

УДК 372.853

С. Ф. Лягушин,
кандидат фізико-математичних наук, доцент
О. Й. Соколовський,
доктор фізико-математичних наук, професор
(Дніпропетровський державний університет ім. Олеся Гончара)
lyagush.new@gmail.com

НЕОБХІДНІСТЬ І МОЖЛИВІСТЬ ОЗНАЙОМЛЕННЯ ШКОЛЯРІВ ІЗ БАЗОВИМИ ІДЕЯМИ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ

Анотація

Обґрунтовується необхідність включення до шкільного курсу фізики елементів знань із теоретичної фізики, зокрема базових уявлень статистичної фізики в тісному зв'язку з основами квантового опису речовини. Опанування цього матеріалу педагогами й учнями буде потужним чинником зростання компетентності молоді в роботі з сучасною технікою, залучення її до нанотехнологій. Проаналізовано доступність відповідних положень для студентів і школярів, запропоновано схему їх викладу та адекватний математичний апарат.

Ключові слова: дедуктивний підхід, імовірність стану, макростан, хвильова функція, бозони, ферміони.

Summary

The necessity of including knowledge elements in theoretical physics, in particular the basic conceptions of statistical physics in close connection with the foundations of the quantum description of matter, into the school course of physics is substantiated. Mastering this material by educators and students will be a powerful factor in the growth of youth competence in working with modern technology, involving it in the field of nanotechnology. The accessibility of corresponding ideas for students and pupils is analyzed, a scheme of their presentation and an adequate mathematical apparatus are offered.

Key words: deductive approach, state probability, macrostate, wave function, bosons, fermions.

Постановка проблеми. Людство використовує у виробництві та побуті численні досягнення науки та техніки. Нас оточують прилади, створення яких стало можливим завдяки революції у фізиці, що в минулому столітті дозволила глибоко розібратись у структурі матерії, знайти нові джерела енергії та способи обробки інформації. При цьому пересічна людина не обізнана в суті явищ, які працюють у техніці, і розрив між практикою та розумінням у користувачів поглиблюється. Країни, які прагнуть бути в авангарді науково-технічного прогресу, приділяють велику увагу освіті широких верств населення, щоб забезпечити готовність до роботи з новітніми досягненнями і щоб не втрачати потенційних рушіїв прогресу. Для України все це надзвичайно актуально. Нам слід забезпечити гідну компетентність випускників шкіл у природничій сфері в несприятливих соціально-економічних умовах і за стійкої тенденції скорочення аудиторних годин на базові природничі дисципліни. Сучасна педагогіка потребує інноваційного підходу щодо розподілу часу і збагачення сучасним матеріалом. Можна стверджувати, що більше місця має займати фізика, де домінує розуміння над описом, і значну роль повинна відігравати частина курсу з дедуктивною побудовою, характерною для теоретичної фізики. Це ефективний шлях до швидкого прилучення школярів

до сучасної науки. Стаття ілюструє його на прикладі пояснення властивостей конденсованих систем, у тому числі квантових.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Педагогічні дослідження традиційно торкаються питань змісту курсів. Результат процесу – нормативні документи, ми будемо посилатись на програму для старшої школи академічного рівня, який дає можливість продовження вивчення фізики як навчальної дисципліни в усіх ВНЗ і є основою для ЗНО [11]. Сучасна фізика в ній наявна, але проблематично очікувати достатнього ознайомлення учнів із питаннями, окресленими одним терміном. Потреба сформулювати в доступній формі відповідні поняття відбилася в роботах проф. Б.Суся із співавторами [16], В. Фоменка [12]. Ці праці спираються на підходи теоретичної фізики. Роботи І. Мороза та його учнів [9; 10] спрямовані на розробку і впровадження в шкільну програму знань, необхідних для розуміння нанотехнологій. Тему про ознайомлення учнів із сучасними технологіями розвиває також О. Орлянський [8].

Мета статті – обґрунтувати доцільність ознайомлення школярів із базовими поняттями статистичної фізики; дати приклад доступного та короткого викладу цього матеріалу в рамках дедуктивного підходу; розкрити додаткові можливості, пов'язані з використанням поняття ймовірності, для більш сучасного прилучення молоді до квантової теорії, у тому числі до квантової теорії багаточастинкових систем і конденсованого стану, що відкриває шлях до розуміння суті колективних квантових явищ.

