нього і зберігають стан намагніченості поза полем, тобто перетворюються в постійні магніти. Феромагнетики відіграють значну роль у техніці, наприклад, їх використовують осердя для соленоїдів трансформаторів.

### Електродинаміка Максвелла

Відкриття Майклом Фарадеєм закону електромагнітної індукції поклало початок розумінню, що електричне і магнітне поля є двома сторонами одного явища. Джеймс Максвелл розвинув ідеї Фарадея, розробивши в 1865 р. теорію електромагнітного поля, що не тільки змінила, але і розширила погляди фізиків на матерію і привела до створення електромагнітної картини Світу. Теорія електромагнітного поля Максвелла – класична електродинаміка знаменувала собою початок нового етапу у фізиці. Світ почав уявлятися електродинамічною системою, побудованою з зарядів, що взаємодіють за допомогою електромагнітного поля. В основу класичної електродинаміки покладено чотири рівняння Максвелла. Аналізуючи їх, Максвелл прийшов до таких висновків:

1 Повинні існувати електромагнітні хвилі, здатні поширюватися у вакуумі.

2 Швидкість поширення електромагнітних хвиль повинна дорівнювати швидкості світла. Отже, світло – це електромагнітна хвиля.

3 Максвелл передбачив і теоретично обчислив тиск електромагнітної хвилі (а отже, і світла).

4 Максвелл, розробивши електромагнітну картину Світу, завершив картину Світу класичної фізики.

### **Основні положення оптики**

Оптика вивчає утворення, поширення і взаємодію світла з речовиною.

Розглянемо положення видимого світла на шкалі електромагнітних хвиль. Людське око сприймає електромагнітні хвилі від 400 до 700 нм, і в цей незначний на шкалі електромагнітних хвиль інтервал потрапляють усі фарби світу! Розрізняють хвильову і квантову оптику. Хвильова оптика розглядає світло як електромагнітну хвилю і базується на теорії Максвелла. Інтерференція, дифракція, поляризація світла, закони заломлення і відбивання, дисперсія – ось незначний перелік явищ в оптиці, що підтверджують хвильову природу світла.

Велику роль у оптиці відіграє поняття когерентного світла. **Когерентність** – це узгоджене проходження процесів. У загальному випадку світло являє собою не одну електромагнітну хвилю, а сукупність багатьох хвиль, коливання кожної з яких незалежне від коливань інших хвиль. Таке світло називається некогерентним. Якщо ж у пучку світлових хвиль коливання відбуваються узгоджено, так, що різниця фаз між коливаннями зберігається з часом, то таке світло називається когерентним. Інтерференційну (дифракційну) картину можна спостерігати тільки в когерентному світлі. Природні джерела світла відрізняються незначною когерентністю, тому є слабкими. У 60-х роках ХХ сторіччя було створено потужні джерела когерентних хвиль – лазери.

Лазер – це оптичний квантовий генератор когерентного випромінювання.

Виняткові властивості когерентного лазерного випромінювання обумовили бурхливий розвиток лазерної техніки і широке застосування лазерів у наукових дослідженнях і в новітніх технологіях. Когерентне лазерне випромінювання відрізняється малою розбіжністю променів і має велику густину енергії у пучку, яка залежить від величини активного середовища і способу накачування. Сучасна техніка, медицина, засоби зв'язку неможливі без лазерних технологій.

### **Елементи квантової оптики**

До початку ХХ сторіччя в оптиці нагромадився цілий ряд експериментальних фактів, які неможливо було пояснити в рамках класичної хвильової теорії світла. Це:

1 Закон теплового (ІЧ) випромінювання.



2 Лінійчасті спектри атомів.

3 Фотоефект.

У 1900 р. німецький фізик–теоретик М. Планк висунув гіпотезу: електромагнітне випромінювання випускається окремими порціями –**квантами**, величина енергії яких пропорційна частоті випромінювання:

$$E = h\nu, \text{ де } h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Дж} \cdot \text{с} - \text{постійна Планка.}$$

Гіпотеза Планка ознаменувала народження квантової фізики, зокрема квантової оптики. Таким чином, якщо в класичній фізиці вважалося, що енергія електромагнітного випромінювання може змінюватися безперервно і набувати будь-яких близьких значень, то відповідно до квантових уявлень вона може мати лише певні дискретні значення. Квантова фізика впевнено "пробивала собі дорогу" у фізичних уявленнях і світогляді фізиків. Якщо поняття атома речовини і дискретності заряду були дуже складними для розуміння, то дискретність енергії і дії стали для фізичної картини Світу початку ХХ століття справжнім "нокаутом".

У 1905 р. молодий А. Ейнштейн не тільки прийняв квантову гіпотезу Планка, але й розширив її, припустивши, що світло не лише випромінюється квантами, але і поширюється, і поглинається квантами. Це означає, що світло – це потік світлових частинок – фотонів, і це дозволило Ейнштейну написати закон збереження енергії для фотоефекту – відоме **рівняння Ейнштейна**:

$$h\nu = A + \frac{mv^2}{2},$$

де  $h\nu$  – енергія світлового кванта;  $A$  – робота виходу електрона з металу, що залежить від стану поверхні металу і його виду ;  $\frac{mv^2}{2}$  – кінетична енергія фотоелектронів. Рівняння Ейнштейна логічно пояснює і явище фотоефекту, і його закони.

**Фотони.** Отже, світло являє собою потік фотонів – **частинок світла**. Саму назву "фотон" також започаткував А. Ейнштейн у 1926 році. Відповідно до формули Планка енергія фотона визначається його частотою:

$$E = h\nu$$

знаючи швидкість фотонів ( $c$ ), можна знайти їхній імпульс:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}.$$

Подібне співвідношення між імпульсом і енергією справедливе, тільки для частинок з нульовою масою спокою, і які рухаються зі швидкістю світла. Таким чином, на основі формули Планка і постулатів СТО можна стверджувати що:

1. Маса спокою фотона дорівнює нулю ( $m = 0$ ).

2 Фотон завжди рухається зі швидкістю  $c$ .

3 Фотон має енергію:  $E = h\nu$

4 Імпульс фотона:  $p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}.$

Таким чином, світло в багатьох ситуаціях (фотоефект, теплове випромінювання та ін.) поводить себе як потік квантових частинок, однак такі явища, як інтерференція і дифракція, можуть бути пояснені тільки, якщо світло – хвиля. Тут ми стикаємося з проявом **корпускулярно-хвильового** дуалізму світла: в одних явищах світло поводить себе як потік частинок, в інших виявляється його хвильова природа.

Встановлення подвійної природи світла стало початком розуміння дуалізму матерії взагалі. У кінцевому підсумку це привело до створення в другій половині двадцятого століття квантової електродинаміки – квантової теорії поля, в якій описується електромагнітна взаємодія без використання поняття дуалізму.

### **Природничо-наукова картина макросвіту. Фізична природа хімічного зв'язку**

**Хімічним** зв'язком називають сили, що утримують атоми в молекулах чи створюють комбінацію з них. Вище було розглянуто будову атома, його структуру, обумовлену електромагнітною взаємодією між позитивно зарядженим ядром і негативно зарядженими електронами. З огляду на вищевикладене можна припустити, що хімічний зв'язок також має електромагнітну природу і залежить, головним чином, від електронної конфігурації зовнішньої електронної оболонки атома. Молекула є найменшою структурною одиницею хімічної сполуки, яка має його головні хімічні властивості. Молекули простих речовин складаються з однакових атомів, наприклад:  $\text{H}_2$ ,  $\text{C}_2$ ,  $\text{Cl}_2$ ,  $\text{H}_2$  молекули складних речовин – з різних атомів, наприклад:  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{NaCl}$ . Відома велика кількість сполук, молекули яких складаються з багатьох тисяч атомів (макромолекули), – білки, целюлоза, штучні полімери. Між атомами існують як сили притягання, так і сили відштовхування. Оптимальною є така відстань між атомами ( $r_0$ ), при якій сили притягання і сили відштовхування врівноважуються, при цьому потенційна енергія зв'язку з атомом мінімальна, а отже, цій відстані відповідає стан стійкої рівноваги.

