

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ЦЕНТР ДОСЛІДЖЕНЬ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ  
ТА ІСТОРІЇ НАУКИ ІМ. Г.М. ДОБРОВА

ЛИТВИНКО АЛЛА СТЕПАНІВНА

**СТАНОВЛЕННЯ  
СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ  
(30–40 рр. ХХ ст.)**

Київ-2009

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ЦЕНТР ДОСЛІДЖЕНЬ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ  
ТА ІСТОРІЇ НАУКИ ІМ. Г.М. ДОБРОВА

**Литвинко Алла Степанівна**

**СТАНОВЛЕННЯ  
СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ  
(30–40 рр. ХХ ст.)**

Київ  
Фенікс  
2009

УДК 53(477)(091)

ББК 22.3г(4Укр)

Л 64

Відповідальний редактор:

*Ю.О. Храмов*, доктор фізико-математичних наук, професор

Рецензенти:

*В.П. Олійник*, доктор фізико-математичних наук, професор;

*Л.М. Бесов*, доктор історичних наук, професор

Затверджено до друку вченою радою Центру досліджень науково-технічного потенціалу та історії науки ім. Г.М. Доброва НАН України (протокол № 1 від 8.01.2009)

**Литвинко А.С.**

Л 64 Становлення статистичної фізики в Україні (30–40 рр. XX ст.). — К: Фенікс, 2009. — 220 с.

ISBN 978-966-651-676-6

У монографії в контексті розвитку світової науки висвітлено передісторію та становлення в Україні в 30–40-х рр. XX ст. статистичної фізики як однієї з ключових галузей сучасної теоретичної фізики. На широкому фактичному матеріалі розглянуто місце статистичної фізики в системі наук та її значення для формування нового ймовірного стилю наукового мислення, обґрунтовано основні етапи еволюції даної галузі. Проаналізовано пріоритетні результати в галузі статистичної фізики, одержані вітчизняними вченими в наукових інститутах та університетах України.

Для науковців, студентів і аспірантів у галузі фізики, математики, історії науки.

**УДК 53(477)(091)**

**ББК 22.3г(4Укр)**

ISBN 978-966-651-676-6

© А.С.Литвинко, 2009

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
РОЗДІЛ 1. ПРЕДМЕТ ТА ЗАДАЧІ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ.....	45
РОЗДІЛ 2. СТАТИСТИЧНА ФІЗИКА ТА НАУКОВА КАРТИНА СВІТУ .....	55
РОЗДІЛ 3. КОРОТКИЙ НАРИС ІСТОРІЇ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В II ПОЛОВИНІ XIX–I ПОЛОВИНІ XX СТ. (СВІТОВИЙ КОНТЕКСТ) .....	73
3.1. Зародження ймовірнісних методів розгляду законів природи у 50–60-х рр. XIX ст. (А.Крґоніг, Дж.Максвелл) .....	73
3.2. Формування рівноважної статистичної фізики як синтез молекулярно-кінетичних та термодинамічних уявлень (кінець XIX – 20-ті рр. XX ст.) (Дж. Максвелл, Л.Больцман, Дж.Гіббс) .....	82
3.3. Проникнення квантових уявлень у статистичну фізику (1900–1925).....	88
РОЗДІЛ 4. ПЕРЕДІСТОРІЯ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ (XIX–20-ті рр. XX ст.) .....	95
4.1. Експериментальні передумови сприйняття статистичної фізики в Україні (М.П.Авенаріус, М.О.Умов, М.Д.Пильчиков, Ф.Н.Шведов).....	95
4.2. Перші теоретичні узагальнення ймовірнісних уявлень (М.М.Пирогов, М.Смолуховський, М.М.Шиллер, Т.О.Афанасьєва-Еренфест).....	109

РОЗДІЛ 5. СТАНОВЛЕННЯ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ (30–40 рр. ХХ ст.) .....	121
5.1. Формування нерівноважної статистичної фізики (світовий контекст) (30–40-і рр. ХХ ст.) .....	121
5.2. Л.Д.Ландау і початок систематичних досліджень у галузі статистичної фізики в Україні (30-і рр. ХХ ст.) .....	125
5.3. Розгортання широкомасштабних досліджень зі статистичної фізики в Україні .....	138
5.4. Побудова М.М.Боголюбовим мікроскопічної теорії надплинності (1947 рр.) .....	148
5.5. Створення теорії кристалізації та теорії будови рідин (В.І.Данилов, 30-ті рр. ХХ ст.) .....	154
5.6. Дослідження зі статистичної фізики в наукових інститутах та університетах в Україні (Харківський та Дніпропетровський фізико-технічні інститути, Інститут фізики, Інститут математики, Інститут металофізики, Харківський, Київський, Дніпропетровський, Львівський та Одеський університети) .....	165
Післямова .....	195
Список використаних джерел .....	198

## ВСТУП

Характеризуючи історико-фізичні дослідження в цілому, слід зазначити, що фізика є фундаментальною наукою сучасного природознавства, яка визначає його розвиток і відіграє важливу методологічну роль у сучасній науці та теорії пізнання.

Ґрунтовне вивчення фізики та її історії обумовлює формування механізмів строгого мислення та наукового світогляду, які забезпечують можливість подальшого професійного удосконалення фахівця, дозволяє поглибити розуміння фундаментальних наук та збільшити інтерес до них, побачити предмет дослідження в контексті світової науки, здійснити новий світоглядний синтез природничо-наукової, технічної та гуманітарної культур.

Світоглядне значення фундаментальних фізичних теорій завжди було та є предметом гострих і плідних дискусій. Серед таких теорій — статистична фізика, яка описує закономірності поведінки багаточастинкових систем у природі. Вона завжди була та залишається однією з ключових галузей сучасної теоретичної фізики, оскільки досліджує практично всі види матерії — тверді тіла, рідини та полімери, рідкокристалічні та міцелярні системи, електроліти, гази, плазму, макромолекули, важкі ядра. Статистична фізика вивчає специфічні закономірності макроскопічних систем, що складаються з дуже великого, практично незліченного числа однакових частинок (атомів, молекул, електронів, фотонів, квазічастинок), виходячи з властивостей цих частинок та взаємодії між ними. Такими системами, зокрема, є макроскопічні тіла, гази, кристали. Саме величезна кількість частинок обумовлює появу характерних закономірностей поведінки систем — статистичних законів, яким притаманний ймовірнісний характер. Ці закони взагалі неможливо звести до динамічних законів, оскільки вони стають незмістовними при переході до систем з малою кількістю частинок.

Головна задача статистичної фізики як мікроскопічної теорії полягає у визначенні макроскопічних характеристик системи через властивості частинок та взаємодій між ними, тобто вона надає метод дослідження співвідношень між мікроскопічним та макроскопічним рівнями опису дійсності. Для розв'язку задач статистичної фізики як теорії багаточастинкових систем використовуються методи теорії ймовірностей та опис елементів системи в рамках гамільтонова формалізму в  $6N$ -вимірному фазовому просторі. Тому важливими поняттями статистичної фізики є ймовірність, фазовий простір, функція розподілу ймовірностей, інтеграл станів, статистична вага.

До побудови статистичної механіки фізична картина світу, в основу якої покладена класична механіка, була заснована на понятті причинності, відповідно до якого можна, використовуючи формалізм диференціальних рівнянь, однозначно обчислити стан ізольованої системи в будь-який момент часу, якщо відомі початкові умови (лапласівський детермінізм). У статистичній фізиці поняття причинності набуло іншого тлумачення, оскільки явища природи розглядаються в ній як колективний процес — синтез множини елементарних явищ. Крім того, статистична фізика запровадила у фізику розуміння того, що необоротні процеси відіграють фундаментальну та конструктивну роль у фізичному світі. З часом виявилось, що ймовірнісна концепція, яка виникла при створенні статистичної механіки, є фундаментальною і покладена у саму природу речей. Це з'ясувалось після створення квантової механіки, закони якої передбачають принципову статистичність у поведінці мікрооб'єктів.

Діапазон явищ, які вивчає статистична фізика, надзвичайно широкий і охоплює поведінку матерії при низьких температурах у рідкому гелії, властивості високотемпературної плазми, агрегатні стани речовини, фазові переходи, електропровідність, теплоємність тіл, флуктуації, рух електронів у металах. Методи статистичної фізики застосовуються в молекулярній фізиці, фізиці твердого тіла, ядерній фізиці, радіофізиці, астрофізиці, оптиці, біофізиці, техніці. Наприклад, практичне значення статистичної радіофізики пов'язано з тим, що в системах радіолокації та радіозв'язку флуктуації грають важливу роль на всіх етапах передачі інформації. Статистичний підхід при розгляді взаємодії світла з речовиною привів до формування статистичної оптики, що стало важливим

для нових типів квантових джерел-лазерів та квантових підсилювачів, випромінювання яких має суттєво статистичні властивості, а також у задачах голографії та нелінійної оптики. В квантовій теорії поля важливими є флуктуації вакууму, пов'язані з можливістю народження та поглинання віртуальних частинок. У останні роки коло застосувань статистичної фізики продовжує розширюватись. Наприкінці ХХ століття як її далекоюсяжне узагальнення сформувалась нова міждисциплінарна галузь науки — синергетика (започаткована Г.Хакеном та І.Пригожиным), що вивчає самоорганізацію складних систем та перетворення хаосу на порядок. Її значення полягає у розгляді теми виникнення та еволюції Всесвіту, обґрунтуванні необоротності нелінійного світу. Основними ідеями синергетики, на основі яких формується тенденція щодо побудови глобального еволюційного синтезу в природознавстві, є рівноправність процесів еволюції та деградації; творча роль хаосу на шляху до порядку незалежно від характеру систем; розвиток через нестійкість системи; нелінійний характер еволюції більшості складних систем та наявність кількох варіантів їх розвитку; закономірність виникнення структур зростаючої складності; включення випадковості у механізм еволюції. До ключових результатів світового рівня тут слід віднести дослідження динамічного хаосу, які бурхливо розвиваються в останні десятиріччя та набувають застосувань у багатьох розділах науки і техніки, зокрема, в теорії хімічних реакцій, радіотехніці, фізиці плазми, теорії прискорювачів заряджених частинок тощо.

Проведене нами дослідження глибини наукової розробки історії становлення досліджень у галузі статистичної фізики в Україні в 30-40-ті рр. ХХ ст. показало, що дана тема недостатньо вивчена та висвітлена. Історіографічний аналіз дозволив систематизувати та критично оцінити використані джерела, виділити головне в сучасному стані вивчення теми та результатах попередників, виявити напрям дослідження, дати характеристику попередніх робіт з історії даної галузі та чітко з'ясувати питання, котрі залишились не розв'язаними.

Історіографія даної роботи охоплює джерела, що відображають історичні, біографічні та спеціально-професійні питання наукової діяльності. Зокрема, вони дають загальну характеристику та показують місце досліджуваної галузі в системі фізичних наук; класифікують основні напрями досліджень із статистичної фізики та висвітлюють стан їх роз-



робки з погляду світової науки; відображають різні підходи до викладення процесів зародження та розвитку ймовірнісних уявлень. Вибір джерельної бази було обумовлено темою та завданнями дослідження, при цьому передбачено також урахування як внутрішніх, так і зовнішніх чинників, що впливали на процес формування статистичної фізики в Україні в 30–40-х рр. ХХ ст. По-перше, комплексний аналіз становлення статистичної фізики в Україні передбачав узагальнення та систематизацію матеріалу щодо розвитку всіх напрямів статистичної фізики в світі в контексті загальної еволюції теоретичної фізики. По-друге, ґрунтовне дослідження генезису статистичної фізики в Україні обумовило необхідність розгляду її передісторії, тобто зародження у попередній щодо хронологічних рамок дослідження період, а також стану статистичної фізики на початок 30-х рр. ХХ ст. Нарешті, дослідження було б не повним без висвітлення загальних особливостей розвитку фізичного знання, зокрема, історії розвитку основних фізичних уявлень в Україні на тлі розвитку світової науки.

Щоб урахувати все вищевикладене, було опрацьовано значну кількість різноманітних джерел, як опублікованих, так і неопублікованих. Треба зазначити, що не всі вони увійшли до тексту монографії. Джерельна база даного історико-наукового дослідження складається, зокрема, з наукових монографій, наукових статей у періодичних наукових виданнях (журнали, збірники тощо), автобіографічної, меморіальної та історіографічної літератури, наукових звітів, архівних джерел. Робота з джерелами була спрямована перш за все на те, щоб одержати якомога більше наукових фактів, які стосуються досліджуваної проблеми. Слід зазначити, що науковим є не будь-який факт, а лише той, що віддзеркалює об'єктивні властивості речей і процесів, визначає закономірності явищ, слугує базою побудови теорій та формулювання законів. Тобто, науковий факт є новим знанням, яке повинно бути точним, об'єктивним та достовірним. У зв'язку з цим у роботі приділялась особлива увага достовірності вихідної наукової інформації.

- Усі джерела, які було розглянуто в даному дослідженні, можна класифікувати наступним чином:
- Історіографічна література з історії фізики
- Довідкові та енциклопедичні видання

- Література з історії розвитку наукових ідей, зокрема, огляди вчених щодо розвитку різних аспектів статистичної фізики, нобелівські лекції
- Література з історії розвитку наукових та освітніх установ
- Оригінальні праці вчених — статті, монографії
- Матеріали профільних конференцій
- Періодичні наукові видання
- Біографічна література, зокрема, ювілейні та меморіальні видання
- Матеріали документального характеру — звіти, протоколи засідань, нормативні документи, розпорядження, постанови тощо
- Дисертації за профілем роботи
- Архівні матеріали
- Наукове листування вчених
- Інтерв'ю та анкетування вчених, проведене автором.

Для відтворення повної та об'єктивної картини становлення статистичної фізики в Україні в 30–40 рр. ХХ ст. було проаналізовано роботи попередніх дослідників. Історіографічні праці, що прямо або опосередковано пов'язані з даною проблемою, подані за різними напрямками. Перш за все, це роботи з історії статистичної фізики та термодинаміки у світовому контексті або більш локального масштабу.

Висока значущість статистичної фізики для розвитку наукових знань зосередила увагу вчених-фізиків та істориків науки на процесах її формування та розвитку. Так, історія розвитку фундаментальних принципів статистичної фізики, її обґрунтування та ряд методологічних питань досліджувались у роботах С.Браша, Я.М.Гельфера, О.В.Кузнецової, Н.В.Вдовиченко, Б.Лавенди, Г.Я.Мякішева, І.П.Базарова, А.А.Гухмана, К.Каратеодорі.

Серед даних бібліографічних джерел перш за все слід зазначити фундаментальну монографію Я.М.Гельфера „Історія і методологія термодинаміки і статистичної фізики” [1], у якій досліджено питання виникнення та еволюції основних понять, принципів та методів термодинаміки і статистичної фізики, розглянуто загальні тенденції розвитку цих дисциплін як розділів сучасної теоретичної фізики, а також як методу дослідження явищ. Я.М.Гельфером висвітлено розвиток уявлень

про природу теплоти до відкриття законів збереження і перетворення енергії, а також формування феноменологічної термодинаміки та її синтез з молекулярно-кінетичною теорією, який виявився ключовим чинником для виникнення статистичної фізики. Особливо цікавими є розділи монографії, що стосуються застосування термодинамічних та статистичних методів для подальшого вивчення властивостей речовини та випромінювання — у теорії критичного стану, теорії електрики та магнетизму, електронній теорії, теорії теплового випромінювання. Показано вплив на статистичну фізику квантової гіпотези, значення створення квантових статистик, перш за все, для подальшого розвитку фізики твердого тіла. Монографія містить у собі також корисну хронологічну таблицю найважливіших подій в історії термодинаміки і статистичної фізики, яка, на жаль, обмежена 1955 роком.

Одним з ключових для статистичної фізики принципів є принцип причинності, з яким у філософському та методологічному плані глибоко пов'язані закони збереження. Ці закони є підґрунтям, на якому базується причинно-наслідковий зв'язок закономірностей природи, отже, вони стають логічним зв'язком між причиною і наслідком. Із законами збереження пов'язано введення у фізику ідей, які мають принципове значення, зокрема, статистичної ідеї. Так, закон збереження та перетворення енергії для теплових явищ заклав підґрунтя термодинаміки як науки, а закони збереження у мікросвіті обумовили статистичні закономірності систем мікрочастинок. Розвиток законів збереження в класичній та сучасній фізиці, їх наукове та методологічне значення на тлі історичного розвитку викладено в іншій історико-науковій монографії Я.М.Гельфера “Закони збереження” [2].

Питанням історії статистичної фізики багато уваги приділялось відомим істориком фізики С.Брашем, в численних роботах якого подано історію кінетичної теорії газів та атомістики [3–6].

За часів Радянського Союзу в Інституті природознавства і техніки (Москва) проводилися дослідження з історії науки. Сьогодні, зокрема, у секторі фізики, механіки та астрономії інституту (керівник професор Вл.П.Візгін) традиційно вивчаються питання історії фізики. Слід зазначити узагальнюючу працю цього колективу „Фізика XIX–XX ст. в загальнонауковому та соціокультурному контекстах. Фізика XIX століття” [7], в якій зроблено спробу поєднати традицій-

не викладення історії наукових ідей, методів та теорій з питаннями науково-дисциплінарної історії науки, яка враховує аспекти професіоналізації та інституалізації науки, тенденції розвитку системи наукової освіти, формування наукового співтовариства, особливості системи наукових комунікацій, соціокультурні обставини. Два розділи даної роботи, а саме, “Математика в класичній фізиці” (Вл.П.Візгін) та “Вчення про теплоту у XIX ст.: атомістика, термодинаміка і класична механіка” (О.В.Кузнецова) безпосередньо торкаються питань становлення статистичної фізики. Тут окреслено стан вчення про теплоту на початку XIX ст., обговорено працю Н.Карно (1824) “Роздуми про рушійну силу вогню та про машини, які здатні розвивати цю силу”, яка започаткувала термодинаміку як нову наукову дисципліну, описано відкриття першого та другого законів термодинаміки та дискусію на шляху побудови статистичного пояснення другого закону термодинаміки, вказано на важливе значення кінетичної теорії газів та молекулярно-кінетичних уявлень у цілому для побудови статистичної фізики, а також обґрунтовано етапний характер робіт Дж.Максвелла, Л.Больцмана та Дж.Гіббса для формування ймовірнісних уявлень у фізиці.