Виклад основного матеріалу. Традиційна побудова шкільного курсу відповідає структурі курсу загальної фізики ВНЗ, тобто має індуктивний характер: від явища до закону. Ми не торкаємося тут проблем перерозподілу матеріалу, викликаного розмежуванням основної та старшої школи, бо прагнення підводити слухачів від простих експериментів до фундаментальних законів природи зберігається в сучасних програмах [11]. Це мудро і правильно, але не може не викликати напруженого ресурсу часу: в рамках одного курсу діти і спостерігають зіткнення візочків, і слухають інформацію про квантові властивості світла та елементарні частинки. Спроби відтворити історичний шлях формування сучасної (XXI сторіччя) фізичної картини світу нереальні, бо "Історія фізики" – то інша дисципліна, а накопичений матеріал і глибина розуміння протягом століття зазнали фантастичних змін. Студенти, які отримують фізичну освіту, мають розв'язання проблеми нестачі часу у вигляді курсу теоретичної фізики, де проводиться дедуктивний підхід: від загальних закономірностей і понять до їх математичних наслідків. Загалом слухачі вже знають на простих прикладах, як людство проходило шлях до фундаментальних законів, а тепер можуть займатися сучасною фізикою, базуючись на встановленому методі опису матерії та розвиненому математичному апараті. Дедуктивна фаза певною мірою простіша: часто викладачі курсів молекулярної фізики та атомної фізики підмінюють їх, відповідно, адаптованими курсами статистичної фізики та нерелятивістської квантової механіки. Щоправда, тут потрібен адекватний математичний апарат, але сам по собі він не викликає заперечень: рівняння в частинних похідних, векторний аналіз тощо доступні студентів за бажання. Сучасне формальне мислення, притаманне молоді [5], дозволяє не боятися математики, а спиратися на неї. Допомога потрібна в тлумаченні математичних наслідків побудованих рівнянь!

Змісту статистичної фізики як розділу теоретичного курсу в загальній фізиці відповідає молекулярна фізика. Аналіз цього кола явищ став основою для створення теорії багаточастинкових систем, що базується на ймовірнісному підході. У програмі [11] від ідей сучасної статистичної фізики залишилися слова “молекулярно-кінетична теорія будови речовини” і “статистичний і термодинамічний підходи”. Цілком змістовний підручник С. Гончаренка для 10-го класу відповідає програмі й дає зручну практичну вказівку стосовно поняття температури [4, 28]: “Досліди і розрахунки показують, що середня кінетична енергія молекул \overline{E}_k пропорційна абсолютній температурі газу T . У випадку ідеального газу зв'язок між цими величинами

виражається формулою $\overline{E}_k = \frac{mv^2}{2} = \frac{3}{2}kT$ ”. Звичайно, навіть якщо ігнорувати

неточності, цитата свідчить про те, що розуміння тут підміняється формулою. Ні про які розподіли, ймовірності не йдеться. Потім підручник докладно описує явища в конденсованих середовищах, залишаючись у межах класичних моделей. Обсяг інформації величезний, а ключ до аналізу поведінки багаточастинкових систем залишається прихованим! Революційний і досі, на погляд авторів, неперевершений підручник Б. Яворського і А. Пінського [13] дає уявлення про розподіл Максвелла (аналіз його використовується для встановлення зв'язку температури та середньої кінетичної енергії молекул), про барометричний розподіл, про ентропію та 2-й закон термодинаміки. Наш досвід викладання показує, що для студентів стає проблемою розуміння статистичних розподілів як таких. Тим паче, що розподіл Максвелла на молодших курсах знову ж таки підноситься як експериментальний факт. Отже, що можна сказати школярам про статистичний підхід з метою підвищення їх компетентності в сприйнятті інформації про системи, які складаються з величезної кількості частинок і потребують статистичного розгляду?