Для видалення атома з хімічного зв'язку від відстані  $r_0$  до  $r \rightarrow \infty$  треба виконати **роботу дисоціації**, що дорівнює енергії дисоціації. Існує 5 основних типів хімічного зв'язку між атомами: іонний, ковалентний, металічний, водневий та сили Ван-дер-Ваальса.

**1 Іонний (гетерополярний зв'язок)** є електростатичною силою притягання між іонами з зарядами протилежного знаку. Наприклад,  $\text{NaCl}$ . Для іонного зв'язку характерно:

- а) відносно великі сили зв'язку;
- б) відсутність насиченості, що приводить до можливості існування груп макроскопічних розмірів – кристалів;
- в) відсутність переважного напрямку сил зв'язку – немає спрямованої валентності.

**2 Ковалентний (гомеополярний зв'язок)** – це зв'язок атомів за рахунок усупільнення пари валентних електронів, як правило, при утворенні молекул з однакових атомів. Повне пояснення цих зв'язків дається в рамках квантової механіки (Гайтлер і Лондон, 1927 р.).

Для ковалентного зв'язку є характерним:

- а) насиченість зв'язку, що приводить до переважного утворення атомних груп з невеликою кількістю насичених молекул;
- б) чітко виражена спрямована валентність;
- в) великі сили зв'язку, що діють на малих міжатомних відстанях, тому кристали з ковалентним зв'язком є крихкими і твердими;
- г) обмінний характер сил зв'язку.

**3 Металічний зв'язок.** Метали – це кристалічні структури, ґратки яких складаються з позитивно заряджених іонів. Міцність таких ґраток забезпечується наявністю "вільних електронів", що утворилися при формуванні ґратки, ці електрони не належать ніякому атому, утворюють "вільний електронний газ", який є

«цементом» металевого зв'язку.

Металічний зв'язок – сильний зв'язок, про що свідчать твердість металів і висока температура плавлення.

**4 Сили Ван– дер – Ваальса (слабкі сили молекулярного зв'язку).** Відомо, що газ, молекули якого є електрично нейтральними і хімічно інертними (інертний чи газ молекули з ковалентним насиченим зв'язком), при низьких температурах переходить у рідкий стан. Це свідчить проте, що між такими молекулами існують сили притягання, які не залежать від заряду і не зв'язані з валентними силами. Такі сили, сили Ван-дер-Ваальса, обумовлені вторинними електричними ефектами внаслідок взаємодії електричних диполів.

**5 Водневий зв'язок** виникає між молекулами, до складу яких входить водень і дуже негативні елементи – фтор, кисень, азот, рідше хлор і сірка. Водневий зв'язок обумовлює багато найважливіших властивостей води і біологічно важливих органічних речовин: білків і нуклеїнових кислот. Поняття "водневого зв'язку" відіграє винятково важливу роль в органічній хімії.

**Хімічна реакція** – це процес, у результаті якого змінюються вид, кількість чи взаємне розміщення атомів і молекул реагуючих речовин. Хімічні реакції, що відбуваються в природі, дуже різноманітні: горіння, окислювання, фотосинтез, травлення і т.п. Умовами для протікання хімічної реакції є:

1 Прагнення системи атомів самочинно переходити з більш упорядкованого стану в менш упорядкований (закон зростання ентропії);

2 Прагнення системи переходити мимовільно в стан з меншою енергією.

Хімічні реакції проходять з виділенням (екзотермічні реакції) чи з поглинанням (ендотермічні реакції) теплоти. Найпоширенішою реакцією з виділенням теплоти є реакція горіння. У цьому випадку внутрішня енергія виділяється у вигляді тепла. За вимірами теплового ефекту реакції можна робити висновок про зміну внутрішньої енергії системи.

Реакційна здатність речовин визначається активністю хімічних елементів.

**Швидкість хімічної реакції** залежить як від хімічної активності реагуючих речовин, так і від їхньої концентрації і температури. Чим більша концентрація і вища температура, тим швидше проходить реакція. Сучасній науці відомо близько 8 млн. хімічних сполук, причому переважна більшість з них (7,7 млн.) – це органічні сполуки, що містять вуглець. Основним будівельним матеріалом таких сполук є: вуглець (C), кисень ( $O_2$ ), водень (H), азот (N), фосфор (P) і сірка (S). Вагова частина цих елементів в організмах складає 97,4 % ще 12 елементів (Na, K, Ca, Mg, Al, Fe, Si, Cl, Cu, Zn, Co, Ni) дають 1,6 %. З інших (більш ніж 90) хімічних елементів Природа створила близько 300 тис. неорганічних сполук.

В основному всі хімічні елементи існують у вигляді різних сполук. Корпускулярна природа одиниць атома приводить до корпускулярної структури матерії.

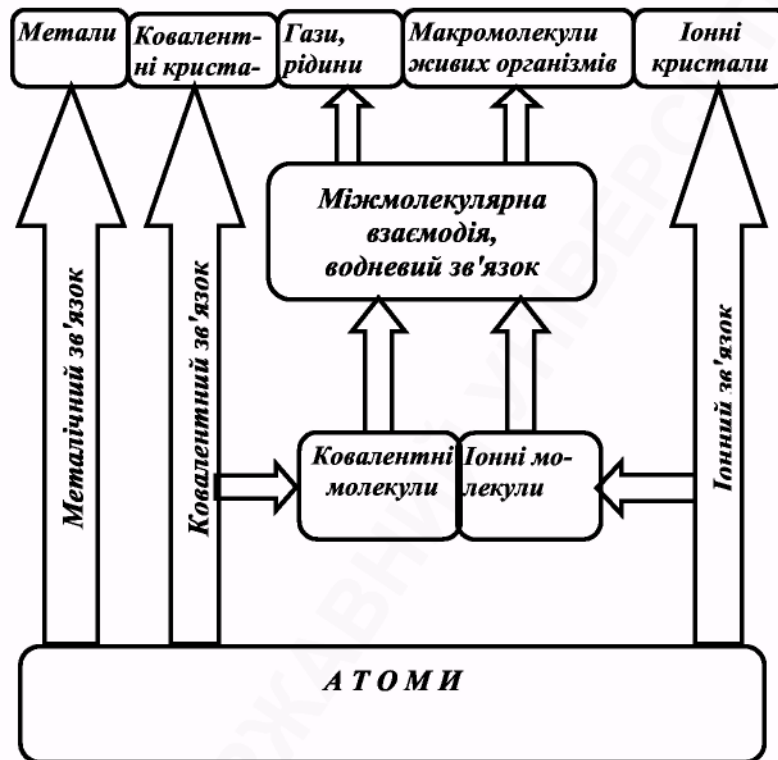
Незважаючи на свою складність, хімічні сполуки є тільки цеглинками, будівельним матеріалом незрівнянно більш складних біологічних структур.