Важливими для розуміння ключових етапів формування даної галузі та значення для цього процесу атомістичних уявлень про будову речовини є монографії співробітників сектору фізики, механіки та астрономії Інституту історії природознавства і техніки РАН О.В.Кузнецової “Історія обґрунтування статистичної механіки” та “Атомістичні концепції будови речовини в XIX ст.”, а також Н.В.Вдовиченко “Розвиток фундаментальних принципів статистичної фізики у першій половині XX ст.” [8–10]. Остання монографія присвячена проблемі виникнення, сприйняття та розвитку статистичної концепції, а також перетворення її у розвинену теорію. Такий підхід є вдалою формою організації історичного матеріалу, який охоплює проблему обґрунтування статистичної механіки, броунівський рух, теорію теплового випромінювання, проблему питомої теплоємності, рівняння стану реальних газів. Однак, незважаючи на подані у назві хронологічні рамки, які охоплюють формування квантових уявлень, дослідження у монографії обмежено рамками чисто класичного підходу, а про квантові уявлення згадують подекуди.

Ґрунтовному огляду історії розвитку математичних методів у теоретичній фізиці у СРСР, зокрема, у статистичній механіці, присвячено два розділи, написані О.І.Ахієзером та А.В.Свідзинським, у 4 томі фундаментальної чотиритомної монографії “Історія вітчизняної математики” [11]. Тут вказано на фундаментальну роль у цій галузі робіт Л.Д.Ландау з теорії рідкого гелію, М.М.Боголюбова з теорії конденсації неідеального бозе-газу, О.С.Давидова з побудови теорії екситонів, І.М.Ліфшиця з теорії конденсованих систем, С.І.Пекара з відкриття та дослідження поляронів.

Ключові етапи розвитку статистичної механіки відображені й у низці наступних праць. Це, зокрема, стаття Е.Монтролла “До 100-річчя статистичної механіки” [12]. Методологічні проблеми статистичної фізики і термодинаміки показані у книзі І.П.Базарова [13] та монографії Г.Я.Мякішева “Від динаміки до статистики” [14], зміст базових постулатів термодинаміки обговорено у монографії А.А.Гухмана “Про основи термодинаміки” [15] та однойменній праці К.Каратеодорі [16], питанням ймовірнісного тлумачення законів природи присвячено книгу Б.Лавенди “Статистична фізика. Ймовірнісний підхід” [17], співвідношення динамічного та статистичного методів у теорії нерівноважних процесів розглядав Ю.А.Климонтович [18], зв’язок термодинаміки, статистики та інформації — Л.Бріллюен [19]. Добре ілюстровану монографію А.С.Ястржембського “Термодинаміка та історія її розвитку” [20] присвячено передусім історії технічних застосувань термодинаміки.

Для розбудови статистичної фізики важливим етапом стало формування атомістичних уявлень. Початковий етап зародження атомістичної ідеї в роботах давньогрецьких атомістів виклав А.О.Маковельський [21]. У цій праці автор показує наукову атомістичну методологію Демокріта та її застосування в логіці, математиці, космології, фізиці, біології, медицині, філософії, етиці. Важливо, що у книзі окремо подано приклади оригінальних джерел — частини творів, біографії, коментарі. Більш широко розвиток атомістичних уявлень у контексті генезису науки раннього та середнього еллінізму і часів Римської імперії у тісному зв’язку з філософськими, релігійними та іншими гуманітарними уявленнями тієї епохи висвітлено також у праці І.Д.Рожанського “Історія природознавства в епоху еллінізму та Римської імперії” [22]. Розвитку атомістичних

уявлень до початку XIX ст. присвячено монографію В.П.Зубова [23], атомістичній концепції будови речовини у XIX ст. — монографію О.В.Кузнецова [24], нарисам фізичної атомістики XX ст. — книгу Б.Г.Кузнецова [25], аналізу атомістичного підходу в цілому — тритомне втидання Б.М.Кедрова “Три аспекти атомістики” [26].

Історії виникнення та стану сучасної атомістики присвячена також стаття Д.Н.Трифоновна „Виникнення та розвиток сучасної атомістики” [27]. У ній обговорюються атомні моделі та перетворення, ставиться питання про межу існування атомних структур та явище періодичності. Показано, що сучасний комплекс атомістичних уявлень та ідей є результатом розвитку науки XX ст., продуктом фізичних теорій та експериментів. Висвітлено різницю класичної атомістики, яка розглядала елементи, що зустрічаються в Природі, та сучасної атомістики, що викликала до життя атомні різновиди, подекуди відсутні у природі, процес синтезу яких необхідно провести.

Деякі аспекти формування сучасних атомістичних уявлень викладені також у книгах О.І.Ахієзера та М.П.Рекало “Елементарні частинки” та О.І.Ахієзера та Ю.П.Степановського “Від квантів світла до кольорових кварків” [28,29], де викладено історію відкриття численних елементарних частинок, що характеризують дискретну структуру речовини. Розглядаються також властивості фундаментальних взаємодій, яким підпорядковані елементарні частинки та зв’язок цих взаємодій із симетріями, обговорюється проблема побудови єдиної схеми фундаментальних взаємодій — Великого синтезу, що пов’язана із загальним космологічним питанням виникнення Всесвіту. Корисною є подана у першій з монографій хронологія (1900–1990) основних відкриттів у галузі квантової фізики та фізики фундаментальних взаємодій, які визначають природу речовини.

Оглядовий характер сучасного стану ймовірнісних ідей має праця А.В.Рабиновича та М.І.Гапонова-Грехова “Нелінійна фізика. Стохастичність та структури” [30]. Вона присвячена огляду еволюції фізики нелінійних явищ у 60–80-х рр. XX ст. Слід зазначити, що в галузі нелінійної фізики були зроблені фундаментальні відкриття, які привнесли у математичну культуру цієї галузі строгі результати та образи. Найбільш яскраві серед них — солітон та дивний аттрактор, які втілюють винайдення зв’язку між нестійкістю руху та народженням хаосу. Тому осно-

вна увага у статті приділена фундаментальним проблемам: виникненню стохастичності у простих детермінованих системах, які не підпадають під дію флуктуацій, а також впорядкованих детермінованих структур у нелінійних середовищах, подекуди всупереч флуктуаціям. Автори підкреслюють, що дані проблеми стосуються таких різних галузей, як нагрівання плазми, біофізика, єдина теорія поля, теорія еволюції, прогноз погоди.

Для знайдення ключових моментів та логіки розвитку статистичної фізики як фундаментального розділу фізичної науки виявилось необхідним широко застосовувати також літературу, що висвітлює генезис та еволюцію фізичної науки в світі в цілому. Окремо слід зупинитись на таких важливих літературних джерелах, як курси з історії фізики різних авторів — П.Лакура та Я.Аппеля, Ф.Розенбергера, Я.М.Дорфмана, Б.Спаського, П.С.Кудрявцева, М.Льоцци, М.Лауе, П.Таннері, Г.Ю.Тредера, А.Ейнштейна, Б.Г.Кузнецова, Х.А.Агабатова, К.Н.Андрієвського і Э.Г.Шипатова, Ф.М.Дягилова, А.І.Ансельма, Ю.О.Храмова та інш., у яких “широкими мазками” подано історію розвитку основних фізичних уявлень. Зокрема, тут обговорюються питання ключових етапів розвитку такого фундаментального розділу теоретичної фізики, як статистична фізика [31–49]. Однією з фундаментальних праць цього циклу є монографія Я.Г.Дорфмана у двох частинах [33,34], у якій розглядаються розвиток та завершення класичної фізики у ХІХ ст., революційні відкриття, філософська криза у фізиці та початок нової ери у першій половині ХХ ст. Окрім викладення послідовної зміни теоретичних уявлень та експериментальних результатів, значну увагу тут приділено аналізу покладених у її основу методів і принципів. Ряд розділів, таких як „Фізико-хімічний атомізм та його перші успіхи”, „Переворот у вченні про теплоту — відкриття закону енергетичної еквівалентності усіх видів руху та взаємодії”, „Розвиток загальної теорії тепла і виникнення статистичної фізики”, „Фізика фазових переходів”, „Синтез квантової механіки та відкриття дуалізму мікросвіту”, „Розвиток фізики твердого тіла” безпосередньо стосуються світового контексту досліджуваної теми.

Оригінальністю вихідної концепції вирізняється також монографія Б.Г.Кузнецова “Розвиток фізичних ідей від Галілея до Ейнштейна в світлі сучасної науки” [42], у якій робиться спроба показати еволюцію уявлень про простір, час, рух та речовину з точки зору сучасних пози-

цій. При цьому за об'єкт історичної ретроспекції автором вибирається фундаментальний принцип класичної науки — уявлення про тотожну собі частинку, яка рухається у неперервному просторі. Зокрема, розглядається зв'язок фізичного та філософського розуміння ідеї статистичної закономірності та необоротності у поведінці комплексу таких частинок з кількісно-математичним конструюванням понять, що відображають міру ймовірності стану статистичних ансамблів.

Важливою для усвідомлення суті фундаментальних фізичних ідей виявилась також книга фізиків В.Акоста, К.Кована та Б.Грема “Основи сучасної фізики”. Автори мають великий викладацький досвід, тому в роботі у науково-популярній формі викладено еволюцію та найсуттєвіші досягнення атомної фізики, фізики атомного ядра та елементарних частинок — тобто тих фундаментальних галузей фізики, де статистичні методи знаходять широке застосування [50].

Розумінню еволюції фізичної картини світу, яка є динамічною та розвивається, присвячено монографію академіка НАН України О.І.Ахієзера — вченого-фізика, який зробив вагомий внесок у формування сучасних фізичних уявлень та показав роль у них колективних процесів — “Еволюція фізичної картини світу” та “Фізична картина світу, що розвивається” [51,52].

Суттєвим внеском до фонду історико-фізичної літератури є монографія Ю.О.Храмова “Історія фізики” [47]. У книзі історія фізики вперше подається комплексно в соціокультурному контексті як історія фундаментальних ідей, теорій та наукових напрямів у межах розробленої автором періодизаційної схеми, а також через біографії провідних діячів науки та історію ряду фізичних шкіл першої половини ХХ ст. Такі розділи монографії, як “атомістика” та “статистична фізика і теорія твердого тіла” безпосередньо стосуються тематики даного дослідження.

Окрім курсів історії фізики, існує також низка методологічної літератури, яка стосується базових моментів фізичного пізнання. Так, цикл робіт в галузі філософських проблем фізики, узагальнених, зокрема, в монографії “Вибрані питання з методології фізики”, належить І.В.Кузнецову [53]. Зазначимо ряд його статей, перш за все працю “Структура фізичної теорії”, де обговорюється теза динамічної зміни структури фізичної теорії відповідно до історичного етапу розвитку науки. Наприклад, автор доходить висновку, що найсуттєвіші зміни



даної форми нашого “бачення світу” відбуваються перш за все в епоху великих наукових революцій. Стаття “Специфічні риси фізичних форм руху матерії” є спробою уточнення самого поняття фізичної науки порівняно з іншими розділами знання, праця “Співвідношення структури наукової теорії і структури об’єкта” спрямована на пошук перших, вихідних складових компонентів понятійних конструктів майбутньої фізичної теорії, статті “Метод принципів” та “Про математичну гіпотезу” дають філософський аналіз загальних методів побудови та розвитку фізичної науки.

Вивчення глибинного „мікрорівня” внутрішніх процесів наукових революцій передбачає розгляд категоріальної структури теоретичного знання, оскільки філософські категорії виявляються найбільш загальними поняттями, які відображають найсуттєвіші зв’язки та відношення реальності. Основні категоріальні структури ряду теорій класичної фізики було вивчено А.Т.Артюхом, а сучасною фізики — В.А.Храмовою [54,55]. Близькій тематиці присвячено монографію вітчизняного філософа науки В.І.Кузнецова “Проблема “універсалій” у фізичному пізнанні” [56], де ставиться питання про зв’язок у сучасній фізиці категорій загального, особливого та одиничного як моментів реальності. Виявляється, що їх комплексна структура має універсальний характер, відображується у фундаментальних фізичних теоріях та слугує для виділення об’єктів із предметних галузей, формулювання законів і принципів.

Оскільки діапазон застосування ідей і методів статистичної фізики є надзвичайно широкий, а статистична фізика тяжіє до універсальності опису явищ природи, під час роботи було корисно ознайомитись з монографією М.О.Гудкова “Ідея “великого синтезу у фізиці” [57], де проаналізовано тенденцію до теоретичного синтезу знань у фізиці з моменту її логічної побудови у формі узагальнюючої теоретичної схеми механіки, а також розглянуто найбільш яскраві вияви цієї тенденції: теоретико-польовий синтез А.Ейнштейна, квантово-теоретичний синтез знань у галузі пізнання мікросвіту та “раннього” Всесвіту; “великий синтез” як програма концептуальної побудови єдиної теоретичної системи, що має відображати Всесвіт як єдине ціле. Остання концепція характеризується автором як притаманна сучасній фізиці методологія цілісного сприйняття світу.

Ряд цікавих матеріалів загального характеру, які відображають тенденції у розвитку фундаментальних проблем фізики, міститься також у тематичних збірках, що видавались у різні роки видавництвом “Наука”, зокрема, “Фізика сьогодні і завтра” та “Фізика ХХ століття: розвиток та перспективи” [58,59].

Слід зупинитись також на тих працях, які стосуються загальних питань історії розвитку науки і техніки. Ознайомлення з ними є необхідним незалежно від того, історія якої саме галузі науки досліджується. Із сучасної літератури з цієї тематики заслуговують на увагу монографії Т.Д.Пікашової, Л.О.Шашкової “Основи історії науки і техніки” та Л.М.Бесова “Історія науки і техніки”, написаних на основі навчальних курсів з історії науки і техніки, які викладаються авторами у Київському університеті та Харківському політехнічному інституті [60,61]. Так, у монографії Т.Д.Пікашової, Л.О.Шашкової висвітлено основні історичні етапи розвитку науки і техніки, їх ідейний зміст від часів зародження систематичного наукового пізнання до кінця ХVІІІ ст. Багато уваги приділено загальній характеристиці соціокультурних умов різних історичних епох, що впливали на процеси формування наукових знань, еволюції освітнього процесу та його змісту, місця науки у суспільному житті в конкретні історичні періоди. Характерним для монографії є подання досягнень фундаментальних природничих наук у комплексі з визначальними для кожної епохи галузями гуманітарного знання — історіографії, філології, психології та соціології.

У зазначеній вище книзі Л.М.Бесова [61] показано, як поєднані між собою природнича, технічна, виробнича і гуманітарна складові культури. Розкрито картину накопичення суперечностей між людиною і природою та запропоновано шляхи їх розв’язання в сучасних умовах.

Для розуміння процесів становлення та розвитку статистичної фізики, а також усвідомлення її місця серед інших наук важливим є розгляд концептуальних засад сучасного природознавства, порівняння різних підходів до розуміння феномену науки в цілому. Для цього виявилось необхідним звернутись до енциклопедичної літератури, зокрема, до Філософської енциклопедії та Філософських енциклопедичних словників [62–64]. Узагальнюючи подані в цих джерелах тлумачення, зазначимо, що сьогодні під *наукою* розуміють соціально значущу сферу людської діяльності, спрямовану на одержання та систематизацію

об'єктивних знань про оточуючу дійсність методами теоретичного обґрунтування, емпіричного випробування та перевірки результатів для розкриття їх об'єктивного змісту, істинності та достовірності

У зв'язку з тим, що наука є невід'ємною та надзвичайно важливою частиною духовної культури, спроби побудувати цілісний підхід до її розгляду є природними. Класичною в цьому напрямі є монографія англійського дослідника Дж.Бернала “Наука в історії суспільства” [65], у якій здійснено спробу дослідити історію взаємовідносин між розвитком науки і техніки, та розвитком суспільства від зародження науки до 50-х рр. ХХ ст. Автором зображена широка картина прогресуючого пізнання наукою дійсності та її зростаюча роль для розвитку суспільства. Цікавим є те, що в книзі аналізується еволюція природничих дисциплін (перш за все фізики і біології) в комплексі з розвитком окремих галузей техніки і суспільних наук. Проте зауважимо, що написана у 1954 р. монографія не позбавлена політизації викладення матеріалу, особливо щодо ролі суспільних дисциплін, серед яких головне місце відведено марксистській теорії.

Слід зазначити, що в цілому сьогодні не існує єдиного загальноприйнятого підходу до опису науки. У цьому напрямі працювали К.Поппер, І.Лакатос, Д.Фейерабенд, О.Койре, Т.Кун, С.Тлумин, К.Гемпель, р.Карнап, Дж.Снід, В.Штегмюллер та інші. Здійснені ними спроби в різній мірі враховують структуру, функціонування, генезис та розвиток науки. Так, К.Поппер розглядав логіку наукового відкриття, вводячи критерій фальсифікованості [66]; І.Лакатос запропонував концепцію науково-дослідних програм як фундаментальних одиниць методологічного аналізу [67–69]. П.Фейерабенд проаналізував зовнішній генезис науки в своїй концепції „методологічного анархізму” [70,71], започаткувавши „принцип плюралізму” нових та старих теорій, який підкреслює значення передісторії наукової дисципліни та її зв'язків з культурою. Внутрішній генезис науки досліджено в працях О.Койре [72,73], зовнішній розвиток — Т.Куна, який запропонував концепцію наукових революцій [74,75]. К.Поппер висунув також концепцію перманентної революції, С.Тлумин — еволюційного етапу розвитку науки [76,77].

Широко відомими є праці видатного математика, фізика, астронома та філософа А.Пуанкаре з метрологічних та гносеологічних проблем науки („Наука і гіпотеза” (1902), „Цінність науки” (1905), „Наука та метод” (1908), „Останні думки” (1913)), узагальнені в книзі „О На-

уке” [78]. У них дискутуються теми відносності руху, статус геометрії та фізичних законів, співвідношення логічного та інтуїтивного у науковій творчості. Розробка А.Пуанкаре питання про значення умовно вибраних домовленостей для побудови теоретичних моделей фізичних явищ заклала основи природничо-наукового конвенціоналізму, а передбачення ним напрямів, у яких буде рухатись наукова думка у природознавстві, робить сьогодні його висновки надзвичайно цінними орієнтирами для вчених.

Наступна книга, яка стосується природознавства в цілому — монографія Б.Г.Кузнецова “Ідеали сучасної науки” [79]. Вона присвячена міжгалузевим інваріантам природознавства, ідеям, принципам і методам, які об’єднують наукову картину світу в єдине ціле. Поняття ідеалу науки, введене автором, до певної міри співзвучне поняттю концепції у розглянутих вище працях і пояснюється ним як нескінченний інваріант трансформації науки, а рух до нього — як нескінченний і неперервний процес. Серед прикладів таких ідеалів наводяться детермінізм, атомізм, мікро- та макрокосмос, економічний, екологічний та гносеологічний ефекти науки.