Будемо йти від схеми викладу матеріалу в теоретичній фізиці. За традиціями школи М. Боголюбова [1; 6], виклад теорії багаточастинкових систем у феноменологічному підході передує викладу статистичної механіки. Далі, виходячи з реальної експериментальної ситуації, стверджується, що вимірювані характеристики системи є усереднення істинних мікроскопічних значень (зі внеском усіх мікроскопічних об'єктів) протягом часу вимірювання. Наступний крок – це твердження, що мікростан системи, який визначається сукупністю станів окремих мікроскопічних об'єктів, у кожний певний момент залишається невідомим, оскільки кількість можливих мікростанів величезна навіть порівняно з кількістю частинок у системі, і перехід між станами відбувається надзвичайно швидко. У той же час для нас має значення макростан системи, який визначається лише кількома макроскопічними параметрами (для спрощення спочатку говоримо про однорідну систему). Відтак одному макростану відповідає гігантська кількість мікростанів, і стежити за реальною еволюцією системи – завдання нереальне. Отут і використовується статистичний (ймовірнісний) підхід, який дозволяє обчислювати фізичні характеристики макросистем (термодинамічні характеристики), виходячи з уявлень про їх мікроустрій. Стверджується, що у фіксованому (значеннями термодинамічних параметрів) макростані кожний мікростан має певну ймовірність, і оскільки ці стани змінюються неймовірно

швидко, можна вважати, що система перебуває протягом вимірювання в кожному з них частину часу, пропорційну ймовірності стану. А тому можна замінити усереднення за часом усередненням за сукупністю мікростанів – і очікувати, що отримаємо правильний результат. Традиційне формулювання: “Середнє за часом дорівнює середньому за ансамблем” (мається на увазі ансамбль Гіббса – сукупність копій системи, які реалізують її макростан, зараз зручніше просто користуватися поняттям імовірності). Це твердження, за [6, 20], зветься ергодичною гіпотезою й дає можливість застосовувати теорію ймовірностей до вивчення характеристик систем, що складаються з великої кількості частинок. Чинність усіх припущень перевіряється відповідністю висновків статистичної теорії результатам феноменологічної термодинаміки, яка підтверджується всією практикою людства. Традиційно спочатку розглядаються рівноважні, більш того, однорідні системи. Перехід до систем у зовнішньому полі, систем поза рівновагою вимагає, звичайно, додаткових зусиль [14], але розглянута схема залишається в основі. Як бачимо, макростан статистичної системи задається сукупністю ймовірностей мікростанів. Для класичних систем існує зручний графічний образ: рух “фазової рідини” у фазовому просторі. Звичайно, ми не йшли зараз за схемою індуктивної побудови шкільної фізики, а просто розповіли про результати багаторічних досліджень і математичний алгоритм отримання результату. Але ж сторінки тексту вистачило для прозорого ознайомлення читача із сутністю статистичного підходу в фізиці. Для сприйняття це не складніше за опис механізмів провідності в різних середовищах, а за значенням у науці – це один із головних проривів на фронті пізнання, з яким варто знайомити школярів.

У курсі теоретичної фізики показують, як на основі відомих розподілів розв’язується основна задача статистичної фізики – знаходження макроскопічних характеристик за мікроскопічними. Приходимо до формалізмів Гіббса [7]. Основоположене припущення – це постулат про рівноймовірність станів ізольованої системи, які реалізують її макростан: їх енергії E_n лежать у фіксованому інтервалі значень поблизу від відомого значення внутрішньої енергії \mathcal{E} макростану, що розглядається. Обґрунтовується, що в отриманому

мікроканонічному розподілі $W_n = \frac{\Delta(\mathcal{E} - E_n)}{\Gamma}$ статистична вага макростану Γ ,

яку можна обчислити з мікроскопічних міркувань, пов’язана з ентропією S простою формулою $S = k \ln \Gamma$ (тут k – стала Больцмана), причому S виражається через макропараметри, в яких вона є характеристична функція [1]. Для системи в термостаті, яким фіксується певна температура T ,

доводиться чинність канонічного розподілу Гіббса $W_n = e^{\frac{F - E_n}{kT}}$, де F є вільна енергія. З вимоги нормування суми всіх імовірностей на 1 вільна енергія N -частинкової системи може бути обчислена як $F = -kT \ln Z_N$, а статистична

сума $Z_N = \sum_n e^{\frac{E_n}{kT}}$ визначається мікроскопічними характеристиками системи, і