### Елементи біології

**Біологія** – це наука про життя. Тривалий шлях пройшли природознавство і біологія, зокрема, щоб відповісти на запитання: «Що таке життя?» Характерними рисами життя є: зростання, рух, обмін речовин, розмноження і пристосування. Даний перелік свідчить про те, що немає простого визначення життя. Як приклад наведемо визначення М.В. Волькенштейна: «...життя є форма існування

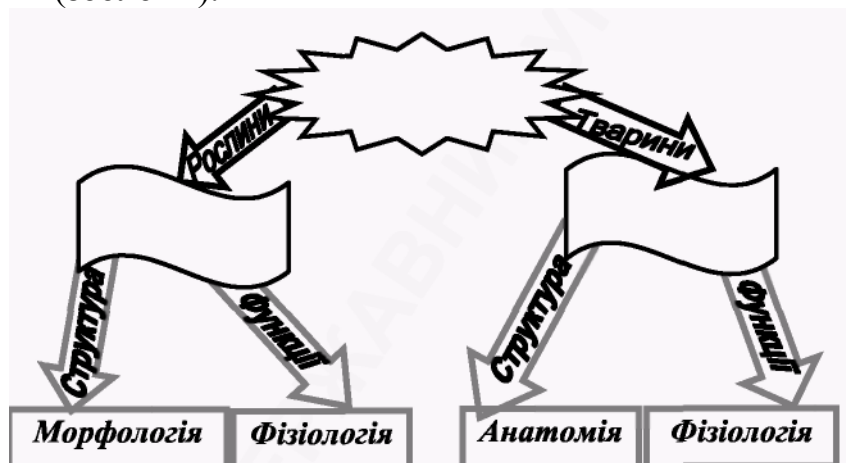
макроскопічних гетерогенних відкритих систем, далеких від рівноваги, здатних до самоорганізації і самовідтворення. Найважливішими функціональними речовинами цих систем є білки і нуклеїнові кислоти».

Основою біологічних процесів є закони фізики і хімії, хоча біологія має свої спеціальні закони.



Структурні рівні матерії в хімії

Система біологічних наук підрозділяється на науки про рослини (ботаніка) і тварини (зоологія).



Вражає діапазон розмірів біологічних об'єктів: від амінокислот (1 нм) до китів (10 м) і гігантських евкаліптів (40–50 м). Відомо близько одного мільйона видів тварин і 400 тисяч видів рослин, що живуть у даний час на Землі.

Така розмаїтість живих організмів вимагає відповідної класифікації, тому біологічні об'єкти поєднують у природні групи, пов'язані єдиним походженням.

У процесі розвитку біологічних наук виділяються 3 основні етапи, що відрізняються один від одного своєю головною ідеєю: I етап – період систематики; II етап – еволюційний період; III етап – період мікробіології.

## Основні узагальнення біологічних наук

Комплекс біологічних наук спирається на ряд тверджень, на основі яких і відбувається розвиток даних наук:

- 1 Живі організми підкоряються законам фізики і хімії.
- 2 Клітинна теорія.
- 3 Біогенез.
- 4 Живі клітини – перетворювачі енергії.
- 5 Теорія еволюції органічного світу.
- 6 Генна теорія.
- 7 ДНК – головний носій інформації.
- 8 Метаболізм.
- 9 Взаємозв'язок між організмом і навколишнім середовищем.

### Закономірності еволюції біосфери

**Поняття "біосфери"** пройшло довгий шлях розвитку. Вперше воно з'явилося на початку XIX століття в роботах Ламарка і Гумбольда. Найбільш повно поняття біосфери сформульовано в роботах В.І.Вернадського. У 1926 році вийшла робота вченого «Біосфера», у якій він дав вичерпне тлумачення біосфери. **Біосфера, за Вернадським,** – це цілісна організована система живої речовини і мінеральних елементів, залучених у сферу життя, у якій сукупна діяльність живих організмів (у тому числі людини) виявляється як геохімічний фактор планетарного масштабу і значення. Усі явища в ній – частина єдиного механізму біосфери. Біосфера – це моноліт життя, самим життям створений і керований, це величезний єдиний механізм, де, за словами Пастера, усі стадії роботи смерті зумовлені явищами життя.

Біосфера розподілена по земній поверхні вкрай нерівномірно й у залежності від кліматичних умов набуває вигляду незалежних комплексів – **біогеоценозів** (екосистем). Жива частина біогеоценозу – біоценоз – складається з популяцій організмів різних видів.

**Популяція** – це сукупність особин одного виду, що населяють визначену територію, більш–менш ізольовану від сусідніх сукупностей того ж виду. **Види** – це системи популяцій. Популяції і види здатні як до існування протягом тривалого часу, так і до самостійного еволюційного розвитку. Популяції – це генетичне відкриті системи, тому що особини з різних популяцій іноді схрещуються. Види є найменшими генетичне закритими системами.

Термін біогеоценоз є синонімом терміна **екосистема**. У розвитку екосистем велику роль відіграють організми, здатні самостійно синтезувати органічні речовини з неорганічних сполук. Ці організми називаються **автотрофами**. Автотрофи є первинною біотичною основою для формування біогеоценозів. Організми, що використовують для харчування органічні речовини, вироблені іншими організмами, називаються **гетеротрофами**. До гетеротрофних організмів належать людина, усі тварини, гриби, більшість бактерій, вірусів.

Біосфера Землі утворюється всією сукупністю біогеоценозів, пов'язаних між собою кругообігом речовин і енергії. Таким чином, можна дати ще одне визначення біосфери. **Біосферою** називається простір, що містить навколоземну атмосферу і зовнішню оболонку Землі, освоєний живими організмами і який перебуває під впливом їхньої життєдіяльності.

Біосфера уловлює лише невелику частину сонячної енергії, що надходить на Землю (тільки 0,02 % сонячної енергії, що надходить, використовується біосферою).

Усі живі організми пов'язані між собою енергетичними відношеннями, оскільки є об'єктами харчування інших організмів.

Зелені рослини засвоюють сонячну енергію в процесі фотосинтезу, перетворюють і запасують її. Травоїдні тварини (споживачі першого порядку) поїдають рослини, первинні хижаки (споживачі другого порядку) поїдають травоїдних, вторинні хижаки (споживачі третього порядку) поїдають маленьких хижаків. Таким чином створюються харчові ланцюги з продуцентів (зелені рослини), консументів (споживачі органічної речовини) і редуцентів, тобто руйнівників (мікроорганізми, бактерії, гриби). Поїдаючи органічні сполуки, що розкладаються, редуценти мінералізують їх до води, двоокису вуглецю і мінеральних добрив.

Основою існування біосфери є **біотичний кругообіг** органічних речовин за участю організмів, що її населяють. У закономірностях цього кругообігу вирішена проблема розвитку і тривалого існування життя.

Будь-яка форма життя бере участь у біотичному кругообігу – він є основою саморегуляції біосфери. Незвичайна пристосовність мікроорганізмів робить їх фундаментом в екологічній піраміді для вищих організмів.

Хімічна рівновага в біосфері також спирається на **біотичний** кругообіг. Сучасна наука стверджує, що ця рівновага є хиткою і будь-який, навіть малий, вплив може вивести систему з рівноваги. Так, наприклад, ряд учених (Л.Маршалл, М.Будико, Л.Беркнер та ін.) вважають, що різке зменшення вуглекислоти в атмосфері з появою фотосинтезу призвело до похолодання і заledenіння Землі, що, в свою чергу, викликало порушення природних циклів.

У сучасний період відбувається швидка перебудова природи в цілому у результаті людської діяльності, що, власне, і є предметом вивчення **екології**.