Розділ “Бесіди з історії науки” книги О.Д.Олександрова “Проблеми науки і позиція вченого” [80] фактично також є коротким викладенням історії розвитку природознавства з найдавніших часів до 80-х рр. ХХ ст. Коло обговорюваних питань охоплює філософські та етичні проблеми науки, світоглядні питання математики, введення фундаментальних фізичних понять, основ теорії відносності та квантової фізики. Окремо приділяється увага ролі ймовірності у фізичних процесах. Загальним тенденціям розвитку природничих наук та ключовим моментам цього процесу від епохи Давньої Греції до наших днів, зокрема, формуванню сучасних уявлень про дискретну структуру речовини, присвячено також монографію В.А.Кириліна “Сторінки історії науки і техніки” [81].

Тут же слід вказати на монографію відомого українського філософа Ю.В.Павленка “Цивілізаційні трансформації та фундаментальні зрушення в розвитку природознавства” [82], метою якої є дослідження взаємозв’язку основних трансформацій світової цивілізації із становленням та розвитком позитивних знань про природу. Автором встановлюється кореляція між ними від початку цивілізаційного процесу за часів

формування відтворювального господарства до сьогодні та робиться висновок про те, що за фундаментальними зрушеннями в культурно-цивілізаційній системі та виходом на новий рівень знань про природу, як правило, відбувається прорив у техніко-технологічній сфері.

Спроби викласти концептуальні засади сучасного природознавства здійснювались і раніше, але особливо вони інтенсифікувались в останні роки [83–95]. Так, у підручнику “Природознавство” В.І.Кузнецова, Г.М.Ідліса та В.Н.Гутіної [95] природознавство подано як єдина цілісна наука про природу в її неперервному розвитку, а специфічні сторони цієї науки — фізика, хімія, біологія — показані як рівні єдиної ієрархічної системи знань, де фундаментальні фізичні принципи є теоретичною основою всього природознавства. Головна концепція книги полягає в тому, що стрижневою лінією розвитку природознавства стало обґрунтування цілісності природи та єдності живої та неживої природи. Тут розглянуто процеси взаємопроникнення методів різних наук, еволюцію фізичної картини світу протягом наукових революцій, уявлення про Всесвіт та його макро- і мікросиметрію. Висвітлено також шляхи розвитку хімічних та біологічних знань, нові методи синтезу речовин та перетворення сонячної енергії в енергію хімічних палив як майбутнього енергетики.

Зупинимось також на монографії Т.Я.Дубнищевої “Концепції сучасного природознавства” [87], матеріал якої подано у вигляді питань і відповідей на них. Робота спрямована перш за все на формування уявлення про єдину сучасну картину світу, яка містить у собі термінологію, мову, сформовані поняття та сучасні досягнення. В книгу входить також короткий словник термінів та персоналій класиків природознавства. Розглядаючи природознавство як невід’ємну складову культури, яка проникає також у гуманітарну сферу та суспільне життя, авторка висвітлює процеси логіки пізнання та формування наукового методу, еволюцію картин світу та наукових програм; обговорює масштаби Всесвіту і еволюцію його об’єктів у просторі і часі, моделі матеріальної точки та хвилі, детермінізму і причинності класичної фізики, континуальну концепцію опису природи. На прикладі корпускулярно-хвильового дуалізму речовини та світу продемонстровано перехід від наочних до математичних уявлень, які втрачають наочність.

Один з розділів праці близький за тематикою до теми монографії і присвячений співвідношенню динамічних і статистичних закономірностей. Тут розкрито механізм переходу від класичних моделей до складних систем, коли виникає необхідність зіставляти мікроскопічний та макроскопічний описи систем, та коли модельним параметрам на макрорівні відповідають характеристики складної системи. Важливим є обговорення можливості побудови загальних питань теорії нерівноважних процесів у складних системах, висвітлення ключової ролі зворотних зв'язків у системах, далеких від рівноваги, знайомство з міждисциплінарною галуззю вивчення складних систем — синергетикою та з прикладами виникнення самоорганізації матерії у різних предметних галузях (в тому числі зроблено узагальнення спроб побудувати підходи до розгляду еволюційних процесів у такій складній системі, як біосфера Землі). Цей розділ є корисним для усвідомлення загальності ймовірнісних підходів при розгляді різних явищ природи.

В Україні інтенсивні дослідження в галузі історії вітчизняної науки і техніки проводяться у відділі історії науки і техніки Центру досліджень науково-технічного потенціалу і історії науки НАН України під керівництвом відомого історика фізики д.ф.-м.н., професора Ю.О.Храмова. Фундаментальною колективною працею співробітників відділу є узагальнююча монографія “Природознавство в Україні до початку ХХ ст.” [96], у якій обговорюється питання осмислення історії вітчизняної науки як складової культури нашого народу. Тут розглядається історія природознавства від найдавніших часів у контексті соціокультурного процесу в Україні на тлі загальносвітового цивілізаційного поступу. Монографія складається з шести розділів, де подається історія розвитку наукових знань у ту чи іншу історичну добу. Робота має глобальний характер та містить у собі багато корисної інформації про становлення окремих наук, зокрема, фізики в Україні. У ній показано формування ранніх атомістичних поглядів на будову речовини, пов'язаних перш за все з діяльністю викладачів Києво-Могилянської академії.

Корисним джерелом щодо питань загального розвитку науки, техніки та освіти в Україні є також хрестоматія-посібник “З історії української науки і техніки” [97], яка містить у собі оригінальні тексти авторів з різними поглядами, але які були однотайні в оцінці ключової ролі науки, її історії та організації, зв'язку з вищою школою та технікою. У своїй сукупності

матеріали створюють цілісну картину розвитку науки і техніки в Україні до 30-х рр. ХХ ст., дають можливість прослідкувати генезис її сучасного стану. Окремо наукова робота з фізики в Україні, в тому числі в наукових інститутах, відображена в оглядових роботах Ю.О.Храмова [98–101].

Оскільки до 1991 р. Україна входила до складу СРСР, інформацію щодо розвитку фізики в Україні, зокрема, статистичної фізики, доцільно було шукати також в літературі, у якій висвітлювався розвиток фізики в СРСР. Це, зокрема, монографії “Розвиток фізики в СРСР” у двох частинах [102], “Наукове співтовариство фізиків СРСР. 1950–1960 рр.” [103]. Остання містить у собі документи, спогади, дослідження, а також досить повну хронологію основних теоретичних та експериментальних відкриттів, одержаних у СРСР, у тому числі і в Україні, в зазначений період. Сюди ж можна віднести й перше інформаційно-довідкове видання “Наука і техніка СРСР. 1917–1987” [104], де зібрано основні факти з історії радянської науки і техніки протягом 70 років. До переваг монографії слід віднести те, що оглядові статті поєднані з хронологічним матеріалом.

Основні результати теоретичного плану з фізики в СРСР викладено в статтях Д.І.Блохінцева “Шляхи розвитку теоретичної фізики в СРСР” та А.Ф.Йоффе “Розвиток радянської фізики” [105,106]. Розвиток фізичної науки в СРСР, зокрема, в Україні, також висвітлюють статті В.І.Вернадського “Про наукову роботу в Криму в 1917–1921 рр.” [107], Я.І.Френкеля “Теоретична фізика в СРСР за 30 років” [108], М.В.Пасічника “Розвиток фізики в Україні за 40 років радянської влади” [109], А.К.Вальтера, Б.Г.Лазарева, К.Д.Синельникова “Досягнення в галузі фізики в Україні за 40 років Радянської влади” [110], В.С.Савчука “Біля витоків Української асоціації фізиків” [111].

Такі праці відображають загальні тенденції розвитку досліджуваної галузі науки. Але через глобальність тематики та обширність територіальних меж і хронологічних рамок, звичайно, не всі дослідження у локальних наукових центрах було висвітлено у повному обсязі. Тому проблемно-історичні роботи, тобто дослідження історії окремих питань статистичної фізики, також увійшли до джерельної бази даного дослідження. Так, проблема еволюції поняття причинності у фізиці розглядається в працях В.Фока [112], В.Бояринцева [113], Х.М.Нуссенцвейга [114]; історія теореми Карно — Б.І.Спаського [115], історія побудови квантових

статистик — Л.Беллоні [116], побудова нерівноважної статистичної фізики — Л.Онсагера [117], І.Пригожина [118], Г.В.Смирнова [119], Дж.Кайзера, С.Д.Хайтуна [120]; генезис та розвиток термодинаміки Дж.Гіббса — Д.М.Зубарева [121], А.Я.Кипніса [122], С.Д.Хайтуна [123], М.Гольдберга [124], Я.М.Гельфера [125], значення принципу доповнюваності для статистичної фізики — в статті І.П.Базарова [126], помилкові судження у термодинаміці — І.П.Базарова та В.В.Толмачова [127], питання статистичної теорії рідин — у праці І.Фішера [128], проблеми запровадження стохастичних методів до фізики та астрономії — С.Чандрасекара [129] та К.Гардінера; статистична фізика макромолекул — А.Гроссберга та А.Хохлова; еволюція поняття фазового переходу — Я.Г.Синая [130], Г.Стенлі [131], П.Фльорі [132]. Значення методу М.М.Боголюбова для розвитку кінетичної теорії виклав К.П.Гуров [133], про важливість концепції квазісередніх М.М.Боголюбова для теорії неупорядкованих систем писали В.П.Ковров та А.М.Курбатов [134], ймовірнісні аспекти квантової теорії розглядав А.Холєво [135]; математичні засади статистичної механіки досліджував А.Хінчин [136], підсумкам кінетичної теорії присвятила працю Т.О.Афанасьєва-Еренфест [137], узагальнення законів фізичної статистики для розгляду таких актуальних об'єктів сучасної науки, як ударні хвилі і надгуста речовина, дано О.С.Компанейцем [138], зв'язок стохастичних автоколивань та турбулентності розглядався М.І.Рабіновичем [139]. Кінетична природа міцності вивчається у статті В.Р.Регеля та А.І.Слуцкера [58, с.90–173]. Авторами робиться узагальнюючий висновок, що саме кінетична концепція міцності є найбільш загальною, і на її основі можна описати практично всі вияви процесу руйнування різних за будовою та властивостям твердих тіл. Визначальним тут виявляється термофлуктуаційний механізм руйнування. Це має важливий пізнавальний характер, оскільки головним чинником виявляється не механічна сила, а тепловий рух атомів, який породжує енергетичні флуктуації, що долають потенціальний бар'єр в елементарних актах руйнації.

Одним з середовищ, до яких застосовні методи статистичної фізики, є макромолекули та полімери. Можливості використання полімерних матеріалів у фізиці, обчислювальній техніці та біології, а також особливості фазового переходу, який відбувається при полімеризації, обговорено в статті В.Я.Френкеля [58, с.176–270].



Нерівноважній термодинаміці, а також такому її сучасному узагальненню, як синергетика — наука про процеси самоорганізації, присвячена численна література. Історії формування та розвитку нелінійної динаміки у 1950–1960 рр. XX ст. та запровадження у 1963–1964 рр. фундаментального поняття динамічного хаосу, тобто виникнення стохастичної поведінки у динамічних системах, відображено у статті р.Р.Мухіна [140], монографії Г.Шустера “Детермінований хаос” [141], та частково у книзі А.М.Косевича і О.С.Ковалева “Вступ до нелінійної фізичної механіки” [142].

Аналізу запропонованого І.Пригожиным принципу локальної рівноваги та теореми про мінімум вироблення ентропії у стаціонарних нерівноважних станах, а також обговоренню понять дисипативних структур, самоорганізації, відкритої системи присвячені передусім його праці — монографії “Нерівноважна статистична механіка”, “Від існуючого до виникаючого”, “Самоорганізація в нерівноважних системах” (спільно з Г.Ніколісом), “Сучасна термодинаміка від теплових двигунів до дисипативних структур” (спільно з Д.Кондепуді), “Порядок з хаосу” (спільно з І.Стенгерс), “Кінець визначеності. Час, хаос та нові закони природи”, “Термодинамічна теорія структури, стійкості та флуктуацій” (спільно з П.Гленсдорфом) [143–149]; статті [150,151]. Подальшому дослідженню самоорганізації, а саме самоорганізації в активних розподілених середовищах (у широкому спектрі фізичних, хімічних та біологічних систем) присвячено статтю Б.С.Кернера, В.В.Осипова [152], синергетичні стратегії в освіті вивчав В.Буданов [153].

Історія розвитку фізичної науки завжди привертала увагу вчених-фізиків, особливо тих, хто були фундаторами формування сучасних фізичних уявлень. Ці науковці публікували дослідницькі та науково-популярні праці з історії поворотних моментів розвитку фізики, висвітлювали її найбільш яскраві моменти у своїх Нобелівських лекціях. Частково питання еволюції статистичної фізики також висвітлені в оглядових працях видатних вчених — А.Пуанкаре [154], Г.Лоренца [155,156], Г.Герца [157], М.Планка [158], Н.Бора [159], М.Борна [160], Е.Шредінгера [161], П.Дірака [162,163], В.Гейзенберга [164], П.Ланжевена [165,166], В.Вайскопфа [167–169], А.Ейнштейна [41], А.Зоммерфельда [170], Л.де Бройля [171], І.Погребиського, М.Каца [172], О.І.Ахієзера, С.В.Пелетминського [173], М.І.Каганова

та В.Я.Френкеля [174–176], П.А.Капіци. Стаття останнього “Про надплинність рідкого гелію-II” [177, с.118-129] дає нарис історії відкриття одного з фундаментальних квантових явищ — явища надплинності, висвітлюючи при цьому його фізичну суть, а також значення гідродинамічної теорії даного явища, створеної Л.Д.Ландау. Окрему позицію займають наукові огляди сучасників [179–183], які містять у собі розгляд основних досягнень фізики.

Слід зазначити також огляди різних авторів, які стосуються історії фізики в Україні, і з яких необхідно було також виокремлювати відомості щодо розвитку статистичної фізики. Це, наприклад, книга “Розвиток науки в Українській РСР за 40 років”, яка містить у собі розділ щодо досягнень у галузі фізики в Україні до 60-х рр. ХХ ст. [184], де викладено результати досліджень у галузі фізики твердого тіла та фізики низьких температур, термодинаміки і статистичної теорії твердого тіла, електронної теорії металів, електронної теорії неметалічних кристалів. Ряд питань щодо внеску українських вчених у молекулярну фізику та термодинаміку вивчались у статтях А.М.Павленка та В.М.Коновалова і Г.Г.Кордуна [185–187]. Тут у світовому контексті подано створення основ феноменологічної термодинаміки та молекулярної фізики, показано вдосконалення термодинамічного методу та його поширення на довільні мікроскопічні системи, окреслено розвиток термодинаміки в сучасний період, який характеризується органічним злиттям феноменологічного методу зі статистичним і поширенням його на квантові явища.

Значну цінність становлять видання з історії освітянських та наукових центрів — навчальних закладів, їх факультетів і кафедр, наукових інститутів, де проводилися розробки в галузі статистичної фізики та суміжних з нею наукових галузей, Національної академії наук України. Їх аналіз показав стан дослідження питання про атомістичні уявлення у період перших освітніх центрів в Україні та висвітлив історію становлення і наукові результати, одержані в різні роки у Києво-Могилянській академії, Харківському, Київському, Львівському та Одеському університетах, Київському політехнічному інституті, Харківському фізико-технічному інституті, Інституті радіофізики та електроніки, Фізико-технічному інституті, Інституті фізики, Інституті теоретичної фізики, Інституті металофізики, Інституті матеріалознавства, Інституті напівпровідників тощо [188–202]. Вони містять у собі важливий узагальне-

ний фактичний матеріал, який, проте, потребує серйозного аналізу. В нарисах [203–213] наведено факти з науково-педагогічної діяльності фізиків Харківського та Київського університетів, які, зокрема, працювали на фізичному та механіко-математичному факультетах, дано відомості про їх внесок у розвиток науки. З цього переліку слід зазначити такі ювілейні ґрунтовні видання, як “50 років Харківському фізико-технічному інституту”, “Інститут радіофізики та електроніки ім. О.Я.Усикова НАН України. 50 років”, “Київський політехнічний інститут. Нарис історії. КПП-100 років”, “Об’єднаний інститут ядерних досліджень. Дубна 1956–1981”. Слід згадати також книгу М.В.Полякова та В.С.Савчука “Класичний університет” [214], де простежено історичний шлях, пройдений університетом від зародкових форм в Античності до сьогодення, наведено сучасні моделі університетської освіти.

Окремо вкажемо на нариси розвитку саме фізичної науки в університетах України. Це такі статті, як “Наукові дослідження з фізики у вузах України” (О.З.Жмудський), “Про розвиток наукових досліджень з фізики в університетах УРСР”, “Дослідження в галузі фізичних наук в Київському державному університеті за 40 років” (Г.В.Дмитренко), “Фізика в Харківському університеті” (Н.Л.Полякова), “Про розвиток фізики у Львівському університеті” (І.А.Климишин), “Наукові дослідження на фізичному факультеті Львівського університету” (М.Т.Сеньків), “Фізика в Одеському університеті ім. І.І.Мечникова” (Є.А.Кирилов, Д.І.Поліщук, Т.Я.Сьора), “Теоретична фізика у Київському державному університеті” (Л.Я.Штрум), “Наука і наукові працівники в Київському державному університеті за 112 років його існування. 1834–1946” (О.П.Маркевич) [215–224]. Ці джерела показують пріоритетні напрямки, які розвивались в університетах, і дають можливість виявити центри досліджень зі статистичної фізики та близьких дисциплін — молекулярної фізики, фізики твердого тіла, фізики рідин тощо.

Блок літератури, який обов’язково необхідно опрацьовувати при роботі з історії фізики в Україні — це джерела щодо історії становлення і розвитку Національної академії наук України. Так, у монографії Ю.О.Храмова, С.П.Рудої, Ю.В.Павленка та В.А.Кучмаренко “Рання історія Академії наук України. 1918–1921” [225] досліджено створення і перші роки діяльності Української академії наук у Києві в контексті соціально-політичних подій, що відбувалися в Україні в 1917–1921 рр.