F – функція змінних, які роблять її характеристичною функцією. Нарешті великий канонічний формалізм Гіббса слід застосовувати до систем, які можуть обмінюватися з термостатом також частинками. Великий канонічний

розподіл має такий вигляд $W_{Nn} = e^{\frac{\Omega - E_{Nn} + \mu N}{kT}}$, причому індекс n нумерує стани при кожному значенні кількості частинок N , а основна формула – це вираз для великого термодинамічного потенціалу Гіббса $\Omega = -kT \ln Z$, де велика статистична сума $Z = \sum_{Nn} e^{\frac{E_{Nn} - \mu N}{kT}}$, для її побудови слід перебрати всі мікростани системи з уявними стінками.

Зауважимо, що в попередніх абзацах ми постійно використовували поняття ймовірності, тобто розглядали дискретні стани. Це виконується для квантових систем, що здійснюють фінітний рух [3, 128], і застосовується до квантових термодинамічних систем. Стани класичних систем змінюються неперервно і доводиться працювати з поняттям густини ймовірності. Виходить, що загальні ідеї легше продемонструвати на квантових системах! Сутність статистичного підходу зберігається, а запровадження густини ймовірності в курсі для школярів потребує додаткових зусиль та аналізу.

Базові ідеї статистичної фізики, поняття мікростану та макростану, які ми розглянули, відкривають можливість раніше і змістовніше зачепити питання сучасної теорії твердого тіла, процесів у ньому. Шкільні курси розглядають явища в напівпровідниках, згадують про надпровідність. У відповідних місцях гостро відчувається потреба в квантових уявленнях для пояснень. Але за програмою прилучення школярів до квантової теорії передбачене лише в кінці курсу в частинах “Хвильова і квантова оптика” й “Атомна і ядерна фізика”. На наш погляд, тут назріли суттєві зміни. Термін “квантова оптика” не дуже доречний, радше йдеться про квантові властивості світла. Ознайомлення з ними доречне, але ідея кванта, квантово-хвильовий дуалізм – це нині історія фізики. Пояснювати суть квантового опису матерії слід на прикладі частинки без спіну, як роблять у всіх курсах квантової механіки. Індуктивний підхід із використанням світла як основи зазнає тут фіаско: реально світло – об’єкт релятивістський і статистичний, на ньому пояснення для початківця зводиться до повторення слів про дуалізм. А в заключному розділі курсу знайомство з квантовою теорією обмежується постулатами Бора (в рік, коли відзначається 90-річчя послідовної квантової теорії!). Звичайно, послідовний виклад квантової теорії знаходиться за межами можливості школи, але імовірна картина станів, про яку ми сказали в “Молекулярній фізиці і термодинаміці”, може дати стартовий майданчик для просування на цьому напрямку.

Школярам можна пояснити, що у мікросвіті вимірювання певної фізичної величини в тому ж самому стані системи може давати зовсім різні результати, що у квантової частинки не може бути одночасно фіксованих значень координати й імпульсу, а відтак – траєкторії (принцип невизначеності Гайзенберґа). І пояснити це можна, тільки якщо вважати, що частинка “розмазана” у просторі. Її стан описується хвильовою функцією, квадрат модуля якої дає густину ймовірності знайти частинку у відповідній області простору. Щоправда, зараз комплексні числа невідомі багатьом школярам. Однак сам зоровий образ допоможе формуванню правильних поглядів. Малюнки з електронними хмаринками широко використовуються в курсі хімії. Складніші побудови поки що не актуальні. Для підтримання традицій шкільної фізики тут можна згадати про досліди Девіссона та Джермера [3, 27] з

дифракції електронів, які переконливо говорять про хвильову природу частинок. Але шлях звідси має вести не до еклектичного “корпускулярно-хвильового дуалізму”, а до польової концепції матерії.