### **Основні концепції походження життя на землі**

Питання про походження життя на Землі виникло у далекій давнині, тому існує величезна кількість теорій, що пояснюють виникнення життя, розуму. Умовно всі гіпотези можна розділити на два класи: концепцію біогенезу і концепцію абіогенезу.

**Біогенез** – концепція, яка стверджує, що живе може походити тільки від живого.

**Абіогенез** припускає, що життя може походити від неживої субстанції.

Походження життя на Землі тісно пов'язане з історією Сонячної системи і, власне, самої Землі. Нашій Землі приблизно 5 млрд. років і спочатку вона, очевидно, була гарячою з температурою поверхні 5000–6000 °С. Поступово остигаючи, утворювалася літосфера – тверда оболонка Землі. Атмосферу залишали легкі гази, у першу чергу водень. Літосфера не є суцільною корою, а складається з декількох плит, що плавають на рідкій оболонці Землі – мантії. Це призводить до дрейфу континентів, що має циклічний характер з періодом у 440 млн. років.

Перші ознаки життя – викопні водорості – виникли 3400млн. років тому. До цього часу земна поверхня досить остигла для того, щоб вода могла існувати в рідкому стані, утворити первісний океан. Історія розвитку життя на Землі не викликає розбіжностей, але теорій походження життя, як зазначалося раніше, безліч та жодну з них не можна вважати доведеною. Розглянемо три основні теорії виникнення життя.

**1 Креаціонізм** ґрунтується на концепції біогенезу. Відповідно до теорії креаціонізму життя – це результат надприродних подій у минулому. На користь

невипадкового характеру процесу розвитку життя свідчить антропний принцип.

**2 Панспермія** – гіпотеза «посіву» життя на Землі з Космосу. У 1865 р. німецький лікар Г.Ріхтер висунув **гіпотезу космозоїв** (космічних зародків), відповідно до якої життя є вічним і його зародки, що населяють світовий простір, можуть переноситися з однієї планети на іншу. Згідно з гіпотезою панспермії у світовому просторі розсіяні зародки життя (наприклад, спори мікроорганізмів), що рухаються під тиском світлових променів і, потрапляючи в сферу притягання планети, осідають на її поверхні, закладаючи на цій планеті початок життя. На користь гіпотези панспермії свідчать випадки виявлення слідів мікроорганізмів на метеоритах. Гіпотеза панспермії також ґрунтується на принципах біогенезу.

**3 Теорія біохімічної еволюції.** У 1924 р. академік О.І.Опарін опублікував роботу «Походження життя», в якій висувалася гіпотеза, що стала основою теорії біохімічної еволюції. Згідно з цією теорією органічні речовини утворилися абіотичним шляхом з неорганічних під дією фізико–хімічних факторів: температури, космічного випромінювання, тиску атмосфери. Стан океану на Землі в ту далеку епоху називають "органічним бульйоном". Що ж спричинило саморозвиток хімічних структур, який призвів до стрибка неживе – живе?

Корисно розглянути такі етапи в еволюції органічної речовини на Землі, що передували виникненню життя:

- 1) еволюція малих молекул;
- 2) утворення полімерів;
- 3) виникнення каталітичних функцій;
- 4) самоскладання молекул;
- 5) виникнення мембран і доклітинної організації;
- 6) виникнення механізму спадковості;
- 7) виникнення клітин.

Можливо, життя на Землі виникло абіотичним шляхом, але необхідно зазначити, що в даний час неможливо штучно відтворити виникнення механізму матричного копіювання, реалізованого в живій клітині нуклеїновими кислотами. Проте у цьому й полягає суть проблеми виникнення життя на Землі.

Учені підраховували імовірність випадкового виникнення білкової молекули, що складається із 100 амінокислот 20 видів, вона становить  $\sim 1/10^{130}$ ! Астроном Фрейд Хойл із цього приводу дуже влучно висловився: «Імовірність... до того мала, що це було б немислимо навіть у тому випадку, якби весь Всесвіт складався з "органічного бульйону". Це така сама нісенітниця, як твердження, що ураган, який пронісся над смітником, може призвести до складання нового «Боїнга–747».

Крім того, еволюційний механізм видоутворення припускає велику кількість перехідних форм від одного виду до іншого, але їх немає. Утворення видів – стрибкоподібний процес. Історія життя на Землі приховує багато таємниць. Чи будуть вони коли–небудь розкриті чи ні, покаже майбутнє, але палеонтологічні знахідки свідчать не на користь біохімічної еволюції.

Крім вищеперелічених гіпотез про походження життя на Землі, існує безліч інших. Вернадський, наприклад, вважав, що біосфера геологічно вічна, тобто життя на Землі існує стільки ж часу, скільки і сама Земля існує як планета.

## Антропогенез

**Антропогенез** – історія виникнення і розвитку людини. Згідно із сучасними

уявленнями найбільш правдоподібною виглядає еволюційна теорія походження людини від тваринного предка. Людина – тип хордових, підтип хребетних, клас ссавців, ряд приматів, родина вузьконосних мавп.

Довгий час були відсутні емпіричні дані про предків людини. Дарвін знав тільки дріопітеків (знайдених у 1856 р. у Франції) і писав про них як про далеких предків людини.

У даний час більшість фахівців вважає, що найближчим попередником людини є **австралопітеки**, їх кісткові залишки, вік яких складає від 5 до 2,5 млн. років, уперше були виявлені в 1924 р. у Південній Африці.

У процесі становлення людини можна виділити три стадії:

- 1 Найдавніші люди (архантропи).
- 2 Древні люди (палеонтропи).
- 3 Сучасні люди (неантропи).

У 1891 р. голландський дослідник Ежен Дюбуа на о. Ява вперше знайшов скам'янілі останки найдавнішої людини – першого пітекантропа. **Найдавніші люди** з'явилися приблизно 1–2 млн. років тому (пітекантропи, синатропи і т.п.). Вони полювали, жили в печерах, уміли користуватися вогнем і підтримували його з покоління в покоління, їх мозок мав масу біля 1 кг. Найдавніших людей змінили древні люди, яких називають **неандертальцями**. Близько 28 тис. років тому неандертальці були витиснені сучасними людьми – **кроманьйонцями**. Найбільш ранні знахідки кісткових останків кроманьйонців датуються в 40 тисяч років.

Однак людина одночасно і біологічна істота, і соціальне створіння, тому антропогенез невідривне пов'язаний із соціогенезом, являючи собою, по суті, єдиний процес антропосоціогенеза. Основою людини розумної *Homo Sapiens* є його соціальна, а не біологічна сутність. Було б непогано зуміти дати визначення розуму. В даний час більшість учених припускають, що розум є нематеріальним. Він є функцією мозку і має ідеальний характер. Розум перебуває поза сферою дії біологічних законів, він суцільно соціальний за своїм походженням і змістом. Розум виникає в процесі діяльності, спілкування дитини з людьми. Як приклад, можна навести дітей, що потрапили на виховання до диких тварин. Не маючи можливості брати участь у соціальному житті, в процесі свого розвитку, такі діти так і залишаються тваринами.

Однак прояв надбіологічного неможливий без наявності біологічних передумов. Людина, володіючи соціальною сутністю як основою поведінки, разом з тим протягом усього життя підкоряється біологічним законам. Це означає, що розвиток і життєдіяльність людини неможливі без дії її генетичної програми.