XX ст. Вперше по-новому подано аналіз процесів у суспільно-політичному і культурному житті в Україні на початку XX ст., головним чином, у 1917–1920 рр. Розглянуто Історію УАН 1918–1921 рр., передумови, що привели до її організації, відновлено справжню дату заснування УАН, введено чимало нових фактів та імен, дано нове бачення низки подій академічного життя, уточнено багато дат. У виданні С.Кульчицького, Ю.В.Павленка, С.П.Рудої та Ю.О.Храмова „Історія Національної академії наук України в суспільно-політичному контексті. 1918–1998” [226] в контексті соціально-політичних і культурних процесів, що відбувалися в Україні наприкінці XIX ст. і впродовж XX ст., розкрито передісторію створення Національної академії наук, її заснування, початок діяльності та подальший розвиток протягом 80 років. Вперше дано нове бачення подій в суспільно-політичному і духовному житті України в розглядуваний період, низку фактів академічного життя. У рамках запропонованої періодизаційної схеми викладено реальні пріоритети і результати світового рівня, які вплинули на логіку конкретних наук і наукових напрямів; вміщено хроніку академії, у якій разом із загально академічними фактами наведено наукові результати та персональний склад провідних наукових шкіл. Наступна монографія “Історія Академії наук України”. 1918–1923. Документи і матеріали” [227] цікава тим, що у ній вводяться численні джерела з історії Академії наук України, публікуються недоступні раніше для дослідження документи Центральної ради, Української держави, Української народної республіки про створення Академії наук, невідомі і маловідомі документи радянського періоду діяльності УАН (ВУАН). Дослідження з фізики в Академії наук Української ССР з 1917 до 1985 рр. розглянуто у статті В.Г.Бар’яхтара та Ю.О.Храмова [228].

Важливим джерелом дослідження виявились також звітні матеріали, наприклад, Звіт про сесію фізико-математичних і хімічних наук Академії наук УРСР з питань фізики [229] дає можливість виявити пріоритетні розробки в Академії наук України у зазначений період. Наукові щорічники Київського університету, які видавалися з 1958 до 1962 рр., містять у собі звіти кафедр молекулярної фізики та теоретичної фізики з 1957 до 1961 рр., показують одержані там результати [230–234]. Звіт про роботу Українського фізико-технічного інституту О.І.Лейпунського за перші 6 років його існування у 1937 р. показує формування бази по-

дальшого розвитку фізики в Україні, зокрема, в галузі низьких температур та теоретичної фізики [235].

Окремі аспекти досліджуваної проблеми висвітлюються в історичних працях, де вивчаються особливості розвитку науки залежно від різних зовнішніх чинників, в тому числі і соціально-політичних. Так, жорстоким репресіям у 30-ті рр. ХХ ст. в Українському фізико-технічному інституті присвячена монографія Ю.В.Павленка, Ю.Н.Ранюка, Ю.А. Храмова „Дело „УФТИ“. 1945–1938” [236].

Особливе значення мають дослідження форм розвитку науки у першій половині ХХ ст., зокрема, такої її форми, як наукова школа. Феномен наукової школи є історичним і неоднозначним, але характеризується рядом параметрів. Складність проблеми зумовила різноманітність тлумачень поняття «наукова школа». Під ним розуміють науково-освітню школу, дослідницький колектив, напрям у науці (М.Г.Ярошевський), розрізняють також класичні та сучасні наукові школи (К.О.Ланге), класичні, дисциплінарні, проблемні (С.Д.Хайтун) тощо [237,238].

Комплексне вивчення даного феномену було здійснено Ю.О.Храмовим, у працях якого запропоновано концепцію сучасної наукової школи як найвищої форми колективної творчості, висвітлено її характерні ознаки, умови створення, структури, у яких функціонує школа. Ю.О.Храмов вперше на основі аналізу історико-наукового матеріалу, пов'язаного з діяльністю видатних вчених-фізиків та вихователів творчої молоді, висловлювань відомих учених розробив робочу модель сучасної наукової школи, виділив її характерні ознаки та риси наукового лідера-керівника школи, розкрив комплекс умов, що приводять при певних обставинах до виникнення наукової школи, встановив структури, в яких виникає та функціонує наукова школа, показав значення в цих процесах науково-дослідних програм, узагальнив досвід їх виконання, зміни парадигм, реалізації фізичними школами через свої програми соціального замовлення науки [239–243]. Запропонований Ю.О.Храмовим методологічний інструментарій було застосовано до ряду провідних фізичних шкіл в Україні і світі.

Основну частину джерельної бази роботи складають оригінальні наукові праці науковців як досліджуваного періоду, так і їх попередників. Це монографії, статті, доповіді, дисертації. Особлива увага надавалася також аналізу періодичних видань, таких як “Успіхи

фізичних наук”, “Успіхи математичних наук”, “Український фізичний журнал”, “Український математичний журнал”, “Журнал теоретической и экспериментальной физики”, “Теоретична та математична фізика”, “Фізика низьких температур”, “Природа”, “Университетские известия”, “Наукові записки Київського університету”, “Українські фізичні записки”, “Доповіді АН УРСР”, “Доклады АН СССР”, “Вісник НАН України”, “Вестник АН СССР”, “Наука та наукознавство”, “Нариси з історії природознавства та техніки”, “Історія української науки на межі тисячоліть”, „Дослідження з історії техніки”, “Вопросы истории естествознания и техники”, “Zeitschrift für Physik”, “Nature”, “Physical Review”, “Physics Today”, “American Journal of Physics” та інші.

Особливо цінну інформацію містять у собі монографії, що видавались у досліджуваний період, оскільки саме в них підсумовувались результати багаторічних досліджень та визначались подальші шляхи розробки відповідної проблеми. До таких праць належать класична монографія “Кінетична теорія рідин” Я.І. Френкеля [244], який першим висловив ідею про те, що рідина ближче за своїм складом до твердого тіла, ніж до газу внаслідок наявності ближнього порядку у розташуванні атомів, а також звернув увагу на необхідність застосування методів статистичної фізики при вивченні ядра; перші монографії М.М.Боголюбова зі статистичної фізики “Лекції з квантової статистики” та “Про деякі статистичні методи у математичній фізиці” [245,246]; етапна монографія М.М.Боголюбова “Проблеми динамічної теорії у статистичній фізиці” 1946 р. [247], яка стала початком широкомасштабних досліджень зі статистичної фізики в Україні; книга М.М.Боголюбова, В.В.Толмачова, Д.В.Ширкова “Новий метод в теорії надпровідності” [248], де викладено побудований ними метод; монографія Дж.Бардіна, Дж.Шріффера. “Нове у вивченні надпровідності” [249], де пояснюється ідея куперівських пар, а також одна з книг фундаментального курсу теоретичної фізики Л.Д.Ландау і Є.М.Ліфшиця „Статистична фізика” [250], перша частина якої („класична статистика”) була написана у Харківський період діяльності Л.Д.Ландау. Можна вказати також на монографії українських вчених В.І.Данилова “Будова та кристалізація рідин” [251], Й.З.Фішера “Статистична теорія рідин” [252], М.А.Кривоглаза і А.А.Смирнова

“Теорія сплавів, що впорядковуються” [253], А.Г.Ситенка “Електромагнітні флуктуації в плазмі” [254], які містять у собі застосування методів статистичної фізики в галузі теорії рідин, теорії металів та теорії плазми, а також їх подальший розвиток.

Окрема низка монографій — це курси або підручники зі статистичної фізики та термодинаміки (понад 150 джерел), написані провідними вченими в цій галузі (це, зокрема, А.Зоммерфельд, р. Балеску, Т.Хілл, А.Ісіхара, К.Хуанг, Дж.Уленбек, Дж.Форд, К.Хір, С.де Гроот, П.Мазур, р.Кубо, Д.Рюель, Дж.Майер, М.Гепперт-Майер, Ч.Кіттель, р.Фейнман, Дж.Кайзер, Г.Репке, Я.І.Френкель, Ю.А.Климонтович, М.А.Леонтович, Л.Д.Ландау, Є.М.Ліфшиць, О.І.Ахієзер, С.В.Пелетмінський, Д.Н.Зубарев, К.М.Никольський, Ю.Б.Румер, М.Ш.Ривкін, Л.В.Радушкевич, В.Г.Левич, Я.П.Терлецький, Ф.Куні, А.І.Ансельм, І.А.Квасніков, р.Л.Стратонович, К.В.Гардинер), які використовувались нами для аналізу генезису та еволюції поняття “статистична фізика” [255–269]. З цією ж метою аналізувались також енциклопедичні видання — Фізичні енциклопедичні словники, Фізичні енциклопедії, Велика радянська енциклопедія та Українська радянська енциклопедія [270–273].

Цікаві факти містять у собі й матеріали конференцій, зокрема, традиційних конференцій зі статистичної фізики, які проводяться у Харкові (Національний науковий центр “Харківський фізико-технічний інститут”, Харківський університет), Львові (Інститут фізики конденсованих систем, Львівський університет). Це також матеріали конференції “25 років нелінійної статистичної механіки” (Барселона, Іспанія, 1994) та Зимової школи теоретичної фізики “Хаос: взаємозв’язок між стохастичною та динамічною поведінкою” (Карпач, Польща, 1995) [274,275]. Сюди можна віднести також матеріали засідань наукових товариств, зокрема, Російського фізико-хімічного товариства, у роботі яких брали участь українські вчені. Ці джерела дозволяють визначити місце українських вчених в процесі розвитку наукової думки відповідного напрямку та оцінити їх здобутки.

Корисними джерелами є тритомний бібліографічний покажчик „Розвиток фізичних наук в Україні”, де зібрано посилання на основні праці фізиків та на оглядові статті з тої чи іншої тематики за 1917–1967 рр. [276], а також бібліографічний довідник „Видання Академії

наук УРСР (1919–1967). Фізико-технічні та математичні науки” [277]. Надзвичайно багатий бібліографічний матеріал щодо розвитку природознавства в цілому, а також щодо історії фізико-математичних наук з 1948 до 1975 рр., містить у собі багатотомний бібліографічний покажчик “Історія природознавства”, виданий Академією наук СРСР [278]. Вдало у хронологічному та тематичному порядку організована бібліографія історико-наукових робіт, виданих Інститутом історії природознавства і техніки РАН, хронологічні рамки якої обіймають період 1954–1980 рр. [279]. Бібліографія поділена на розділи і висвітлює теоретичні проблеми розвитку природознавства і техніки, наукознавства, історії різних природничих наук та техніки, вміщує праці класиків природознавства і техніки, довідково-бібліографічні видання.

Для ґрунтовного розкриття досліджуваної теми надзвичайно важливу роль відіграло знайомство з біографічною літературою, у якій подаються характеристики життєвого та творчого шляху видатних вчених–фундаторів статистичної фізики, котрі зробили величезний внесок у її становлення та розвиток як в світі, так і в Україні, показані їх основні наукові досягнення. Перш за все слід зазначити серії “Біо-бібліографія вчених Української ССР” та “Матеріали до біобібліографії вчених СРСР,” у яких друкувались наукові біографії та бібліографії академіків [280–284].

Про деяких визначних вчених, які зробили фундаментальний внесок у розвиток статистичної фізики в Україні та світі, написані книги. Так, засновникам класичної статистичної механіки та термодинаміки присвячено книги Л.С.Полака „Людвиг Больцман”, У.І.Франкфурта і А.М.Френка „Джозайя Виллард Гіббс”, С.Д.Хайтуна „Парадокс Гіббса”, У.І.Франкфурта, А.В.Лебединського та інш. „Гельмгольц”, В.М.Бородянського „Саді Карно”, А.Пайса “Наукова діяльність та життя А.Ейнштейна”, Г.В.Бикова „Амедео Авогадро”, А.П.Плачинди „М.Д.Пильчиков” [285–292]. О.П.Мороз, В.Я.Френкель та М.Клейн писали про науковий і творчий шлях П.Еренфеста [293–295]. Цікавою є документальна повість Богдана Вереса “Сонячна теорема” про М.М.Боголюбова [296], де у художній формі описано незвичайну долю та життєвий шлях академіка М.М.Боголюбова, що пройшов від села Великі Кручі на Полтавщині до керівництва у Дубні та Києві науковими центрами, які мають світове визнання. Глибокою і змістовною також є



книга О.М.Боголюбова “М.М.Боголюбов. Життя. Творчість” [297]. Академіку Л.Д.Ландау присвячено книгу А.Ливанової [298], його дружиною та племінницею також написані книги “Ландау” та “Академік Ландау” [299,300]. Науковій школі Ландау присвячено книгу М.І.Каганова „Школа Ландау: що я про це думаю” [301]. Сторінкам історії Харківського фізико-технічного інституту, а саме, видатним вченим, серед яких академіки Л.Д.Ландау, І.М.Ліфшиць, Б.І.Веркін, О.І.Ахієзер, присвячений розділ альбому “Миттєвості життя”, написаного академіком НАН України О.Я.Усиковим та ілюстрованого його дружиною фотохудожницею Д.Гай [302]. Корисною також є монографія “Розвиток науки в західних областях Української РСР. 1939–1989”, де особлива увага приділяється аналізу фундаментальних і прикладних досліджень в наукових установах та вузівських центрах, про які додатково подано довідковий матеріал. Зокрема, широко висвітлено одержані у Львівському університеті та Львівському відділенні Інституту теоретичної фізики академіком НАН України І.Р.Юхновським та його науковою школою результати [303]. Значне місце відведено інформації про початок наукової діяльності академіка НАН України В.І.Данилова в книзі В.С.Савчука “Нариси з історії фізичних досліджень на Дніпропетровщині (1917–1945)” [304].

Окреме місце серед біографічних джерел займає меморіальна література — статті (часто ювілейні) та некрологи вчених, які працюють чи працювали в досліджуваній галузі та сприяли її становленню. Тут слід відзначити статті про вчених, які сприяли становленню статистичної фізики як наукової галузі. Змістовні некрологи про М.Смолуховського та П.Еренфеста, написані А.Ейнштейном [305], інформативними є статті М.М.Боголюбова про Л.Больцмана [306], О.Г.Гольдмана про М.П.Авенаріуса та його наукову школу [307], М.Планка, У.І.Франкфурта, С.Ф.Шушурина, О.В.Кузнецової про запровадження Дж.Максвеллом статистичного методу в фізику, розуміння вченим меж застосування другого закону термодинаміки та про розвиток ідей Максвелла російськими фізиками наприкінці ХІХ– на початку ХХ ст. [308–312]. Цікаві праці І.М.Кравця про Т.Ф.Осиповського [313], В.П.Зубарева про Дж.Гіббса [121], В.В.Мігуліна про Л.І.Мандельштама [314], Г.Є.Гореліка про П.Еренфеста [315], М.Н.Свиридонова [316] та М.В.Кирпичова [317] про науковий доробок Т.О.Афанасьєвої-

Еренфест в галузі теорії подібності та розуміння поняття ентропії, Й.Й.Косоногова про М.М.Шиллера [318], О.Габовича про М.Смолуховського [319], Г.Г.Де Метца про Ф.Н.Шведова [320], В.С.Савчука про А.Е.Малиновського [321].

Численні ювілейні статті про М.М.Боголюбова вміщені в наукові журнали “Успіхи математичних наук”, “Успіхи фізичних наук”, “Атомна енергія”, “Журнал теоретичної та експериментальної фізики”, “Український фізичний журнал”, “Український математичний журнал”, “Фізика низьких температур”, “Вісник АН УРСР”, “Доповіді АН СРСР” [322–330], а також у тогочасні газети і журнали — “Правда”, “Правда України”, “Комсомольська правда”, “Знання та праця”, “Культура та життя”, “Вечірній Київ”, “Огонек” [331–336]. Ґрунтовне висвітлення основних етапів життя та наукової діяльності вченого, а також розкриття значення його досліджень для сучасної фізики містить у собі також некролог, написаний М.М.Боголюбовим (молодшим) та Д.П.Санковичем [337]. Огляд результатів М.М.Боголюбова тут детально структурований за хронологічним принципом і охоплює: наближений розв’язок диференціальних рівнянь (1925–1932); прямі методи варіаційного числення (1926–1932); теорію майже періодичних функцій (1930–1990); нелінійну механіку (1932–1969); теорію динамічних систем (1935–1991); статистичну механіку (1939–1991); квантову теорію поля (1950–1987). Очевидно, що питаннями статистичної фізики та застосуванням її методів М.М.Боголюбов займався протягом майже усього свого життя.

Ювілейні та меморіальні статті, присвячені діяльності таких вчених, як академіки В.І.Данилов, А.А.Смирнов, І.Р.Юхновський, С.В.Пелетмінський, професори О.З.Голик та Й.З.Фішер, також були опубліковані у наукових журналах (“Український фізичний журнал”, “Електромагнітні явища”, “Металофізика”, “Вісник АН України”, “Журнал експериментальної та теоретичної фізики”, “Проблеми металознавства та фізики металів”, “Фізика рідкого стану”, “Акустичний журнал”, “Журнал молекулярних рідин”) [338–350].

Надзвичайно інформативними є спогади, есе та інтерв’ю вчених — як авторів наукових результатів про свій творчий шлях, так і їх учнів, послідовників та колег. Нами розглядались збірки спогадів про М.М.Боголюбова, Л.Д.Ландау, О.С.Давидова, нариси та спогади О.І.Ахієзера, есе та інтерв’ю вчених про І.Р.Юхновського, спогади про

П.Еренфеста, про Я.І.Френкеля, які в комплексі розкривають феномен формування цих вчених, їх творчий портрет як особистостей, науковців та засновників наукових шкіл [351–359]. Цікавою також є передмова до вибраних праць І.Р.Юхновського, написана його учнями, що становить огляд запропонованих вченим методів, передусім методу колективних змінних та методу зміщень і колективних змінних, і також їх застосування для розчинів електролітів, квантових багаточастинкових систем, критичних явищ та фазових переходів, чорнобильської проблематики [360].