На наш погляд, тепер можна поміркувати, якими корисними та цікавими речами може збагатити шкільний курс запропоноване ознайомлення учнів із базовими ідеями статистичної фізики та квантової теорії. По-перше, в молекулярній фізиці з’являється розуміння температури не тільки як певного емпіричного параметра, а й у якості певної характеристики розподілу частинок за енергіями в рівноважному стані в термостаті, природа розподілів Максвелла та Больцмана стає зрозумілою. По-друге, коли ми говоримо про провідність металів і напівпровідників, можна уявляти, що частинки, які переносять заряд, колективізовані в кристалі й реальне пояснення ефектів дає зонна теорія твердого тіла. По-третє, ми можемо помітити, що відсутність траєкторії у квантових частинок робить їх однаковість більш глибокою, що має цікаві наслідки для теорії квантових ідеальних газів. Ми не можемо перенумерувати ці частинки, і максимум інформації про стан такої квантової системи – це дані про кількість частинок, які перебувають у певних дозволених одночастинкових станах. Виявляється, що для отримання термодинамічних характеристик квантового ідеального газу плідним виявляється великий канонічний формалізм Гіббса, бо перебір усіх можливих станів системи зводиться до перебору всіх можливих кількостей частинок у кожному з одночастинкових станів без обмежень. А оскільки стан частинки описується хвильовою функцією, слід брати до уваги властивості багаточастинкової функції відносно перестановок окремих частинок. Є тільки два варіанти: при перестановці хвильова функція не змінюється або змінює знак на протилежний. У першому випадку у будь-якому стані може знаходитись довільна кількість частинок (випадок Бозе–Айнштейна), у другому – в кожному стані може знаходитись не більше однієї частинки (статистика Фермі–Дірака). Для докладнішого розгляду слід згадати про можливі відмінності між станами, пов’язані з наявністю внутрішньої структури – спіну. Як бачимо, статистичні характеристики елементарних частинок дозволяють їх поділ на бозони та ферміони незалежно від подальшої класифікації, про яку йдеться в заключному розділі курсу фізики. Бозони при низьких температурах накопичуються в найнижчому за енергією стані, утворюючи бозе-айнштейнівський конденсат, ферміони щільно заповнюють енергетичні рівні, найближчі до найнижчого. У слабо неідеальному бозе-газі виявляється енергетично невигідним випадіння частинки з бозе-конденсату при його сукупному русі, що породжує явище надплинності [2, 298]. Подібне явище для куперівських пар електронів (ферміонів) [2, 4] – це надпровідність.

Зараз у техніці активно впроваджуються пристрої з розмірами, співрозмірними з окремим атомом (нанометри), розглядаються процеси, в яких бере участь окремий фотон. На відповідних просторово-часових масштабах адекватний опис фізичних процесів забезпечує квантова теорія. Не тільки загальна картина базується на уявленнях квантової статистичної фізики, а й аналіз роботи окремих елементів може тепер потребувати квантового підходу [15]. І не тільки розробка таких пристроїв, а й робота в ролі користувачів вимагають певної обізнаності з законами мікросвіту.

Висновки. Автори вважають доведеною потребу суспільства в

удосконаленні курсу фізики загальноосвітньої школи. Магістральний шлях до викладу новітньої інформації – розширення дедуктивної частини курсу, яка базується на теоретичній фізиці. Навіть поверхове знайомство з основами статистичної фізики та квантової механіки дозволило суттєво наблизитись до розуміння явищ, які ввійшли до переліку найбільших відкриттів у фізиці, й можуть мати серйозне практичне застосування. Осучаснення шкільного курсу, яке ми пропонуємо почати з елементів статистичної фізики, розширить коло учнів, готових вивчати, експлуатувати та розвивати техніку епохи нанотехнологій.

Перспективи подальших пошуків у напрямі дослідження. Потрібні детальні методичні розробки питань, окреслених у статті. Серйозна проблема – узгодження питань викладання фізики та математики, наближення елементів теорії ймовірностей і комбінаторики до потреб наших курсів. Критичного аналізу потребує весь математичний апарат, яким озброюють учнів. Зокрема, доречним здається повернення до шкільного курсу комплексних чисел. Опрацювання з точки зору використовуваних методів обчислень потребує інформація про нанотехнології.