### **Місце людини у Всесвіті**

Сучасна наука розглядає місце людини у Всесвіті на основі антропоного принципу. Виникнення, існування і розвиток людини – Розуму обумовлені закономірностями виникнення і розвитку Всесвіту. Тепер уже зрозуміло, що Всесвіт – цілісна, єдина система, і її розвиток має певну спрямованість. Можливість і необхідність появи Життя, Розуму закладено в самому Всесвіті. Матерія породила людину в процесі еволюції, щоб пізнати саму себе за допомогою людини. Людина єдина з Космосом і вже ні для кого не секрет, що Космос впливає на людину (добові цикли, 11-літній цикл сонячної активності і т.п.). Відомі 3 цикли активності людини з дня народження: фізичний (23 доби), емоційний (27 діб) і інтелектуальний (33 доби).

З принципів еволюційної теорії випливає, що у Всесвіті можуть існувати різні



форми життя, розуму. Починаючи з післявоєнного часу, безупинно продовжуються експерименти з прослуховування Всесвіту з метою встановлення контакту з іншими цивілізаціями. Той факт, що ці пошуки ще не дали позитивного результату, отримав назву «феномен німого Всесвіту».

Можливо, відповідь на питання: "Чи ми єдині у Всесвіті?" може дати з'ясування, у якій кількості зірок існують планетні системи подібні до Сонячної, оскільки існування планет біля інших зірок непрямо підтверджує можливість існування в Космосі життя, подібного до нашого. І от у квітні 1999 року Дебора Фішер знайшла планетну систему з трьома великими планетами, яка знаходиться на відстані 44 світлових років від нашої (Е у сузір'ї Андромеди). До 2002 року таких систем було відкрито вже 18.

Паралельно з пошуком планет проводяться інтенсивні астрохімічні дослідження, кінцевою метою яких є відповідь на питання: "Чи є життя у Всесвіті? Як воно зароджується? Яких форм набуває?" Вже тепер зроблені дивні відкриття, так, наприклад, амінокислоти виявлені у космічному пилу при тиску, що дорівнює одній тисячній атмосфери. Отже, цеглинки життя поширені у Всесвіті і видиме життя – одна з його характеристик. Але дотепер відкритим залишається питання про існування розумного життя. Можливо, незабаром ми одержимо відповідь і на це запитання. Поживемо – побачимо...

### **2.3. Науково-технічний прогрес та його роль у розвитку виробництва** **Сутність і зміст науково-технічного прогресу**

Науково-технічний прогрес є основним джерелом підвищення ефективності виробництва та продуктивності суспільної праці. Він повинен забезпечувати постійне удосконалення діючих підприємств і створення нових на основі розвитку науки й техніки.

Для житлово-комунального господарства технічний прогрес має велике значення, тому що завдання галузі можна успішно вирішити тільки на базі технічного прогресу, який дозволяє збільшувати обсяг, підвищувати якість та надійність обслуговування населення при зростанні продуктивності праці й зниженні собівартості комунальних послуг.

У житлово-комунальному господарстві науково-технічний прогрес являє собою постійне удосконалення виробничої техніки – машин, механізмів, обладнання, а також предметів праці, матеріалів, конструкцій; крім того це постійне удосконалення технології робіт, впровадження прогресивних форм організації праці.

Рівень науково-технічного прогресу в житлово-комунальному господарстві оцінюється технічною новизною, економічною ефективністю та соціальним значенням.

Технічна новизна характеризується створенням нових, більш досконалих знарядь і предметів праці. Так, у зеленому господарстві збільшується оснащеність оранжерейних господарств системами напівавтоматичного та автоматичного регулювання умов середовища – температури й вологості повітря, освітлення і опалення, здійснюється механізація перевезення матеріалів, пересування стелажів. У пральному господарстві повністю механізовано процес прання білизни, механізуються інші стадії виробничого процесу. Механізуються роботи, зв'язані з експлуатацією житлового фонду (централізація управління ліфтами, автоматична підкачка води на верхні поверхи, централізоване включення і виключення

освітлення дворів, під'їздів, сходів, застосування малогабаритних прибиральних та транспортних машин, механізмів для миття підлоги та вікон на клітинах сходів та ін.). У водопровідному й каналізаційному господарстві поряд з будівництвом нових технічнооснащених підприємств проводяться значні роботи щодо заміни старого обладнання новим, більш продуктивним та економічним, наприклад, впровадження заглиблених насосів більшої продуктивності замість відцентрових насосів. На міському пасажирському транспорті удосконалюється рухомий склад (підвищуються місткість, комфортабельність, динамічні показники); безперервно оснащується новою технікою енергетичне господарство міського електричного транспорту; механізуються роботи з ремонту рухомого складу, шляхового господарства, контактної мережі та ін.

Впровадження у виробництво досягнень науки й техніки є основним джерелом підвищення економічної ефективності суспільного виробництва. Застосування нової техніки, прогресивної технології, механізація та автоматизація виробничих процесів на комунальних підприємствах щорічно дають значний економічний ефект.

Науково-технічний прогрес має велике соціальне значення. Механізація і автоматизація виробничих процесів дозволяє скоротити частку ручної праці, важких та трудомістких операцій.

Головними напрямками науково-технічного прогресу в житлово-комунальному господарстві є:

- розробка і впровадження потужних машин та механізмів, підвищення комплексної механізації трудомістких процесів;
- підвищення рівня механізації;
- удосконалення автоматизованих систем управління;
- удосконалення рівня технології;
- удосконалення організаційних форм управління виробничими процесами та матеріально-технічним постачанням;
- створення і впровадження нових матеріалів, полегшених конструкцій для будівництва, дерев'яних конструкцій для малих форм (у садово-парковому господарстві), холодильних установок для зберігання садильного матеріалу та ін.

Механізація виробничого процесу в житлово-комунальному господарстві – найважливіше джерело підвищення продуктивності праці. Механізація виробництва означає заміну ручної праці машинною. Це скорочує тривалість виробничого процесу, забезпечує економію праці робітників, оздоровлює її умови.

Розрізняють три стадії механізації виробничого процесу: часткова механізація, комплексна механізація автоматизація.

**Часткова механізація** – це виконання за допомогою машин найбільш трудомістких процесів виробництва. Так, у зеленому господарстві України механізовано такі найбільш трудомісткі процеси, як викопування великомірних саджанців з комом (машина МДВ), приготування місць для висаджування (ямовикопувач ЯПГ), капітальний та поточний ремонт газонів (навісне обладнання ОУГ – 132), стрижка газонів (косилка КГШ – 1,5, КГЕ – 0,5) та живоплоту (КГШ – 101).

**Комплексна механізація** є найбільш досконалою формою застосування машинної праці, коли всі виробничі та транспортні процеси виконуються комплексом машин та механізмів, взаємозв'язаних за продуктивністю та основними

параметрами. При комплексній механізації застосування ручної праці скорочується до мінімуму.

**Автоматизація виробництва** – це такий етап машинного виробництва, коли усі виробничі операції виконуються машинами та приладами за допомогою дистанційного управління.

Економічну ефективність механізації робіт оцінюють за допомогою таких показників: механо-, енерго-, електроозброєність праці, коефіцієнт механізації праці, коефіцієнт інтенсивного та екстенсивного навантаження машин. На підприємствах житлово-комунального господарства використовують такі показники: коефіцієнт (рівень) механізації робіт і коефіцієнт (рівень) механізації праці.