Увага приділялась також біографічній та бібліографічній інформації про вчених, розміщеній у довідниках або словниках. Необхідно зазначити довідник “Національна академія наук України. Персональний склад. 1918–2003.” [361], де подано короткі відомості про життя, наукову та науково-організаційну діяльність академіків і членів-кореспондентів Національної академії наук України за час її існування до 2003 р., біографічний довідник Ю.О.Храмова “Фізики” [362], довідникову частину в праці Ю.О.Храмова „Історія фізики”, словники “A New Dictionary of Physics” та “Dictionary of Scientists. The Cambridge” [363,364], “Notable 20th Century Scientists” [365], „Twentieth Century Physics” [366], „Dictionary of scientific biography” [367], “Хто є хто. Професори Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут” [368], біобібліографічний довідник “Вихованці Харківського університету” [369], “Почесні члені і доктори Університету св. Володимира” [370], „Біографічний словник діячів природознавства і техніки (у 2-х т)” [371], „Венгеров С.А. Критико-биографический словарь русских писателей и ученых от начала русской образованности до наших дней” [372]. Корисним джерелом також є довідниковий посібник “Класики фізичної науки (з найдавніших часів до початку ХХ ст.)”, що містить у собі праці або уривки з них класиків фізичної науки, які відіграли значну роль у історії фізики, зокрема, у становленні статистичної фізики — Р.Бойля, Д.Бернуллі, Н.Карно, р.Майєра, Дж.Джоуля, Г.Гельмгольца, Р.Клаузіуса, Дж.Максвелла, Л.Больцмана, Дж.Гіббса [373]. Тут оригінальні тексти супроводжуються короткими вступними статтями та коментарями. Надзвичайно корисною також є узагальнююча праця З.К.Соколовської “400 біографій вчених”, яка містить у собі рецензії на книги науково-біографічної серії видавництва “Наука”, численний документальний і ілюстративний матеріал [374].

Слід зазначити також ряд тематичних збірників, які виявились дуже корисними в роботі. Це, перш за все, збірники оригінальних праць основоположників статистичної фізики та термодинаміки — С.Карно, Дж.Клаузіуса, Дж.Максвелла, Дж.Гіббса — „Засновники кінетичної теорії матерії” та „Другий закон термодинаміки”, виданих у 1934 та 1937 рр. [375,376], збірник „Проблеми теоретичної фізики”, який складається з наукових статей з актуальних проблем статистичної фізики і присвячений 60-річчю М.М.Боголюбова [377], збірник “Проблеми сучасної статистичної фізики”, у якому відображено результати досліджень у цій галузі, одержані у 80-ті роки, і розглянуто теорію фазових переходів, кінетичні явища, строгі математичні методи, нелінійні процеси, статистичну фізику конденсованих середовищ [378]. Наступний збірник наукових праць присвячений одному з методів статистичної фізики — методу Монте-Карло [379]. Методу молекулярної динаміки у статистичній фізиці описано також у статті А.Н.Лагарькова та В.М.Сергеєва [380], а ґрунтовний огляд математичних методів статистичної фізики на прикладі модельних систем зроблено у монографії М.М.Боголюбова (мол.), Б.І.Садовникова, А.С.Шумовського “Математичні методи статистичної механіки модельних систем” [381].

Вагома частина джерельної бази — це архівні матеріали, переважна більшість яких вводиться до наукового обігу вперше. У роботі використано матеріали фондів архівів — насамперед, фонди Державного архіву Києва, Центрального державного архіву вищих органів влади та управління України, архіву Президії НАН України, архіву Київського національного університету, архіву Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут”, архіву Інституту радіофізики і електроніки НАН України, фонди Інституту рукопису та газетного фонду Центральної наукової бібліотеки ім. В.І.Вернадського НАН України. До опрацьованих матеріалів фондів архівів входять, в першу чергу, такі документи: особові справи та фонди вчених, звіти інститутів про наукову діяльність, постанови. Серед них зазначимо особові справи: академіка НАН України В.І.Данилова (архів Президії НАН України [382]), академіка НАН України А.А.Смирнова (архів Президії НАН України [383], архів НТУУ “КПІ” [384]), академіка НАН України О.Г.Ситенка (архів Президії НАН України [385]), академіка НАН України І.М.Лифшиця (архів Президії НАН Украї-

ни [386]), члена-кореспондента НАН України А.Г. Лесника (архів Президії НАН України [387]), професорів О.З.Голика (архів Київського університету [388]), С.Д.Герцрикена (архів Київського університету [389]), А.М.Федорченка (архів Київського університету [390]), Ю.І.Шиманського (архів Київського університету [391]), доктора фіз.-мат наук В.Л.Германа (архів Інституту радіофізики та електроніки НАН України [392]). Серед звітів наукових інститутів зазначимо звіти Інституту фізики НАН України, наприклад, звіт за 1947 р., де відображено становлення поняття полярону [393]. Цікавий документ, а саме, відгук про наукову роботу професора М.М.Боголюбова, підписаний академіками НАН України Г.В.Пфейффером та Н.М.Криловим, було знайдено у архіві Д.А.Граве Інституту рукопису ЦНБ НАН України [394]. Підтвердженням того, що завдяки зусиллям науковців України дослідження зі статистичної фізики стали пріоритетним напрямом фізичної науки країни, стала низка постанов Президії НАН України різних років, а саме “Про дослідження в галузі статистичної фізики” (постанова №110 від 12 березня 1980 р. [395]), прийняту після доповіді академіка І.Р.Юхновського; “Про створення у м.Львові Інституту фізики конденсованих систем” (постанова № 213 від 7 вересня 1990 р. [396]); “Про стан досліджень з фізики рідкого стану в Україні”, прийняту після обговорення доповіді члена-кореспондента НАН України М.Ф.Головка (постанова № 143 від 31 травня 2000 р. [397]). Надзвичайно корисними для встановлення невідомих сторінок біографії Т.О.Афанасьєвої-Еренфест є публікація у газеті „Новое время” некролога дядька (брата батька) вченої, у сім’ї якого вона виховувалась [398].

Під час дослідження вивчалися дисертаційні роботи на здобуття наукового ступеня кандидата або доктора історичних, фізико-математичних, філософських та педагогічних наук, тематика яких так чи інакше торкається питання розвитку досліджень у галузі статистичної фізики в світовій науці. Аналіз дисертацій та праць науковців дав змогу, зокрема, встановити наукові центри України, в яких набули формування та розвитку дослідження в даній галузі, а саме — університети та наукові інститути Харкова, Києва, Львова, Одеси, Донецька, Дніпропетровська. Відзначимо дисертацію 2002 р. Н.П.Форостяної на здобуття наукового ступеня кандидата педагогічних наук “Історичні аспекти у вивченні молекулярної фізики в середніх загальноосвітніх

навчальних закладах України” (спеціальність 13.00.02.-теорія та методика навчання фізики), у якій проведено комплексне дослідження розвитку молекулярної фізики в Україні у другій половині XIX ст. — на початку XX ст. як наукової дисципліни та її викладання в середній загальноосвітній та вищій школі [399]. Показано, що генезис та еволюція молекулярної фізики пов’язані, передусім, з діяльністю університетів і товариств, та обґрунтовано, що через історичний підхід активізується пізнавальна діяльність, тобто історичний аспект фізики виступає складовим компонентом сучасної методологічної науки. Корисною та ідейно близькою до розгляду методологічних проблем статистичної фізики виявилась також дисертація 2001 р. на здобуття наукового ступеня доктора педагогічних наук М.І.Садового “Теоретичні та методичні основи становлення та розвитку фундаментальних ідей дискретності та неперервності в курсі фізики загальноосвітньої школи” (спеціальність 13.00.02 — теорія і методика навчання фізики) [400]. У даній праці показано, що формування сучасного фізичного мислення має відбуватись на основі такої методичної системи, яка містить у собі узагальнені фізичні теорії та фундаментальні поняття науки. Внаслідок цього стане можливим створення у людини розуміння низки загальнонаукових понять, зокрема тих, що узагальнюють ймовірнісну ідею — властивостей і закономірностей об’єктів макро- та мікросвіту, співвідношення динамічних та статистичних законів природи, переходу від жорсткого детермінізму до ймовірнісно-статистичних уявлень, на основі яких формується відповідний ймовірнісний стиль мислення. Цікавою є також дисертація М.Н.Свиридонова 1974 р. на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук „Еволюція поняття необоротності у фізиці” [401].

Одним з цікавих джерел є наукове листування вчених. Так, аналіз наукового листування фізиків А.Йоффе та П.Еренфеста [402], між якими існували тісні творчі та дружні контакти, дав можливість вперше реконструювати життєвий і творчий шлях дружини П.Еренфеста — фізика і математика Т.О.Афанасьєвої-Еренфест, яка народилась у Києві і відома своїм внеском у розгляд питань необоротності процесів у природі та аксіоматичної побудови другого закону термодинаміки .

Джерельною базою слугували також проведені автором інтерв'ю та анкетування сучасних вчених, що працювали чи працюють у даній галузі. Це — академіки НАН України І.Р.Юхновський, С.В.Пелетминський, В.Г.Бар'яхтар, А.Г.Загородній, О.Г.Ситенко, Д.Я.Петрина; члени-кореспонденти НАН України В.П.Шелест, В.І.Фущич, М.Ф.Головко, І.М.Мриглод, К.М.Степанов, Е.Г.Петров; доктори наук Г.М.Зинов'єв, Б.В.Струминський, А.М.Федорченко, Ю.В.Слюсаренко; В.В.Красильников, О.Й.Соколовський, О.М.Тарасов, М.І.Шут, В.І.Герасименко, О.Л.Ребенко; кандидати наук О.Л.Іванків, О.В.Пацаган. За допомогою узагальнених результатів було встановлено сучасний стан розвитку проблеми, з'ясовано місце статистичної фізики в системі наук та її значення для побудови наукової картини світу, виявлено центри досліджень із статистичної фізики в Україні.

На основі використаної джерельної бази було здійснено порівняльний аналіз усіх фактів та відокремлені ті них, які є переконливими та об'єктивними, узагальнено наукові результати вітчизняних науковців та показано місце їх праць у світовому контексті. Однак, незважаючи на широке коло висвітлених питань, на сьогодні не існує комплексного дослідження становлення статистичної фізики в Україні, яке б містило у собі її передісторію і розглядало ці дослідження в Україні як органічну складову розвитку світової науки. Тому фундаментальна роль статистичної фізики в системі наук, а також те, що в цій галузі вченими України одержані фундаментальні результати, які не знайшли належного відображення в історико-науковій літературі, визначає безумовну актуальність проведення історико-наукового дослідження становлення даної галузі фізики в Україні.

Для досягнення цієї мети були поставлені та розв'язані наступні задачі: проведення послідовної історико-фізичної реконструкції становлення та розвитку статистичної фізики в Україні в світовому контексті, введення в науковий обіг маловідомих імен та фактів з історії статистичної фізики; розкриття та обґрунтування передумов виникнення статистичної фізики, встановлення основних етапів та пріоритетних результатів, що визначають ці етапи; аналіз передумов, які сприяли виникненню та розвитку досліджень у галузі статистичної фізики в Україні, а також

основних результатів у цій галузі; розгляд внеску українських вчених, наукових установ та наукових шкіл у формування уявлень сучасної статистичної фізики.

Дане дослідження ґрунтується на комплексному використанні принципів історизму та об'єктивності, які обумовлюють методи дослідження: порівняльно-історичний, предметно-логічний, системно-функціональний. Так, порівняльно-історичний метод дає можливість дослідити виникнення, формування та розвиток процесів і подій у хронологічній послідовності з метою виявлення внутрішніх та зовнішніх зв'язків, закономірностей та протиріч.

Предметно-логічний метод передбачає фізичний аналіз змісту оригінальних монографій та статей з точки зору сучасної науки, історико-науковий аналіз зіставлення різних джерел одне з одним та з загальною ситуацією в науці в певні хронологічні періоди, а також порівняльний аналіз праць українських та зарубіжних вчених з метою визначення внеску вітчизняних фізиків у світову науку, встановлення пріоритетів, та порівняння основних результатів з наявними відомостями в сучасній довідковій, біографічній та історико-науковій літературі.

Системно-функціональний підхід полягає у комплексному дослідженні великих і складних об'єктів (систем) (зокрема, такими системами виступають фізична наука в цілому, її галузі, наукові напрями, ідеї та теорії, процес інституціоналізації науки, наукові школи, особистість у науці тощо) та вивченні їх як єдиного цілого з узгодженням функціонування всіх елементів і частин системи. Такий підхід передбачає дослідження кожного елементу системи в його зв'язку та взаємодії з іншими елементами, виявлення впливу властивостей окремих частин системи на її поведінку в цілому, встановлення оптимальних та граничних умов функціонування системи.

Поєднання декількох із розглянутих методів дослідження дозволяє, не обмежуючись тільки систематизацією численного фактологічного матеріалу, максимально повно та всебічно вивчити предмет дослідження, вийти на рівень узагальнень.

Матеріали роботи мають теоретичне і практичне значення для подальшого історико-наукового дослідження генезису та еволюції фізичної науки в цілому, зокрема, фізики твердого тіла, ядерної фізики, фізики плазми. Їх широке застосування доцільне також при викладенні



курсів загальної фізики та історико-фізичних дисциплін в університетах, технічних та педагогічних вузах, у шкільних курсах фізики.

У перших двох розділах монографії викладається предмет, задачі та методологія цієї галузі фізичної науки, історія якої досліджується — статистичної фізики. Показано місце статистичної фізики в системі наук, сферу її застосування, ключове значення для формування нового ймовірнісного стилю мислення у природознавстві та побудови наукової картини світу. На прикладі статистичної фізики як фундаментальної теорії сучасного природознавства розглядаються численні концептуальні підходи до розгляду феномену науки в цілому та критерії визначення фундаментальних ідей та теорій. Доведено ключове місце статистичної фізики в структурі сучасної наукової картини світу та її фундаментальне значення для формування нового ймовірнісного стилю мислення у природничих науках, яке визначається тим, що дана теорія встановлює зв'язок між мікроскопічними та макроскопічними властивостями матерії. Вперше проаналізовано та систематизовано різні визначення предмету статистичної фізики. Виявлено, що у хронологічно більш ранніх визначеннях (до кінця 60-х рр. ХХ ст.) статистичною механікою називають розділ фізики, який вивчає тільки рівноважні властивості динамічних систем. У хронологічно більш пізніх працях переважно стверджується, що статистична фізика складається з двох розділів — рівноважної та нерівноважної статистичної фізики. Така зміна опису предметної галузі статистичної фізики розглядається нами як результат усвідомлення принципової ролі нерівноважних процесів та відображення загальнонаукової тенденції побудови єдиного підходу до опису явищ природи.

Запропоновано новий методологічний критерій виявлення фундаментальних ідей та теорій сучасного природознавства: вважати фундаментальними ті ідеї та теорії, з появою яких пов'язана зміна наукових картин світу та оновлення категоріальних структур наукового знання. Побудовано та обґрунтовано періодизаційну схему статистичної фізики в хронологічних межах IV ст. до н.е. – 60-ті рр. ХХ ст., яка складається з наступних періодів: виникнення атомістичних уявлень та побудова атомістичної картини світу (IV ст. до н.е. – XVII ст.); створення основ молекулярно-кінетичної теорії (початок

XVIII ст. – середина XVIII ст.); формування термодинаміки як науки (1824–50-ті рр. XIX ст.); формування рівноважної статистичної фізики як синтезу молекулярно-кінетичних та термодинамічних уявлень (60-ті рр. XIX ст.–20-ті рр. XX ст.); створення нерівноважної статистичної фізики (30–60-ті рр. XX ст.)

У третьому розділі детально висвітлюються етапи формування статистичної фізики, тобто світовий контекст, а також стан статистичної фізики на початку 30-х рр. XX ст., коли відбувалось становлення даної галузі в Україні. З'ясовується та обґрунтовується значення для формування статистичної фізики ідеї атомізму, молекулярно-кінетичної теорії та її синтезу з термодинамічними уявленнями наприкінці XIX–на початку XX ст. Прослідковується зародження поняття статистичного закону у працях Дж.Максвелла, Л.Больцмана, Дж.Гіббса, а також узагальнення поняття причинності у фізиці, результатом якого стало створення квантової механіки і нових квантових статистик Бозе–Ейнштейна та Фермі–Дірака, які відіграли важливу роль у розвитку фізики конденсованих середовищ та теорії твердого тіла. Пропонується періодизаційна схема розвитку статистичної фізики.

У четвертому розділі монографії розкривається передісторія статистичної фізики в Україні в хронологічних межах XIX–XX-х рр. XX ст. З'ясовано, що вперше питання щодо пояснення будови матерії почало розглядатись в Україні в XVII–XVIII ст. науковцями Києво-Могилянської академії І.Гізелем, Ф.Прокоповичем, М.Козачинським, Г.Кониським та Г.Щербацьким, які вважали матерію основою природних речей і головним об'єктом фізики та сформулювали погляд про її єдність і однорідність.

Протягом другої половини XIX ст. в Україні було виконано ряд експериментальних робіт, які сприяли дослідженню кола явищ, що склали феноменологічну базу становлення статистичної фізики. Це праці в галузі критичного стану речовини професора Київського університету М.П.Авенаріуса; праці з молекулярної фізики, реології дисперсних систем та високомолекулярних сполук ректора Одеського університету Ф.Н.Шведова; праці в галузі термодинаміки та дифузії професора Одеського університету М.О.Умова, праці щодо термодинамічного потенціалу професорів Харківського університету М.Д.Пильчикова та О.П.Грузинцева.

Експериментальні роботи сприяли формулюванню на їх базі теоретичних узагальнень. Одним з перших став Маріан Смодуховський, який працював у Львівському університеті протягом 1898–1913 рр. та створив у 1906 р. незалежно від А.Ейнштейна теорію броунівського руху.

Розробка оригінального підходу до статистичного обґрунтування II закону належить першому послідовнику ідей Л.Больцмана на теренах України М.М.Пирогову. Систематична розробка аксіоматичного підходу до побудови термодинаміки — завідувачу кафедри фізики Київського університету М.М.Шиллеру. Суттєвим результатом, одержаним нашою співвітчизницею, яка народилась у Києві, Т.О.Афанасьєвою-Еренфест у 1925–1928 р., став висновок, що II закон термодинаміки можна обґрунтувати лише за допомогою аксіом, що перевіряються експериментально. Ці праці сприяли осмисленню статистичного підходу та усвідомленню сфери його застосування, ставши підґрунтям розвитку статистичної фізики в Україні. Нами також вперше відтворено наукові біографії фізиків-теоретиків Т.О.Афанасьєвої-Еренфест та М.М.Пирогова. Зокрема, доведено, що Т.О.Афанасьєва-Еренфест є уроженкою Києва та у 1927–1928 рр. викладала у Симферопольському педагогічному інституті. Знайдено також місце поховання М.М.Пирогова у Вінниці.