ЛІТЕРАТУРА

1. Базаров И.П. Термодинамика и статистическая физика. Теория равновесных систем / И.П. Базаров, Э.В. Геворкян, П.Н. Николаев. – М.: Изд-во МГУ, 1986. – 312 с.
2. Боголюбов Н.Н. Введение в квантовую статистическую механику / Н.Н. Боголюбов, Н.Н. Боголюбов (мл.). – М.: Наука, 1984. – 384 с.
3. Вакарчук І.О. Квантова механіка: підручник / І.О. Вакарчук. – 4-те вид., доп. – Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 2012. – 872 с.
4. Гончаренко С.У. Фізика: підруч. для 10 кл. серед. загальноосв. шк. – К.: Освіта, 2002. – 319 с.
5. Горев В.М. Сучасний математичний апарат у курсі шкільної фізики як засіб підвищення компетентності учнів / В.М. Горев, С.Ф. Лягушин, О.Й. Соколовський // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету ім. Т.Г. Шевченка. Вип. 146. Серія: "Педагогічні науки". – Чернігів: ЧНПУ, 2017. – С. 125–128.
6. Квасников И.А. Термодинамика и статистическая физика. Т. 2: Теория равновесных систем: Статистическая физика: Учебное пособие / И.А. Квасников. – Изд 2-е, суц. перераб. и доп. – М.: Едиторал УРСС. 2002 – 432 с.
7. Лягушин С.Ф. Статистична фізика в руслі проблемного підходу / С.Ф. Лягушин, О.Й. Соколовський // Теорія та методика навчання математики, фізики, інформатики: зб. наук. праць. Вип VIII. Том 2. Кривий Ріг: Видавничий відділ НметАУ, 2010. – С. 203–209.
8. Орлянський О.Ю. Сучасні технології у фізичній освіті як базова складова освіти в цілому / О.Ю. Орлянський // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету ім. Т.Г. Шевченка. Вип. 146. Серія: "Педагогічні науки". – Чернігів: ЧНПУ, 2017. – С. 162–166.
9. Стадник О.Д. Розвиток наоосвіти – один із чинників забезпечення переходу на шостий технологічний уклад / О.Д. Стадник, І.О. Мороз // Нанотехнології в освітній галузі: [монографія] / за заг. ред. І.О. Мороза. – Суми: Вид-во СумДПУ ім. А.С. Макаренка, 2016. С. 16–22.
10. Ткаченко Ю.А. Компетентнісний підхід до викладання основ нанотехнологій / Ю.А. Ткаченко, І.О. Мороз // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету ім. Т.Г. Шевченка. Вип. 146. Серія: "Педагогічні науки". – Чернігів: ЧНПУ, 2017. – С. 192–195.
11. Фізика. 10-11 класи. Пояснювальна записка. [Електронний ресурс] – <http://mon.gov.ua/activity/education/zagalna-serednya/navchalni-programy.html>.
12. Фоменко В.В. Відображення фундаментальних фізичних властивостей природи в курсі загальної фізики на ґрунті ідеальних навчальних фізичних моделей / В.В. Фоменко // Вісник Чернігівського національного педагогічного університету ім. Т.Г. Шевченка. Вип. 146. Серія: "Педагогічні науки". – Чернігів: ЧНПУ, 2017. – С. 108–111.
13. Яворский Б.М. Основы физики. Том 1 / Б.М. Яворский, А.А. Пинский. – М.: Наука, 1969. – 456 с.

14. Haponenko K.M. Non-equilibrium Gibbs thermodynamic potential of a magnetic system / K.M. Haponenko, A.I. Sokolovsky // Visnyk Dnipropetrovs'kogo universytetu. Seria Fizyka, Radioelektronika. – 2016. – Vol. 24, Issue 23. – P. 45–52.

15. Lyagushyn S.F. Basic ideas of quantum mechanics of open systems in application to electron and optic processes / S.F. Lyagushyn, A.I. Sokolovsky, V.V. Yarliuk, S.A. Sokolovsky // 2017 IEEE First Ukrainian Conference on Electrical and Computer Engineering (May 29 – June 2, 2017, Kyiv, Ukraine) (UKRCON). Conference Proceedings. – ISBN 978-1-5090-3006-4/17. – P. 726–731.

16. Sus' B.A. Unusual interpretation of traditional physics problems. The 3rd scientific-methodological edition // B.A. Sus', B.B. Sus', O.B. Kravchenko. – Kyiv: PC "Prosvita", 2012. – 121 p.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2017