**Коефіцієнт механізації робіт** характеризує ступінь механізації робіт. Його визначають, поділивши обсяг робіт, виконаних за допомогою машин і механізмів, на загальний обсяг робіт за формулою

$$K_{mp} = W_m \times 100 : W_z ,$$

де **K<sub>mp</sub>** – коефіцієнт (рівень) механізації робіт;

**W<sub>m</sub>** – обсяг робіт, що виконуються механізованим способом, у натуральних вимірниках;

**W<sub>z</sub>**

- загальний обсяг цих робіт.

Показник

**K<sub>mp</sub>** визначають за видами робіт.

**Коефіцієнт (рівень) механізації праці** – співвідношення чисельності робітників, зайнятих на механізованих роботах та загальної чисельності робітників. Рівень механізації праці можна виміряти трудомісткістю процесу – співвідношенням трудомісткості механізованих операцій до загальної трудомісткості виробничого процесу за формулою

$$K_{mp} = T_m \times 100 : T_z ,$$

де **K<sub>mp</sub>** – рівень механізації праці;

**T<sub>m</sub>** – трудомісткість механізованих операцій, люд-днів;

**T<sub>z</sub>** – загальна трудомісткість процесу, людино-днів.

Показник

**K<sub>mp</sub>** визначають по підприємству в цілому.

Реалізація науково-технічної політики в житлово-комунальному господарстві України

Основою реалізації науково-технічної політики в житлово-комунальному господарстві України є галузева науково-технічна програма “Наука”.

Програма складається з шести підпрограм: “Екологія”, “Ресурсозбереження”, “Енергозбереження”, “Автоматизація та механізація”, “Якість”, “Економіка та ринок”.

Враховуючи енергоємність продукції (послуг) ЖКГ, однією з провідних для всіх підгалузей житлово-комунального господарства є програма “Енергозбереження”. Основною метою програми енергозбереження є зменшення енергоресурсів на одиницю продукції та послуг і, в кінцевому підсумку, скорочення енергетичних витрат.

Підприємства житлово-комунального господарства і споживачі щорічно споживають близько 10 млрд. кВт-годин електроенергії і 8,5 млрд. кубічних метрів природного газу. Витрати енергоресурсів на одиницю виготовленої продукції та

наданих комунальних послуг більше, ніж у 2-3 рази перевищують зарубіжні показники.

Для всіх підприємств галузі нагальною є проблема енергозбереження, економного витрачання ресурсів та обліку обсягу послуг, що надаються споживачам.

Найближчим часом треба розробити систему нормативно-методичних документів, що регламентують організацію виконання та реалізацію заходів з енергозбереження житлово-комунального господарства, яка повинна забезпечити:

- створення механізму стимулювання ощадливого споживання енергоносіїв;
- впровадження лізингових операцій як додаткового джерела фінансування заходів енергозбереження;
- спрямування частини коштів від штрафних санкцій за неефективне використання паливно-енергетичних ресурсів на встановлення будинкових засобів обліку та регулювання енергоресурсів;
- запровадження галузевого інноваційного фонду в житлово-комунальній сфері, кошти якого мають витрачатися на оснащення житла засобами регулювання та обліку енергоресурсів, модернізації підприємств.

На виконання прийнятих Урядом рішень щодо енергозберігаючої політики необхідно:

- щорічно передбачати кошти на впровадження засобів обліку води і теплової енергії в проектах Державного бюджету України та Програмі економічного і соціального розвитку України;

- Раді Міністрів Автономної Республіки Крим, облдержадміністраціям, Київській та Севастопольській міським державним адміністраціям:

- встановити жорсткий контроль за виконанням Програми поетапного оснащення наявного житлового фонду засобами обліку та регулювання споживання води і теплової енергії, покласти особисту відповідальність за виконання Програми на керівників місцевих органів виконавчої влади;
- передбачити у проектах місцевих бюджетів кошти на фінансування робіт, пов'язаних з оснащенням наявного житлового фонду засобами обліку та регулювання споживання води і теплової енергії;
- залучати інші джерела фінансування, у тому числі кошти цільових фондів сприяння впровадженню засобів обліку та населення, кредитні кошти тощо;
- запровадити диференційовані тарифи на послуги з тепло – та водопостачання, що надаються за нормами або показниками засобів обліку;
- розширити мережу спеціалізованих підприємств з монтажу, сервісного обслуговування та ремонту приладів обліку та регулювання споживання холодної і гарячої води та теплової енергії;
- вжити заходи, щодо безумовного дотримання вимог Правил надання послуг населенню з тепло-, водопостачання та водовідведення усіма виробничими суб'єктами (виконавцями послуг) , не допускати випадків проведення розрахунків за спожиті енергоносії за нормами при наявності засобів обліку, вносити пропозиції щодо притягнення до адміністративної відповідальності посадових осіб підприємств-виконавців послуг, які порушують вимоги цих Правил.

Виконання Програми енергозбереження в житлово-комунальному господарстві на 2001-2005 рр. і на перспективу та Програми поетапного оснащення наявного житлового фонду засобами обліку та регулювання споживання води і теплової енергії, а також накреслених заходів забезпечить:

- о у комунальній теплоенергетиці – зменшення питомих витрат на виробництво теплової енергії з 171,1 кг у.п./ Гкал у 2000 р. до 164,7 кг у.п./ Гкал у 2005 р. та економію 1360,0 тис. т у.п. і на перспективу до 2010 р. – 3900,0 тис. т у.п.;

- о у водопостачанні – зменшення питомих витрат електроенергії на одиницю продукції з 0,98 кВт-год/куб.м. у 2000 р. до 0,84 кВт-год/куб.м. у 2005 р. та економію 1465,0 млн. кВт-год. та на перспективу до 2010 р. 2683 млн. кВт-год. або 966,0 тис. т у.п.;

- о у водовідведенні – зменшення питомих витрат електроенергії на одиницю продукції з 0,59 кВт-год/куб.м. у 2000 р. до 0,46 кВт-год/куб.м. у 2005 та економію 1183,0 млн. кВт-год та на перспективу до 2010 р. – 2304,0 млн. кВт-год або 830,0 тис. т у.п.;

- о у житловому фонді та інших підгалузях – до 2005 р. економію 62 млн. кВт-год або 22,3 тис. т у.п.;

- о до 2010 р. – стовідсоткове обладнання будинків лічильниками води та теплової енергії.

Прогнозується на кінець 2005 р. зменшити енергоємність не менше, ніж на 18%, досягти економії паливно-енергетичних ресурсів близько 13,2 млн. т у.п. (620 млн. грн.), а до 2010 р. знизити рівень споживання паливно-енергетичних ресурсів не менше ніж на 30%.

Основні напрямки науково-технічного прогресу за підгалузями житлово-комунального господарства такі.