У п'ятому розділі розглянуто становлення статистичної фізики в Україні у 30–40 рр. ХХ ст. Тут показано виникнення нерівноважної статистичної фізики (світовий контекст) (Л.Онсагер, Ж.Івон, М.Борн, Г.Грін, Дж.Кірквуд) та обґрунтовано, що початок систематичних досліджень у галузі розбудови методів статистичної фізики та їх застосування в фізиці твердого тіла, ядерній фізиці, фізиці плазми та магнетизмі пов'язаний з науковою та педагогічною діяльністю засновника харківської теоретичної школи Л.Д.Ландау в Харківському фізико-технічному інституті та у Харківському університеті у 1932–1937 рр. Л.Д.Ландау був одним з найяскравіших представників теоретичної фізики, і останніх вчених-універсалів, який здійснив значний вплив на її формування та становлення. Його наукові праці стосуються різних розділів теоретичної фізики — квантової механіки, фізики твердого тіла, квантової теорії поля, фізики елементарних частинок, статистичної фізики. Результати Л.Д.Ландау в галузі статистичної фізики пов'язані перш за все з його фундаментальними працями з теорії фазових переходів II роду, теорії плазми та статистичної теорії ядра, які були виконані в цей пері-

од. На основі раніше невідомих архівних джерел висвітлено діяльність одного з маловідомих учнів Д.Д.Ландау харківського періоду — завідувача кафедри теоретичної механіки Харківського університету та теоретичного відділу Інституту радіофізики і електроніки НАН України В.Л.Германа, який розв'язав ряд важливих задач статистичної радіофізики, побудував статистичні теорії розсіяння, поглинання та поширення радіохвиль.

Початок історії нерівноважної термодинаміки можна датувати 1931 р., коли вийшли дві праці норвезького фізико-хіміка Л.Онсагера, де було намічено єдиний підхід до розгляду нерівноважних процесів. Необхідність розробити загальну точку зору щодо таких процесів обумовила низку праць — М.М.Боголюбова, М.Борна, Г.Грина, Дж.Кірквуда, Ж.Івона. Монографія М.М.Боголюбова «Проблеми динамічної теорії в статистичній фізиці» 1946 р. стала початком широкомасштабних досліджень із статистичної фізики в Україні, оскільки запропонована вченим ідея про ієрархію часів релаксації та ланцюжок рівнянь для функцій розподілу була одразу сприйнята науковою спільнотою в Україні. Фундаментальним внеском у квантову статистичну фізику стали також роботи М.М.Боголюбова з побудови мікроскопічної теорії надплинності у 1947 р. Висвітлено також генезис появи робіт із статистичної фізики в творчості М.М.Боголюбова, що було обумовлене, зокрема, його попередніми роботами в галузі математичної фізики та теорії динамічних систем. Серед учнів і послідовників М.М.Боголюбова в Україні, які розробляли та узагальнювали його ідеї в галузі статистичної фізики, можна назвати академіків НАН України І.Р.Юхновського, С.В.Пелетмінського, Д.Я.Петрину, О.Г.Ситенка, А.Г.Загороднього, членів-кореспондентів НАН України В.П.Шелеста, Е.Г.Петрова, М.Ф.Головка та І.М.Мриглода, докторів наук Г.М.Зинов'єва, Б.В.Струмінського, А.Н.Тавхелідзе, А.М.Федорченка, І.О.Вакарчука, Ю.К.Рудавського, З.О.Гурського, В.І.Герасименка, О.А.Ребенка, В.І.Скрипника, М.С.Гончара та інших.

Важливим напрямом для формування уявлень про конденсований стан матерії є вивчення речовини в рідкому стані. Академік НАН України В.І.Данилов був одним з фундаторів фізики рідкого стану в Україні, створив наукову школу в цій галузі у Дніпропетровському університеті, Дніпропетровському фізико-технічному інституті, Інституті металофізики НАН України. Його праці з дослідження процесів будови та

кристалізації рідин стали теоретичним підґрунтям основного напрямку розвитку фізичного матеріалознавства в Україні — термічної обробки сплавів, зокрема, сталі.

Розвиток досліджень із статистичної фізики в Україні статистичної фізики в Україні пов'язаний також з працями Харківського та Дніпропетровського фізико-технічного інститутів, Інституту фізики, Інституту математики, Інституту металофізики, Харківського, Київського, Дніпропетровського, Львівського та Одеського університетів, а пізніше – Інституту теоретичної фізики, Інституту фізики конденсованих систем, Донецького фізико-технічного інституту, Фізико-технічного інституту низьких температур.

## РОЗДІЛ 1. ПРЕДМЕТ ТА ЗАДАЧІ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ

Сучасна статистична фізика є самостійним розділом теоретичної фізики, у якому вивчаються специфічні закономірності макроскопічних систем, що складаються з дуже великого, практично незліченного числа однакових частинок (атомів, молекул, електронів, фотонів, квазічастинок), виходячи з властивостей цих частинок та взаємодії між ними. Такими системами, зокрема, є макроскопічні тіла, гази, кристали. Саме велика кількість частинок обумовлює появу нових закономірностей поведінки таких систем — статистичних законів, яким притаманний ймовірнісний характер. Статистичні закони не можуть бути зведені до динамічних законів, оскільки стають незмістовними при переході до систем з малою кількістю частинок. Як критерій кількості частинок правомірно вибрати число Авогадро  $N_A$  ( $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$ ), тому що саме тоді, коли розглядається система з кількістю частинок, які містяться в одному молі чи частках моля речовини, вже починають виявлятися її макроскопічні властивості, які можна безпосередньо спостерігати та кількісно виміряти. Характерна особливість статистичних закономірностей виявляється в тому, що їх поведінка не залежить від конкретних початкових умов. Зокрема, відомим є такий експериментальний факт: система, в якій відсутні зовнішні впливи, з часом прямує до стану термодинамічної рівноваги.

Для розв'язку задач статистичної фізики як теорії багаточастинкових систем використовуються методи теорії ймовірностей та опис елементів системи в рамках гамільтонова формалізму в  $6N$ -мірному фазовому просторі. Тому важливими поняттями статистичної фізики є ймовірність, фазовий простір, функція розподілу ймовірностей, інтеграл станів, статистична вага.

Роль статистичної фізики не обмежується розвитком власного формалізму та розглядом конкретних застосувань. Досліджуючи колективні властивості систем, які не залежать від специфікації частинок,

статистична фізика пов'язує між собою різні галузі природознавства та слугує провідником ідей між ними, що в свою чергу, сприяє прогресу самої статистичної фізики як науки. Так, ідея про спонтанне порушення симетрії, яка виникла спочатку у фізиці твердого тіла та оформилась у статистичній фізиці в концепцію квазісередніх, послужила основою для формулювання теорії, що об'єднала електромагнітні та слабкі взаємодії у фізиці елементарних частинок. Розгляд лазерної генерації, хімічної реакції Белоусова-Жаботинського та ряду інших процесів у макроскопічних системах з постійним потоком енергії привів до створення нової наукової дисципліни — синергетики, яка вивчає явище самоорганізації у фізичних, хімічних та інших системах. Зазначимо, що така роль статистичної фізики в інтеграції науки є особливо важливою у зв'язку із загальною тенденцією до вузької спеціалізації природничонаукових дисциплін.

Головна задача статистичної фізики полягає у визначенні макроскопічних характеристик системи через властивості частинок та взаємодій між ними, тобто за допомогою цієї теорії можна досліджувати співвідношення між мікроскопічним та макроскопічним рівнями опису дійсності. Виявляється, такий зв'язок можливо встановити, оскільки теорія вимагає обчислення у даний момент часу не точних, а середніх значень параметрів. Термодинамічні ж співвідношення зберігаються при цьому як точні, але для даних середніх величин. Саме тому відомий бельгійський фізик р.Балеску образно назвав статистичну фізику „механікою перенесення” («transfer mechanics») за аналогією з „транспортною РНК” («transfer RNA») у молекулярній біології, роль якої полягає у перенесенні інформації з мікроскопічного на макроскопічний рівень.

Серед всіх розділів теоретичної фізики статистична фізика посідає одне з важливих місць, оскільки вона вивчає макроскопічні тіла, які оточують людину. Проте на відміну від інших розділів фізики, які також вивчають макроскопічні тіла (термодинаміка, механіка, електродинаміка суцільних середовищ), вона є мікроскопічною теорією, яка встановлює зв'язок між спостережуваними термодинамічними характеристиками фізичних тіл та законами руху атомів і молекул. Тому такий великий діапазон має шкала температур і явищ, при описі яких застосовуються закони статистичної фізики — від гелієвих температур до високотемпературної

плазми. Методи статистичної фізики використовуються в молекулярній фізиці, фізиці твердого тіла, ядерній фізиці, радіофізиці, астрофізиці, оптиці, біофізиці, техніці при описі агрегатних станів, фазових переходів, плазми, електропровідності, теплоємності, флуктуації, електронів в металах, електролітів, макромолекул, важких ядер. В останні роки коло застосувань статистичної фізики розширюється, формуючи важливий для сучасної фізичної картини світу синергетичний підхід.

Знайти точний розв'язок рівнянь руху для систем багатьох частинок, взагалі кажучи, неможливо, оскільки всі необхідні для їх розв'язку початкові значення координат та імпульсів атомів невідомі. Статистична фізика вирішує цю проблему, розглядаючи всі можливі стани, у яких може перебувати система, та визначаючи ймовірність реалізації кожного стану. Розраховуючи за цими станами середнє від фізичної величини з деякою ваговою функцією, можна одержати певну макроскопічну картину. „В той час як „звичайна” механіка не може знайти точний розв'язок навіть проблеми трьох тіл, статистична механіка, використовуючи перевагу великого числа  $N$  ступенів вільності, намагається формулювати точні асимптотичні результати при  $N$ , що прямує до нескінченності», — писав р.Балеску [403, с.1178].

Статистична механіка виходить із припущення, що кожен визначений макроскопічний стан (який характеризується невеликим числом макроскопічних динамічних величин) може бути реалізований надзвичайно великим числом мікроскопічних конфігурацій у фазовому просторі. При цьому макроскопічна величина  $G$ , що є функцією координат  $(x, y, z)$  у тривимірному фізичному просторі  $G(x, y, z)$ , може бути подана як результат усереднення відповідних динамічних функцій координат фазового простору  $g(p, q)$ . Так, Л.Больцман розглядав макроскопічні величини як середнє за нескінченним проміжком часу від відповідних мікроскопічних величин, аргументуючи це тим, що вимірювання макроскопічної величини завжди вимагає кінцевого інтервалу часу:

$$G = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T g(p, q) dt$$



Інша задача — обчислення середнього значення мікроскопічної динамічної величини за траєкторією — обумовила розвиток нового напрямку динаміки — ергодичної теорії, яка вивчає загальну природу і стійкість траєкторій динамічної системи.

У 30-ті роки ХХ століття група математиків, у числі яких були Дж. фон Нейман, Г. Біркгоф і Е. Хопф, вивчаючи різні типи гідродинамічних потоків у фазовому просторі, наштовхнулися на проблему стійкості траєкторій динамічних систем. Використовуючи введене Лебегом поняття скінченної області фазового простору як розширення поняття об'єму  $V$  деякої області фазового простору, яке виявилось надзвичайно плідним для подальших досліджень у галузі ергодичної теорії, а також статистичної механіки, вони одержали такий вираз:

$$V(\gamma) = \int_{\gamma} dp_1 \dots dp_N dq_1 \dots dq_N.$$

Міра  $\mu$  скінченної області  $\gamma$  фазового простору  $\Gamma$  визначається за допомогою певної невід'ємної функції  $f(p, q) \geq 0$  у такий спосіб:

$$\mu(\gamma) = \int_{\gamma} d\mu = \int_{\gamma} f(p, q) dp dq$$

за умови, що міра усього фазового  $\Gamma$ -простору  $\mu(\Gamma)$  нормована на одиницю:

$$\mu(\Gamma) = \int_{\Gamma} d\mu = \int_{\Gamma} f(p, q) dp dq = 1.$$

Концепція міри є не менш важливою й у теорії ймовірностей, оскільки динамічну мікроскопічну величину  $g$  можна інтерпретувати як випадкову змінну. Тоді замість однієї мікроскопічної системи розглядається нескінченна множина тотожних копій цієї системи, що розрізняються за конфігураціями і швидкостями. У такий спосіб ураховується кожна уявлювана комбінація конфігурацій і швидкостей, а безліч таких систем називається ансамблем. При цьому кожній точці фазового простору відповідає одна система, що характеризується конкретними значеннями конфігурацій і швидкостей. Щільність розподілу точок, що характе-

ризують  $f(p,q)$  (це збігається зі значенням міри, введеної дещо в іншому контексті), інтерпретується як густина ймовірності знаходження системи в даній точці фазового простору, а міра області у фазовому просторі — як ймовірність перебування системи в даній області.

Згідно з ергодичною теорією, для певного класу динамічних систем усереднення за часом може бути замінене на статистичне усереднення за ансамблем, однорідно розподіленим на енергетичній поверхні. У такому випадку динамічна задача обчислення середнього значення величини  $g$  за траєкторією окремої системи, що практично була нерозв'язною, замінюється набагато простішою задачею обчислення середнього значення цієї ж величини на енергетичній поверхні.

У цьому випадку макроскопічна динамічна величина визначається як середнє значення змінної  $G$ , що відповідає даному розподілу ймовірності:

$$G = \int g d\mu = \int f(p,q)g(p,q)dpdq .$$

Дана формула, що постулює зв'язок між макроскопічними величинами  $G(x,y,z;t)$  і відповідними мікроскопічними величинами  $g(p,q;t)$ , містить у собі немеханічний, статистичний елемент — вибір функції розподілу  $f(p,q)$ . Її вибирають так, щоб якнайповніше врахувати всю доступну інформацію про систему, тобто щоб значення обчислених середніх макроскопічних величин  $G$  збігалися зі значенням відповідних макроскопічних характеристик системи, одержаних в експерименті. Правильно вибрана функція розподілу  $f(p,q)$  повністю визначає стан макроскопічної системи в даний момент часу. Цей стан задається тепер нефіксованою точкою  $(p, q)$  у фазовому просторі, але кожна точка фазового простору в даний момент  $t$  являє собою можливий стан системи з певною «вагою», що відповідає значенню функції розподілу  $f(p,q)$  у цій самій точці. Після того, як вибір функції  $f(p,q)$  зроблено, подальша еволюція розподілу строго визначається законами гамільтонової механіки. Саме у такий спосіб здійснюється контакт між статистичною механікою і реальністю.

Завдяки ергодичній теорії вдалося показати надзвичайно складну поведінку динамічних систем. Виявилось, що окрема динамічна система протягом своєї еволюції виявляє численні особливості, що традицій-

но розглядалися як виключно статистичні. Разом з цим багато важливих властивостей термодинамічних систем можна пояснити, тільки якщо розглядати їх як властивості дуже великої динамічної системи.

Слід зазначити, що хоч ергодична проблема являє собою класичне питання, яке традиційно зв'язувалось з питанням обґрунтування статистичної механіки від часу її зародження, проте сучасний розвиток ергодичної теорії все більше відокремлює її від статистичної механіки. Сьогодні вважається, що ергодична гіпотеза не є ані необхідною, ані достатньою для обґрунтування статистичної механіки, яке може полягати в тому, щоб розглядати середне за ансамблем як початкове визначення макроскопічних динамічних функцій, а уявлення про ансамбль — як постулат.

Зв'язок статистичної механіки і термодинаміки можна здійснити шляхом побудови спеціального термодинамічного процесу, що дозволяє обчислювати деяку функцію  $A(T,V,N)$  (яка має формальні властивості термодинамічної вільної енергії) через статистичну суму  $Z = \int e^{-\beta H(p,q)} dp dq$  у вигляді  $A = -k T \ln Z$ .

Вільна енергія  $A(T,V,N)$  є термодинамічним потенціалом, знаючи який, можна обчислити всі інші термодинамічні функції. Очевидно, що статистична сума  $Z$  відіграє найважливішу роль у рівноважній статистичній термодинаміці, оскільки вона містить у собі всю інформацію про термодинамічні властивості рівноважної системи.

Макроскопічне спостереження надає інформацію щодо невеликого числа макроскопічних характеристик системи (таких, як густина, температура тощо), з якими можуть бути сумісні механічні початкові умови величезного числа мікросистем. У цьому полягає реалістичність статистичних ансамблів: задаючи всі дані, відомі про досліджувану макроскопічну систему, можна побудувати ансамбль систем однакової природи, але з різними конфігурацією і швидкостями частинок у нульовий момент часу. При цьому слід враховувати кожен можливу комбінацію конфігурацій і швидкостей, і кожній комбінації має задаватися деяка «вага»  $\mu$ , така, щоб обчислені за формулою

$$G = \int g d\mu = \int g(p,q) f(p,q) dp dq$$

макроскопічні величини  $G$  збігалися зі значеннями, одержаними експериментально. Після цього вивчається еволюція вихідного ансамблю, тобто досліджується, як розподіляється число мікроскопічних систем за різними конфігураціями і швидкостями у будь-який момент часу, відмінний від початкового. Основним рівнянням при цьому є рівняння Ліувілля. Такого роду передбачення надзвичайно точно підтверджуються експериментально, тому саме цей факт слугує обґрунтуванням методів статистичної механіки.

Слід зазначити, якщо на першому етапі побудови статистичної механіки процеси на мікроскопічному рівні описувалися законами класичної механіки, то після створення квантової механіки для цього стали застосовувати її закони. Формалізм статистичної механіки не залежить від прийнятого способу опису на молекулярному — квантового чи класичного. Статистичні методи з точки зору обчислення ймовірностей є однаковими незалежно від прийнятої моделі будови речовини. Так, рівноважні системи мають стабільні середні параметри, тому функції розподілу залежать від інтегралів руху, зокрема від повної енергії системи. У класичній механіці ця енергія визначається функцією Гамільтона, яка є функцією координат та імпульсів, а в квантовій механіці вона є дискретним набором власних значень, що впливають з рівняння Шредінгера для розглядуваної системи.

Такі фундаментальні побудови, як три рівноважні ансамблі статистичної механіки — мікроканонічний (для адіабатних систем частинок), канонічний (для рівноважних термодинамічних підсистем, які входять у більшу загальну систему (термостат), слабо зв'язані з нею і містять у собі сталу кількість складових частинок) і великий канонічний (для змінюваної кількості частинок при взаємодії системи з навколишнім середовищем), а також еквівалентність цих ансамблів сьогодні строго обґрунтовані як для класичної, так і для квантової статистичної механіки, виняток становить тільки область фазових переходів. Цей факт відображає фундаментальну структурну єдність статистичної механіки: системи, досліджувані статистичною механікою, належать до класу систем, описуваних динамікою Гамільтона. Розглядаючи сучасне трактування та розуміння предмету статистичної фізики, слід зазначити, що було проаналізовано більше ніж 150 енциклопедичних та монографічних видань і зна-

йдено 22 визначення поняття „статистична фізика”. Виявилось, що вони суттєво розрізняються як за глибиною тлумачення предмету дослідження, так і за відображенням принципового для цієї галузі взаємозв'язку між мікрорівнем та макрорівнем опису дійсності.