### **Фізика і науково-технічний прогрес**

В даний час відбувається найбільша науково-технічна революція (НТР), яка почалася більше чверті століття назад. Вона зробила глибокі якісні зміни в багатьох областях науки і техніки. Поява НТР пов'язана з великими відкриттями в області фундаментальної фізики. Відкриття радіоактивності, електромагнітних хвиль, ультразвуку, реактивного руху і т. д. призвело до того, що людина, використовуючи ці знання пішла далеко в перед розвитку техніки. Людина навчилася передавати на відстані не тільки звук, але і зображення. Тепер ні кого не здивуєш ні телевізором, ні відеомагнітофоном, але ж кілька сторіч назад тільки за думки про таке могли спалити на багатті інквізиції. Людина вийшла в космос висадила на Місяць, побачила її зворотну сторону. За допомогою унікальних оптичних приладів люди можуть довідатися з якої речовини складаються далекі від нас планети. Отримані нові дані коли-небудь дозволять людині зробити нові неймовірні для нас відкриття, які приведуть до нових досягнень у науки і техніки. В усьому світі спостерігаються глибокі якісні зміни в основних галузях техніки. НТР докорінно змінило роль науки в житті суспільства. Наука стала безпосередньою продуктивною силою. Прикладна електроніка колишня донедавна частина загальної фізики стала незалежною областю науки, так само як і фізична хімія, геофізика й астрофізика відокремилися від загальної фізики. Основні досягнення в останні роки були отримані на стику різних наук – у біофізику, фізику твердих тіл і астрофізику. Розшифровка структур ДНК, синтез складних протеїнових молекул і досягнення генної інженерії були здійснені завдяки досягненням спектроскопії, рентгенівській кристалографії й електронному мікроскопу. Усе більшого значення набуває ультразвук у наукових

вишукуваннях і практичних застосуваннях. Формується новий напрямок хімії – ультразвукова хімія. Виникли нові області застосування ультразвуку: мікроскопія, голографія, квантова акустика і т. д. Ультразвук допомагає військовим морякам виявляти підводні човни, медикам будувати діагностику різних захворювань, рибалкам знаходити косяки риб.

Ультразвук будує і руйнує, ріже і свердлить, штампує і паяє, очищає, сортує, стерилізує, розвідує. Його взяли на озброєння геологорозвідники і нафтовики. І це ще не всі, перелік застосування ультразвуку можна продовжити. Винахід транзистора привело до дійсної революції в області радіоелектроніки. На основі транзисторної технології з'явився новий напрямок у науці і техніку – мікроелектроніка. Що дозволило людині побудувати перші напівпровідникові ЕОМ. Фізика вносить вирішальний вклад у створення сучасної обчислювальної техніки, що представляє собою матеріальну основу інформатики. За короткий проміжок часу обчислювальна техніка ступнула далеко в перед. Сучасні персональні комп'ютери мають величезну швидкість обробки інформації, великі обсяги пам'яті, що дозволяють здійснювати практично будь-які розрахунки. За допомогою периферійних пристроїв комп'ютер х пристроїв комп'ютер бачить, чує, малює, креслить, друкує, говорить, показує, грає в ігри, навчає, керує технологічними процесами на виробництві, стежить за космічним польотом і т.д. Важко уявити собі сьогоднішній день без комп'ютера. За допомогою комп'ютера в наші дні здійснюється зв'язок по комп'ютерній мережі з будь-якої крапки земної кулі. У такий спосіб йде обмін відео, аудіо і текстової інформації між людьми в різних країнах. Це дозволяє людям зрозуміти один одного краще, довідатися багато новий друг про друга, одержати цікаву науково технічну інформацію. Електронна пошта в лічені секунди доставить ваше повідомлення величезного обсягу в будь-який куточок землі. З розвитком і поширенням комп'ютерної техніки напевно незабаром ні хто не буде користатися звичайною поштою. Розвиток комп'ютерної техніки, розробка новітніх мов програмування дають можливість ученим фізикам робити складні розрахунки, аналізувати складні ймовірнісні ситуації, будувати математичні моделі різних процесів. Тобто, розвиток самої фізики не можливо без допомоги її власного дітища.

Точно такі ж приклади можна навести практично до будь-якого розділу фізики. Будь-яке відкриття нових фізичних законів негайно приводить до використання їх у розвитку інших наук і техніки. А це у свою чергу приводить до нових відкриттів у фундаментальній фізики. У такий спосіб науково-технічний прогрес не можливо зупинити. Розвиток фізики принесло не тільки фундаментальні зміни в уявленні про матеріальний світ, але також через засоби технологій, які засновуються на лабораторних відкриттях, зміни в суспільстві. Завдяки розвитку науки техніки люди на планеті Земля стали жити під одним дахом і в єдиному інформаційному просторі. Тепер уже не здається, що земля нескінченно велика і на її поверхні й у її надрах можна робити що завгодно. Необдумані дії людини, збройного досягненнями тієї ж самої науки техніки, приводять до необоротних руйнівних наслідків для природи і самої людини. Злий розум звертає нові відкриття проти самого себе. Наш світ малий і крихко. Одним натисканням кнопки можна знищити все живе на землі.

Використання людського інтелекту, що винаходить нові товари або більш ефективні технології виробництва – найважливіше джерело економічного зростання. За останні 250 років розвиток техніки буквально перетворив наше життя. Спочатку

парова машина, потім – двигун внутрішнього згоряння, електрика і ядерний реактор замінили мускули людини і тварин як основне джерело енергії. Автомобілі, автобуси, поїзди і літаки витіснили коня і віз як основні способи пересування. Технічний прогрес продовжує змінювати наше життя і сьогодні. Лазерні програвачі, мікрокомп'ютери, текстові редактори, мікрохвильове печення, відеокамери, магнітофони, автомобільні кондиціонери істотно змінили характер нашої роботи і дозволили протягом останніх двадцяти років. Науково-технічний прогрес, визнаний у всьому світі як найважливіший чинник економічного зростання, все частіше і в західній, і в вітчизняній зняній літературі зв'язується з поняттям інноваційного процесу. Це, як справедливо відмітив американський економіст Джеймс Брайт, єдиний в своєму роді процес, об'єднуючий науку, техніку, економіку, підприємництво і управління. Він перебуває в отриманні нового продукту і тягнеться від зародження ідеї до її комерційної реалізації, охоплюючи таким чином весь комплекс відносин: виробництва, обміну, споживання. У цих обставинах інновація спочатку націлена на практичний комерційний результат. Сама ідея, що дає поштовх, має меркантильний зміст: це вже не результат "чистої науки", отриманий університетським вченим у вільному, нічим не обмеженому творчому пошуку. У практичній спрямованості інноваційної ідеї і перебуває її приваблива сила для підприємств, що працюють у ринковій економіці. Потенційні можливості розвитку та ефективності виробництва визначаються передовсім науково-технічним прогресом, його темпами і соціально-економічними результатами. Що цілеспрямованіше та ефективніше використовуються новітні досягнення науки і техніки, котрі є першоджерелами розвитку продуктивних сил, то успішніше вирішуються пріоритетні (щодо виробничих) соціальні завдання життєдіяльності суспільства. Науково-технічний прогрес (НТП) у буквальному розумінні означає безперервний взаємозумовлений процес розвитку науки і техніки; у ширшому суттєво-змістовому значенні – це постійний процес створення нових і вдосконалення застосовуваних технологій, засобів виробництва і кінцевої продукції з використанням досягнень науки. НТП можна тлумачити також як процес нагромадження та практичної реалізації нових наукових і технічних знань, цілісну циклічну систему «наука – техніка – виробництво», що охоплює кілька стадій: фундаментальні теоретичні дослідження; прикладні науково-дослідні роботи; дослідно-конструкторські розробки; освоєння технічних нововведень; нарощування виробництва нової техніки до потрібного обсягу, її застосування (експлуатація) протягом певного часу; техніко-економічне, екологічне й соціальне старіння виробів, їхня постійна заміна новими, ефективнішими зразками. НТП властиві еволюційні (зв'язані з накопиченням кількісних змін) та революційні (зумовлені стрибкоподібними якісними змінами) форми вдосконалення технологічних методів і засобів виробництва, кінцевої продукції. До еволюційних форм НТП відносять поліпшення окремих техніко-експлуатаційних параметрів виробів чи технології їхнього виготовлення, модернізацію або створення нових моделей машин, обладнання, приладів і матеріалів у межах того самого покоління техніки, а дореволюційних. – зміну поколінь техніки й кінцевої продукції, виникнення принципово нових науково-технічних ідей, загально-технічні (науково-технічні) революції, у процесі яких здійснюється масовий перехід до нових поколінь техніки в провідних галузях виробництва. Науково-технічна революція (НТР) відбиває докорінну якісну трансформацію суспільного розвитку на засаді новітніх наукових відкриттів (винаходів), що справляють революціонізуючий вплив на зміну знарядь і

предметів ізуючий вплив на зміну знарядь і предметів праці, технології, організації та управління виробництвом, характер трудової діяльності людей. Зміст сучасної НТР найбільш повно розкривається через її особливості, зокрема:

- перетворення науки на безпосередню продуктивну силу (втілення наукових знань у людині, технології і техніці; безпосередній вплив науки на матеріальне виробництво та інші сфери діяльності суспільства);

- новий етап суспільного поділу праці, зв'язаний з перетворенням науки на провідну царину економічної і соціальної діяльності, що набирає масового характеру (наука перебрала на себе найбільш революціонізуючу, активну роль у розвитку суспільства; сама практика потребує випереджаючого розвитку науки, оскільки виробництво все більше стає технологічним утіленням останньої);

- прискорення темпів розвитку сучасної науки і техніки, що підтверджується скороченням проміжку часу від наукового відкриття до його практичного використання;

- інтеграція багатьох галузей науки, самої науки з виробництвом з метою прискорення й підвищення ефективності всіх сучасних напрямків науково-технічного прогресу;

- якісне перетворення всіх елементів процесу виробництва – засобів праці (революція в робочих машинах, поява керуючих машин, перехід до автоматизованого виробництва), предметів праці (створення нових матеріалів з наперед заданими властивостями; використання нових, потенційно невичерпних джерел енергії), самої праці (трансформація її характеру та змісту, збільшення в ній частки творчості).

Будь-яке відкриття нових фізичних законів негайно приводить до використання їх у розвитку інших наук і техніки. А це у свою чергу приводить до нових відкриттів у фундаментальній фізиці. У такий спосіб науково-технічний прогрес не можливо зупинити. Розвиток фізики приніс не тільки фундаментальні зміни в уявленні про матеріальний світ, але також через засоби технологій, які засновуються на лабораторних відкриттях, зміни в суспільстві. Завдяки розвитку науки техніки люди на планеті Земля стали жити під одним дахом і в єдиному інформаційному просторі. Тепер уже не здається, що земля нескінченно велика і на її поверхні й у її надрах можна робити що завгодно. Необдумані дії людини, збройного досягненнями тієї ж самої науки техніки, приводять до необоротних руйнівних наслідків для природи і самої людини. Злий розум звертає нові відкриття проти самого себе. Наш світ малий і крихко. Одним натисканням кнопки можна знищити все живе на землі.



## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### Основна

1. Бобильов Ю.П. Концепції сучасного природознавства [Електронний документ]. – Режим доступа :  
[http://pidruchniki.ws/17810409/prirodoznavstvo/kontseptsiiyi\\_suchasnogo\\_prirodoznavstva\\_-\\_bobilov\\_yup](http://pidruchniki.ws/17810409/prirodoznavstvo/kontseptsiiyi_suchasnogo_prirodoznavstva_-_bobilov_yup)
2. Бочкарев А.И. Концепции современного естествознания / А.И. Бочкарев, Т.С. Бочкарева, С.В. Саксонов. – Тольятти : ТГУС, 2008. – 386 с.
3. Гусейханов М.К. Концепции современного естествознания / М.К. Гусейханов, О.Р. Раджабов. – М. : Дашков и К°, 2007. — 540 с.
4. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания / Т.Я. Дубнищева. – М. : Академия, 2011. – 352 с.
5. Карпенков С.Х. Основные концепции естествознания / С.Х. Карпенков. – М. : Высш. шк., 2003. – 488 с.
6. Концепции современного естествознания : учеб. пособие для бакалавров / А. А. Горелов. – М. : ИД Юрайт, 2012. – 347 с.
7. Концепции современного естествознания: учебник / С. Лебедев. – М. : Юрайт, 2011. – 341 с.
8. Концепции современного естествознания / В.Н. Лавриненко, В.П. Ратников. – М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2006. – 317 с.
9. Концепции современного естествознания / Л.А. Михайлова. – СПб. : Питер, 2008. – 336 с.
10. Концепции современного естествознания / В.М. Найдыш. – М. : Альфа-М; ИНФРА-М, 2004. – 622 с.
11. Кшнякіна, С.І. Концепції сучасного природознавства [Текст] : навч. посіб. У 3-х ч. Ч.1 / С.І. Кшнякіна, Б.А. Міщенко, А.С. Опанасюк. - Суми : СумДУ, 2009. - 77 с.
12. Основы современного естествознания: в 3 ч. / А.Я. Исаков. – Петропавловск-Камчатский : КамчатГТУ, 2012. – Ч.1 – 302 с., Ч.2 – 274 с., Ч.3 – 336 с.
13. Садохин А.П. Концепции современного естествознания / А.П.Садохин. –М. : ЮНИТИ-ДАНА, 2006. – 447 с.
14. Філін С.П. Концепції сучасного природознавства: конспект лекцій [Електронний документ]. – Режим доступа :  
[http://ua-referat.com/Концепції\\_сучасного\\_природознавства\\_Конспект\\_лекцій\\_Філін](http://ua-referat.com/Концепції_сучасного_природознавства_Конспект_лекцій_Філін)

### Додаткова

1. Вернадский В.И. Живое вещество и биосфера / В.И. Вернадский. - М. : Наука, 1994. - 669 с.
2. Капица С.П. Синергетика и прогнозы будущего / С.П. Капица, С.П. Курдюмов, Г.Г. Малинецкий. – М., 1997. – 154 с.
3. Князева Е.Н. Законы эволюции и самоорганизации сложных систем / Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов. - М. : Наука, 1994. - 229 с.
4. Небел Б. Наука об окружающей среде. Как устроен мир : учебник : в 2 т. / Б. Небел. – М. : Мир, 1993. – Т. 2. – 328 с.
5. Моисеев Н.Н. Идеи естествознания и общественные науки / Н.Н. Моисеев. - М. : ВЦ РАН, 1991. - 55 с.
6. Пригожин И. Время, хаос и квант : К решению парадокса времени / И. Пригожин,

- И. Стенгерс. - М. : Прогресс, 1994. - 265 с.
7. Резник С. Как устроен мир // Химия и жизнь. - 1993.- № 9. - С. 14-21.
  8. Степин В.С. Научная картина мира в культуре техногенной цивилизации / В.С. Степин, Л.Ф. Кузнецова. – М. : Ин-т философии РАН, 1994. – 274 с.
  9. Хокинг С. От большого взрыва до черных дыр : краткая история времени / С. Хокинг. – М. : Мир, 1990. – 166 с.
  10. Чижевский А.Л. Космический пульс жизни / А.Л. Чижевский. – М. : Мысль, 1995. – 766 с.
  11. Шредингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физики / Э. Шредингер. – М. : Атомиздат, 1972. – 88 с.
  12. Шрейдер Ю.А. Эволюция и сотворение мира / Химия и жизнь. - 1993.- № 1. - С. 22-27.
  13. Эйнштейн А. Эволюция физики / А. Эйнштейн, Л. Инфельд. - М. : Молодая гвардия, 1966. - 267 с.
  14. Яблоков А.В. Эволюционное учение / А.В. Яблоков, А.Г. Юсуфов. – М. : Высшая школа, 1981. – 343 с.