Так, означення Д.М.Зубарева та С.В.Тябликова [404,с.72] передбачає розгляд у статистичній фізиці систем з величезною кількістю частинок, у визначеннях Л.П.Питаєвського, [405,т.4,с.665], Ю.Л.Климонтовича [406,с.18], Л.Д.Ландау і Є.М.Ліфшиця [407,с.13], Ф.Куні [408,с.6] предмет статистичної фізики зведено до макроскопічних тіл.

При цьому Л.П.Питаєвський та Ю.Л.Климонтович розглядають як еквівалентні поняття „макроскопічне тіло” та „система, що складається з величезного числа однакових частинок”, в той час як друге поняття вочевидь не вичерпується тільки макроскопічними тілами.

Означення р.Балеску [409,т.1,с.13] розширює предмет статистичної фізики до всіх макроскопічних явищ, водночас звужуючи поняття „частинка” лише до атомів і молекул. Таке ж трактування поняття „частинка” дають Т.Хілл [410,с.9], А.Ісіхара [411,с.8], К.Хуанг [412,с.157], К.Хір [413,с.215], Л.Д.Ландау та Є.М.Ліфшиць [407,с.13], О.Г.Ситенко [414,с.442].

Детальний опис структури розглядуваної системи в більшості означень взагалі відсутній. Тільки Ю.Л.Климонтович [406,с.18] та Л.В.Радушкевич [415,с.5] вважають число частинок в системі „величезним”, якщо за порядком величини воно зрівнюється з числом молекул в одному молі речовини — числом Авогадро. Саме тоді починають виявлятися такі властивості, які піддаються безпосередньому спостереженню та кількісному виміру (це тлумачення макроскопічності явища дається також в означенні Я.І.Френкеля).

У більшості означень (Л.П.Питаєвський [405,т.4,с.665] О.Г.Ситенко [414,с.442], р.Балеску [403,с.1178; 409,т.1,с.13], Т.Хілл [410,с.9], М.О.Леонтович [416,с.163], Я.І.Френкель [417,с.5], К.Хуанг [412,с.157], Я.П.Терлецький [418,с.7], Ю.Б.Румер та М.Ш.Ривкін [419,с.11], В.Г.Левич [420,с.12–13]) авторами підкреслюється така глибинна властивість статистичної фізики, як виведення макроскопічних властивостей системи через властивості мікрочастинок та взаємодій між ними. Проте в низці означень, наприклад Д.М.Зубарева та С.В.Тябликова [404,с.72],

Ю.Л.Климонтовича [406,с.18], Л.В.Радушкевича [415,с.5] акцент на цьому принциповому моменті не робиться.

Той фундаментальний факт, що статистичний закон є особливим типом законів, які не зводяться до динамічних законів, відображено в не багатьох означеннях, наприклад Л.Д.Ландау і Є.М.Ліфшиць [407,с.13], К.Хір [413,с.219], Ф.Куні [408,с.6], тому ці означення видаються більш загальними.

З нашої точки зору, адекватним за загальним характером введення предмету дослідження статистичної фізики, а також за відображенням специфічної ролі статистичної фізики як теорії, яка здійснює зв'язок між мікроявищами та макроявищами, є, наприклад, означення р.Балеску: "Статистична механіка — це механіка великих ансамблів, які складаються з відносно простих систем (таких, як молекули в газі, атоми в кристалі, фотони в лазерному пучку, зірки в Галактиці, автомобілі на дорозі, люди в соціальній групі). Головна мета цієї науки полягає в тому, щоб зрозуміти поведінку ансамблю в цілому на основі поведінки систем, які його складають" [409,т.1,с.13].

При аналізі даних означень нами було з'ясовано, що часто авторами без додаткових обговорень використовуються як синоніми такі терміни: „статистична фізика”, „статистична механіка”, „кінетична теорія матерії”. Проте вказує на це лише М.О.Леонтович [416,с.163].

Аналіз даних означень показує також, що спроба розділити явища на нерівноважні процеси та рівноважні стани іноді призводить до термінологічних розбіжностей. Так, деякі автори (К.Хуанг [412,с.157], Дж.Уленбек і Дж.Форд [421,с.13], В.Г.Левич [420,с.12–13] пропонують називати статистичною механікою (або статистичною термодинамікою) розділ фізики, який вивчає тільки рівноважні властивості динамічних систем і не розглядає процес наближення до стану рівноваги.

Теорію процесів в даних системах пропонується називати фізичною кінетикою (М.О.Леонтович [416,с.163]). У той же час інші автори хронологічно більш пізніх робіт стверджують, що статистична фізика складається з двох розділів — рівноважної та нерівноважної статистичної фізики (Я.П.Терлецький, [418,с.7]). У першому розділі розглядаються ймовірності та середні, які не залежать від часу, а

в другому — які залежать від часу. Нам таке тлумачення видається більш прийнятним через спільність підходу до явищ природи.

Структура статистичної фізики залежно від явища, яке розглядається, а також від вибраної моделі будови речовини може бути відображена у спосіб, наведений у Таблиці 1 (Я.П.Терлецький [418,с.8]):

Таблиця 1.

<b>Тип процесів</b>	<b>Класична модель</b>	<b>Квантова модель</b>
<i>Рівноважні стани</i>	Класична статистика рівноважних станів (статистична механіка)	Квантова статистика рівноважних станів (квантова статистика)
<i>Нерівноважні процеси</i>	Класична теорія нерівноважних процесів (класична кінетика)	Квантова теорія нерівноважних процесів (квантова кінетика)

## РОЗДІЛ 2. СТАТИСТИЧНА ФІЗИКА ТА НАУКОВА КАРТИНА СВІТУ

Створення статистичної механіки у ХІХ століття на основі уявлення про те, що існують принаймні два рівні опису природи — макроскопічний і мікроскопічний, призвело до глибоких і всеосяжних змін усієї схеми фізичного пояснення явищ та самого методу наукового мислення. Один із фундаторів статистичної фізики Дж.Гіббс зазначав: „Незважаючи на те, що своїм виникненням статистична механіка завдячує дослідженням у галузі термодинаміки, вона, вочевидь, значною мірою заслуговує на незалежний розвиток завдяки як елегантності та простоті своїх принципів, так і новим результатам, висвітленню старих істин у галузях, зовсім далеких від термодинаміки” [422,с.13].

Американський фізик Ч.Кіттель писав, що „статистичній фізиці притаманні витонченість філософського аспекту її основних положень, вишуканість математичного апарату, який використовується при розв’язанні її задач, а також широта застосувань у астрофізиці, біології, фізиці твердого тіла та ядерній фізиці, техніці зв’язку та математиці” [423, с.7]

Відкриття Л.Больцманом статистичної природи другого закону термодинаміки вплинуло на розвиток не тільки термодинаміки, а й багатьох розділів фізики. Воно по-новому висвітлило старі проблеми і поставило низку фундаментальних методологічних питань — про співвідношення між динамічними і статистичними закономірностями, про статистичний детермінізм, про напрям часу.

До досліджень Больцмана в фізиці був відомий тільки один тип закономірностей — динамічні закономірності, що, наприклад, становили фундамент причинно-наслідкових зв’язків у механіці. До кінця ХVІІІ століття математичний апарат механіки було остаточно розроблено. Виходячи з основних диференціальних рівнянь руху, записаних згідно з законами Ньютона, і знаючи діючі на дану систему сили і початкові



значення координат і швидкостей тіл, що утворюють цю систему, можна було однозначно визначити траєкторію руху, швидкості і положення тіл, які рухаються у просторі у кожний наперед заданий момент часу. Таким чином, закони динаміки дали змогу вченим передбачати з великим ступенем точності поведінку механічних систем у майбутньому. Це, а також розвиток теорії електромагнітного поля Максвелла, стало основою для сприйняття динамічних законів як абсолютно універсальних.

Першим, хто сформулював загальний філософський “принцип механічної причинності” для Всесвіту, став П.Лаплас. “Якби розум у будь-який момент часу знав усі сили, що діють у природі, і відносне розташування її складових частин, якби він, крім того, був такий великий, щоб міг проаналізувати ці дані, то описав би єдиною формулою рухи найбільших тіл у Всесвіті і найлегшого атому; для нього не було б нічого неясного, і майбутнє, як і минуле, було б у нього перед очима... Крива, яку описує молекула повітря або пари, керується настільки ж строго і визначено, як і планетні орбіти: між ними лише та різниця, що ми не уявляємо цього”, — писав він [424, с.364–365].

Така точка зору була названа лапласівським (або механічним) детермінізмом. Узагальнюючи, ми приходимо на основі цього до поняття динамічної закономірності: при заданих зовнішніх впливах початковий стан однозначно визначає майбутню поведінку системи. Завдяки дослідженням Больцмана така точка зору потребувала перегляду. Дійсно, оскільки в цей період механічний детермінізм уявлявся єдиним видом причинного зв'язку, то передбачалося, що якби було можливо простежити за траєкторією кожної молекули, то майбутній стан молекулярної системи можна було б визначити, не використовуючи метод теорії ймовірностей. Вважалося також можливим зведення статистичних закономірностей до динамічних. Одна з причин такого уявлення полягала в тому, що самі статистичні закономірності були вперше отримані на основі динамічних рівнянь механіки, яким і приписувалася первинна роль.

Оскільки відповідно до лапласівського детермінізму будь-яка наступна подія була передбачена попередньою подією, то випадкова подія вважалася такою, що виникає за рахунок недостатності знання початкових умов і тому не має об'єктивного характеру. Сучасна наука розглядає

динамічні і статистичні закономірності як невіддільні і водночас такі, що не зводяться одна до одної. Динамічні закономірності відображають ті випадки причинного зв'язку, коли основну роль у поведінці даної системи відіграють початкові умови, а статистичні закономірності — ті випадки, які своїми основними рисами обумовлені масовим характером явищ або процесів. Особливість статистичної закономірності полягає в тому, що, відображаючи об'єктивно існуючі зв'язки великої сукупності випадкових подій, вона начебто відводить на другий план індивідуальні властивості окремих інгредієнтів.

З часом виявилось, що ймовірна концепція, яка виникла при створенні статистичної механіки, є фундаментальною і покладена у саму природу речей. Це стало зрозумілим після створення квантової механіки, закони якої передбачають принципову статистичність у поведінці мікрооб'єктів. Таким чином, створення статистичної механіки склало базу формування ймовірного стилю мислення у природознавстві в цілому. З цього приводу відомий математик Н.Вінер навіть стверджував, що “саме Гіббсу, а не Альберту Ейнштейну, Вернеру Гейзенбергу чи Максу Планку ми повинні приписати першу велику революцію в фізиці ХХ сторіччя” [425,с.26].

Крім того, статистична фізика запровадила у фізику розуміння того, що необоротні процеси відіграють фундаментальну і конструктивну роль у фізичному світі. Поняття необоротності процесів у природі виявляється ключовим для нерівноважної статистичної механіки. Оскільки елементарна симетрія руху окремих частинок може порушуватись у великих ансамблях частинок, тому властивості ансамблю в цілому можуть якісно повністю відрізнятись від властивостей індивідуальних компонент. Яскравим прикладом цього є неінваріантність обернення (інверсії) часу, завдяки чому існує його виділений напрям (від минулого до майбутнього). Це виявляється не тільки рухом стрілки годинника, а й безпосередньо у подіях, таких як синтез і розпад, народження і смерть. Тому відповідь на питання, чому ізольована макроскопічна система поводить себе суттєво необоротним чином, прямуючи до рівноваги, тоді як мікроскопічні рівняння руху є оборотними, дотепер залишається одним з центральних у статистичній фізиці.

Слід зазначити, що хоч до середини ХІХ ст. теорія ймовірностей уже була досить розвинута, проте до робіт Больцмана проблеми, які ви-

никали в ній, не виходили за рамки математичних і не торкались фізики. Той факт, що статистичні закономірності є по суті окремим типом законів природи, був усвідомлений р.Клаузіусом та Дж.Максвеллом і остаточно утверджений Л.Больцманом після статистичної інтерпретації другого закону термодинаміки.

Сучасна наука розглядає динамічні і статистичні закономірності як невіддільні і водночас такі, що не зводяться одна до одної. Динамічні закономірності відображають ті випадки причинного зв'язку, коли основну роль у поведінці системи відіграють початкові умови, а статистичні закономірності — випадки, обумовлені переважно масовим характером явищ або процесів. Таким чином, до формулювання статистичних законів було вперше введено об'єктивну випадковість, при цьому необхідності, які покладено в її основу, подаються розподілом ймовірностей. При цьому загальний принцип причинності набув нового розвитку і збагатився новим змістом.

Дослідженням макроскопічних тіл займаються також і інші розділи фізики — термодинаміка, механіка та електродинаміка суцільних середовищ, гідродинаміка. Однак при розв'язанні конкретних задач методами цих дисциплін у відповідні рівняння завжди входять невідомі параметри чи функції, які характеризують тіло. Наприклад, для розв'язання задач гідродинаміки необхідно знати рівняння стану рідини чи газу, теплоємність рідини, її коефіцієнт в'язкості тощо. Всі ці залежності і параметри можна, зрозуміло, визначити експериментально, тому методи цих наук називаються феноменологічними. Статистична ж фізика дає змогу принаймні визначити всі ці величини, якщо відомі сили взаємодії між атомами і молекулами, тобто використовує відомості про мікроскопічну будову тіл. Отже, це і є мікроскопічна теорія.

Рівноважний стан системи залежить тільки від таких загальних характеристик початкового стану, як кількість частинок, їх сумарна енергія тощо. Кількість молекул в об'ємі буде змінюватись внаслідок їх руху і носити характер хаотичних коливань відносно деякого середнього значення — флуктуацій. Існування флуктуації має принципове значення, оскільки безпосередньо доводить статистичний характер термодинамічних закономірностей. Крім того, флуктуації відіграють роль шуму, який заважає фізичним вимірюванням та обмежує їх точність. Так, важливою є теорія флуктуації для статистичної радіофізики, яка охоплює

дослідження статистичних закономірностей у коливальних і хвильових процесах (когерентність, взаємодія сигналів та шумів у нелінійних системах). Практичне значення статистичної радіофізики пов'язано з тим, що в системах радіолокації та радіозв'язку флуктуації мають важливе значення, а часто стають визначальними на всіх ділянках передачі інформації. Електричні флуктуації, обумовлені фундаментальними фізичними процесами в речовині, є причиною виникнення флуктуацій напруги та токів у радіопередавачах та радіоприймачах, обмежуючи сприйнятливість перших і гранично допустимі монохроматичність та стабільність частоти других. Флуктуаційні явища при поширенні радіохвиль в атмосфері пов'язані з тим, що показник заломлення тропосфери й іоносфери зазнає нерегулярних змін.

Статистичний підхід при розгляді взаємодії світла з речовиною привів до формування статистичної оптики. Статистичний характер світлових полів зумовлений тим, що джерела світла зазвичай складаються з великої кількості хаотично розташованих у просторі і не пов'язаних між собою випромінювачів (атоми, молекули), випромінювання яких має ймовірнісний характер. Флуктуації виникають і при поширенні світла в середовищі в процесі його розсіяння на хаотично розташованих частинках, або таких частинках, що рухаються хаотично. Одним із розділів статистичної оптики є теорія когерентності, яка вивчає кореляцію станів світлового поля в різних точках простору-часу. Важливими ці методи стали також для нових типів квантових джерел — лазерів та квантових підсилювачів, випромінювання яких має суттєво статистичні властивості, а також у застосуванні до задач голографії та нелінійної оптики.

Флуктуації також можна спостерігати при розсіянні світла: випадкові зміни густини середовища внаслідок флуктуацій викликають випадкові зміни за об'ємом показника заломлення. Отже, в однорідному середовищі або навіть у хімічно чистій речовині розсіяння світла може відбуватися так само, як і у мутному середовищі (критична опалесценція). Це явище особливо помітно в бінарних розчинах при температурі, близькій до критичної температури розчинення — так зване критичне розсіяння світла. Флуктуації тиску виявляються при броунівському русі змулених у рідині чи газі малих частинок під впливом некомпенсованих ударів молекул оточуючого середовища. У квантовій

теорії поля важливими є флуктуації вакууму, пов'язані з можливістю або народження, або поглинання віртуальних частинок, що призводить також до зміни значень маси і заряду частинок. З'язок між флуктуаціями системи у рівноважному стані та її нерівноважними властивостями дається флуктуаційно-дисипативною теоремою, яка була встановлена Х.Калленом та Т.Уелтоном у США у 1951 р.

Суттєво те, що зміна стану системи з багатьох частинок має складний характер. Тому з часом точки, які відповідають певному стану, розподіляться на поверхні сталої енергії рівномірно (ергодична гіпотеза). Найважливіший результат статистичної фізики полягає у встановленні статистичного змісту термодинамічних величин, що дає можливість вивести закони термодинаміки з основних уявлень статистичної фізики та обчислити термодинамічні величини для конкретних систем. Наприклад, внутрішня енергія ототожнюється з середньою енергією системи, а перший закон термодинаміки набуває очевидного пояснення як вираз закону збереження енергії при русі частинок, з яких складається тіло. Особливе значення має статистичне тлумачення ентропії як величини, що пропорційна статистичній вазі макроскопічного стану, тобто його ймовірності. При цьому рівноважний стан має максимальну статистичну вагу, тобто виявляється найбільш ймовірним станом. Процес переходу від нерівноважного стану до рівноважного є процесом переходу від менш ймовірних до більш ймовірних станів, тому ентропія замкненої системи може тільки зростати.

Застосування статистичної фізики до вивчення тих чи інших властивостей конкретних систем математично зводиться до наближеного обчислення статистичної суми з урахуванням специфічних властивостей конкретної системи, які іноді спрощують розрахунки. У випадку газів такою обставиною є їх розрідженість, через що взаємодія між молекулами відіграє незначну роль. У першому наближенні можна взагалі вважати газ ідеальним, а взаємодію враховувати як поправку. У квантовій статистиці при низьких температурах виявляються зовсім різними властивості газів, які утворені частинками з цілим спіном (бозонів) та з напівцілим спіном (ферміонів). Наближене обчислення статистичної суми для кристалічних твердих тіл базується на малих амплітуді коливань атомів кристала біля їх положень рівноваги.

У рідині взаємодію між молекулами і амплітуди їх коливань не можна вважати малими. Тому обчислення термодинамічних функцій рідини вимагає додаткових припущень для розрахунків. Ситуація спрощується при температурах, низьких порівняно з температурою вродження рідини. За цих умов тепловий рух у рідині можна розглядати як появу в ній елементарних збуджень — квазічастинок, які мають енергію, імпульс, і підпорядковані певному закону дисперсії. При низьких температурах ці частинки утворюють ідеальний газ, це дозволяє обчислити термодинамічні функції речовин. З теоретичної точки зору до таких рідин відносять, крім рідких при нормальному тиску аж до абсолютного нуля температур  ${}^4\text{He}$  та  ${}^3\text{He}$ , також електронну рідину в металі, систему спінів в феромагнетикі тощо.

Суттєво те, що статистична фізика дозволяє обчислити константи хімічної рівноваги, які визначають рівноважні концентрації реагуючих речовин. Термодинамічна теорія задає умову рівноваги у вигляді рівності нулю деякої комбінації хімічних потенціалів цих речовин. При цьому у вирази для хімічних потенціалів входить стала Планка, тому квантові ефекти є значущими навіть для реакцій між класичними газами.

При розв'язанні задач квантової статистичної фізики важливе значення мають методи квантової теорії поля, які були введені у статистичну фізику порівняно недавно. Головну роль у цих методах відіграє функція Гріна макроскопічної системи, аналогічна функції Гріна в квантовій теорії поля. Полюси цієї функції визначають закон дисперсії квазічастинок.

Важливу, але ще далеку від завершення галузь статистичної фізики становить статистична теорія фазових переходів. У ряді випадків при неперервній зміні зовнішніх параметрів (тиск, температура) властивості системи можуть при деяких значеннях параметрів змінюватися стрибкоподібно, тобто відбувається фазовий перехід. Фазові переходи поділяються на фазові переходи I роду, коли виділяється теплота переходу і стрибкоподібно змінюється об'єм (наприклад, плавлення) і II роду, коли теплота переходу і стрибок об'єму відсутні (наприклад, перехід рідкого гелію в надплинний стан). Найскладніше досліджувати властивості речовини поблизу лінії фазового переходу II роду, де аномально зростають флуктуації, і розглянуті вище наближені методи статистичної фізики стають незастосовними. Тому важливу роль відіграє розгляд моделей, у яких є переходи та існує точний розв'язок (наприклад, модель Ізінга).

Суттєвим розділом статистичної фізики є статистична фізика нерівноважних процесів. Вона вивчає процеси у системах, які прямують до рівноваги, а також в системах, де нерівноважний стан підтримується зовнішніми умовами. Наприклад, тіло, в якому задано градієнт температури, тече електричний струм, або яке знаходиться у змінному магнітному полі. При цьому, якщо відхилення від рівноважного стану незначне, то система описується кінетичними коефіцієнтами (коефіцієнти в'язкості, теплопровідності та дифузії, електропровідність металів). Ці параметри задовольняють принцип симетрії кінетичних коефіцієнтів, який виражає симетрію рівнянь механіки відносно зміни знаку часу (згідно з теоремою Онсагера). Інша ситуація — опис значно нерівноважних станів, коли кінетичні коефіцієнти обчислюються за допомогою кінетичного рівняння — інтегро-диференціального рівняння для одночасткової функції розподілу. У квантовому випадку замість одночасткової функції розподілу використовують одночасткову матрицю густини, або статистичний оператор. Таке замкнене рівняння неможливо отримати у загальному випадку, при його виведенні необхідно використовувати малі параметри кожної конкретної задачі. Найважливішим прикладом є кінетичне рівняння Больцмана, яке описує встановлення рівноваги в газі за рахунок співударів між молекулами. Особливу проблему становить виведення кінетичного рівняння для плазми. Через повільність зменшення кулонівських сил з відстанню навіть при парних зіткненнях суттєвим є вплив інших частинок.

Нерівноважні стани твердих тіл і квантових рідин можна розглядати при низьких температурах як нерівноважні стани відповідних квазічастинок. Тому кінетичні процеси в таких системах описуються кінетичними рівняннями для квазічастинок, які враховують зіткнення між ними та процеси їх взаємного перетворення.

“Розвиток статистичної механіки нерозривно пов'язаний з роботою її апарату, заснованого на теорії ймовірностей, функціональному аналізі, алгебрі та інших розділах математики. Однак статистична механіка не тільки запозичує математичні методи, а й здійснює вплив на їх подальший розвиток, тому постановка ряду принципів проблем ініціює появу нових розділів математики, як це було, наприклад, з ергодичною гіпотезою. Характерною ознакою сучасної статистичної механіки є органічне злиття аналітичних та числових методів, серед

яких, в першу чергу, слід згадати метод Монте-Карло та метод молекулярної динаміки. Підкреслимо, що “машинні експерименти” дають змогу не тільки моделювати реальну фізичну ситуацію, а й перевірити межі застосовності наближень, які використовуються у аналітичному дослідженні. Тут спостерігається зворотний зв’язок, і ідеї та методи статистичної механіки знаходять застосування при побудові статистики обчислювальних середовищ”, — писали М.М.Боголюбов (мол.), Б.І.Садовников та А.С.Шумовський про методологію статистичної фізики [426, с.5].

Важливе місце в статистичній механіці відводиться використанню гамільтонова підходу. Гамільтоніан, заданий на просторі станів, повністю визначає рівняння руху системи, тому вибір гамільтоніанів для конкретних систем частинок, що взаємодіють, є важливим завданням рівноважної статистичної механіки. Разом з тим, строге дослідження модельної задачі в рамках рівноважної статистичної механіки нашоветься на складні математичні проблеми. Тому точні розв’язки модельних задач надзвичайно рідкісні та здійснюють значний вплив на розвиток статистичної механіки в цілому. Як приклад можна навести результат у пласкій моделі Ізінга, результат М.М.Боголюбова в модельних задачах теорії надплинності та надпровідності, результат Бакстера у восьмивершинній моделі. Так, точний розв’язок М.М.Боголюбова в теорії надпровідності не тільки відіграв значну роль у розумінні механізмів цього фундаментального фізичного явища, а й дозволив сформулювати концепцію квазісередніх, яка встановила глибокий зв’язок між спонтанним порушенням симетрії у макроскопічній системі та умовами стійкості стану термодинамічної рівноваги Він привів до формулювання фундаментальної теореми про виникнення дальності при спонтанному порушенні симетрії, здійснив стимулюючий вплив на розвиток алгебраїчного підходу в статистичній механіці.

Важлива риса рівноважної статистичної механіки полягає в тому, що модельні гамільтоніани та відповідні простори станів будуються для систем зі скінченною кількістю частинок та у скінченному об’ємі, тоді як рівноважні значення динамічних величин (термодинамічні величини) визначаються у так званій термодинамічній границі. Таким чином, у статистичній фізиці існує надзвичайно складна з математичної точки зору проблема встановлення асимптотичних співвідношень, які визначають



точні значення термодинамічних величин при необмеженому зростанні ступенів вільності у системі. На існування цієї проблеми вказується вже в основоположних роботах Дж.Гіббса, а також у знаменитому огляді П. та Т.Еренфестів. Перше систематичне її дослідження здійснили Ч.Дарвін та р.Фаулер, а встановлення її зв'язку з граничними теоремами теорії ймовірностей — О.Я.Хінчин. Перше доведення існування термодинамічної границі було дано М.М.Боголюбовим та Б.І.Хацетом, а також Л. Ван Ховом. Значення проблеми термодинамічного граничного переходу для різних застосувань статистичної механіки, перш за все, для теорії фазових переходів, вперше показали та Ч. Лі та Т.Янг. Подальший розвиток цієї проблеми сформувався у самостійний напрям сучасної математичної фізики.

Реалізація ідеї послідовного виведення кінетичних рівнянь у нерівноважній статистичній фізиці безпосередньо з системи рівнянь руху, які задають механічну природу системи, належить М.М.Боголюбову як для класичного, так і для квантового випадку. При цьому відправним пунктом теорії є рівняння Ліувілля, а необхідність процесу наближення до рівноваги впливає з функціональної гіпотези Д.Гільберта про перехід від кінетичного рівняння до гідродинамічних рівнянь внаслідок “скороченого” опису. Проблема термодинамічного граничного переходу тут також значуща, перш за все через дослідження процесу еволюції до рівноваги.

Основоположним для розуміння функціонування науки, в тому числі статистичної фізики, є поняття *наукової картини світу*. Наукова картина світу — це цілісна система уявлень про світ, його загальні властивості та закономірності, яка формується в результаті узагальнення та синтезу основних наукових понять і принципів та включає уявлення про Природу і суспільство [63,с.396; 427,с.201,479;428,с.459;429,с.355]. Це особлива теоретична форма знання, яка представляє предмет дослідження науки відповідно певному етапу її історичного розвитку. Загальнокультурний зміст наукової картини світу відображає проблему пошуку нових шляхів цивілізаційного розвитку, а також світоглядних ідей. При цьому наукова картина світу, на відміну від теорії, віддзеркалює об'єкт, не зосереджуючись на процесі одержання знання, а тому тісно пов'язана зі світоглядом, виступаючи одним з дієвих способів його формування.

Структура наукової картини світу включає два головних рівня — концептуальний (поняттєвий) та чуттєво-образний. Перший рівень репрезентовано філософськими категоріями, принципами, законами, загальнонауковими поняттями та фундаментальними поняттями окремих наук. Другий рівень-це рівень наочних уявлень про Природу, які забезпечують розуміння наукової картини світу широким колом вчених, незалежно від спеціалізації.

По мірі прогресу науки комплекс уявлень про світ модифікується, при цьому виявляється головна відмінність саме наукової картини світу від ненаукових (наприклад, релігійної), яка полягає в тому, що вона будується на основі фундаментальної наукової теорії або теорій, які слугують її обґрунтуванням. Так, картина світу у XVII–50-х рр. XIX ст. формувалась на базі класичної механіки (механічна картина світу), картина світу початку 60-х рр. XIX ст. — початку XX ст. на базі ідеї поля Фарадея та електродинаміки Максвелла (електродинамічна картина світу), картина світу початку XX ст.–60-х рр. XX — на основі спеціальної та загальної теорій відносності і квантової механіки (квантово-релятивістська картина світу), а сучасна фізична картина світу — на основі ідеї кваркової будови речовини, квантової теорії поля, теорії елементарних частинок, квантової хромодинаміки, теорії Великого вибуху, інфляційної теорії, синергетики (кварково-лептонна картина світу). Саме з цим пов'язано виділення основних історичних типів фізичної картини світу-механічної, електродинамічної, квантово-релятивістської, кварково-лептонної.

Сучасний етап пов'язаний з формуванням постнекласичної науки, яка характеризується посиленням процесу міждисциплінарного синтезу знань на основі принципу глобального еволюціонізму. Особливістю нової науковою картини світу, яка формується зараз (*еволюційна*) є не прагнення до уніфікації всіх областей знань, а єдність у різноманітності дисциплінарних підходів. Керівними в цьому процесі стануть ідеї самоорганізації, глобального еволюціонізму (80-ті рр. XX ст.), методології систем, які історично розвиваються. Необхідно зазначити, що в ході розвитку науки фізична картина світу поступово втрачала свою наочність, тим не менш прогресуюче віддалення фізичної картини світу від світу відчуттів сприяє водночас її більшому наближенню до реальної дійсності.

Вивчення глибинного «мікрорівня» внутрішніх процесів наукових революцій полягає у розгляді *категоріальної структури теоретичного знання*. Філософські категорії виявляються тими найбільш загальними поняттями, які відображають найсуттєвіші зв'язки та відношення реальності, визначають фундаментальні рівні розуміння людиною Природи та суспільства. Основні категоріальні структури ряду теорій класичної фізики було вивчено А.Т.Артюхом, а сучасною фізики — В.Л.Храмовою [54,55]. Так, синергетика спирається на ідеї необоротності історії системи та самоорганізації шляхом самодії, а також на категорії якісного стрибка, розвитку як самоорганізації, хаосу, порядку, частини, цілого.

На відміну від динамічної схеми закономірностей класичної фізики, закони квантової фізики мають статистичний характер, описують не саму фізичну реальність, а лише ймовірність її появи. Як писав А.Ейнштейн, «тільки ця фундаментальна зміна, внесена у фізику квантовою теорією, зробила можливим адекватне пояснення подій, без сумніву дискретного та статистичного характеру, тієї галузі явищ, у якій виявляють своє існування елементарні кванти речовини та випромінювання» [430, т.4, с.539].

Категоріальна переорієнтація пізнавальних засобів у період становлення нової теорії супроводжується, як правило, ідейною боротьбою. Так, А.Ейнштейном було висунуто ідею квантово-хвильового дуалізму. Однак у подальшому для нього виявилась неприйнятною необхідність звернення до ймовірносної ідеї при осмисленні спостережуваних закономірностей руху мікрооб'єктів. Поступово в процесі утвердження квантової механіки стало зрозумілим, що динамічна схема закономірностей Природи змінюється статистичними законами природознавства, характер яких визначатиме філософські й культурні основи епохи. Уявлення про ймовірнісний характер законів природи, закладене в процесі створення статистичної фізики та квантової механіки, привело до того, що жорстко детерміністський стиль мислення у наукових дослідженнях та суспільній думці почав замінятися ймовірносним, а далі — нелінійним стилем, який став основоположним елементом сучасної наукової картини світу та набув принципового світоглядного значення. «Статистичний характер  $\Psi$ -функції (а таким чином, і законів Природи...) буде визначати стиль законів по меншій мірі протягом декількох

століть... Мріяти про повернення до минулого, до класичного стилю Ньютона-Максвелла... – це здається мені безнадійним, неправильним, ознакою поганого смаку...», — писав В.Паулі [160].

Взагалі оскільки наукова картина світу є квінтесенцією наукових знань, то опанування її базовими уявленнями, ідеями і теоріями є необхідною умовою формування світогляду сучасної людини, свідомого та адекватного сприйняття нею законів оточуючого світу. Однак ситуація ускладнюється тим, що нині зміна ідей, знань та технологій відбувається набагато швидше, ніж зміна поколінь людей. Оскільки опанування етапів формування сучасної наукової картина світу складає предмет історико-наукових досліджень, то вони стають в цьому контексті на фоні зниження за останні роки інтересу до вивчення фундаментальних наук в світі особливо актуальними, дозволяючи побачити весь комплекс взаємопов'язаних наукових напрямів та місце в ньому конкретних розробок; сформувані свідоме розуміння та гуманістичне ставлення до процесів і явищ оточуючого світу, створення нової техніки та її використання.

Акцентуючи увагу на ключовому значенні поняття наукової картини світу, ми пропонуємо віднести до фундаментальних ідей та теорій природознавства ті з них, з появою яких пов'язана зміна наукових картин світу та оновлення категоріальних структур наукового знання. До таких ідей відносяться, наприклад, ідея корпускулярно-хвильового дуалізму, ідея необоротної історії системи, ідея розвитку як самоорганізації шляхом самодії, ідея еволюції; до теорій - класична механіка, квантова механіка, статистична механіка, спеціальна та загальна теорії відносності, квантова хромодинаміка, космологія. Статистична фізика є фундаментальною теорією сучасного природознавства, а ймовірна ідея, яка лежить у її основі — фундаментальною ідеєю сучасного природознавства. Тому вони виступають суттєвими факторами побудови сучасної наукової картини світу. Значення статистичної фізики полягає також у тому, що на її основі наприкінці ХХ ст. сформувались така міждисциплінарна галузь науки, як синергетика (започаткована Г.Хакеном та І.Р.Пригожиним) — наука про самоорганізацію складних систем, про перетворення хаосу у порядок. Основними її ідеями, на основі яких у формується тенденція до глобального еволюційного синтезу у природознавстві, є рівноправність процесів еволюції та деградації;

творча роль хаосу на шляху до порядку незалежно від характеру системи; розвиток через нестійкість системи; нелінійний характер еволюції більшості складних систем, наявність декількох варіантів їх розвитку; закономірність виникнення структур зростаючої складності; включення випадковості у механізм еволюції. До ключових результатів світового рівня тут слід віднести дослідження динамічного хаосу, які бурхливо розвиваються в останні десятиріччя, та набувають застосувань в багатьох розділах науки і техніки — в теорії хімічних реакцій, у радіотехніці, у фізиці плазми, прискорювачів заряджених частинок тощо.

“Парадокс часу не був осмислений до другої половини ХХ століття, — писав І.Р.Пригожин. — До цього часу закони динаміки вже давно сприймалися як вираз ідеалу об’єктивного знання. Нині ситуація інша. Ми знаємо, що необоротність... грає суттєву, конструктивну роль. Ми діти стріли часу, еволюції, але ніяк не її творці” [431].

Нам видається цікавим і доречним навести також висловлювання сучасних українських вчених, відомих працями з методів та застосувань статистичної фізики. Так, розмірковуючи про місце статистичної фізики в системі наук, академік НАН України С.В.Пелетмінський зазначає: “Ця галузь науки стосується всіх наук — фізики твердого тіла, фізики плазми, теорії фазових переходів тощо. Все це статистична фізика. Тому, якщо треба пояснити фізичні явища, то без статистичної фізики тут не обійтись, її методи та ідеї відіграють ключову, визначальну роль для розуміння практично всіх явищ природи, вона дає також філософські узагальнення. Сьогодні деякі проблеми вже вирішені, проте років тридцять тому проблеми необоротності були багато в чому філософськими проблемами. Наприклад, проблеми, пов’язані з Великим вибухом, також мають загально філософський зміст — чи був він взагалі, що під ним розуміти, що було до нього? Серед ключових результатів, які визначають сьогодні формування ймовірнісного стилю мислення в природознавстві, слід назвати вивчення бозе-конденсації в ідеальних газах, дослідження надплинності у критичному стані (super-solid), коли кристал переходить у стан, дуже близький до стану надплинної рідини. Ці праці зараз цікавлять як теоретиків, так і експериментаторів, оскільки такі надплинні квантові кристали ще не знайдені. Але фізики вірять, що цей стан має існувати, і дослідження стимулюють розвиток теоретичних уявлень про таку фазу речовини. Останнім часом між со-

бою межують статистична фізика і квантова теорії поля, розвивається теорія фазових переходів у статистичній фізиці, релятивістська статистична фізика. Методи статистичної фізики застосовують у космології, теорії Великого вибуху, моделях елементарних частинок. Широко використовуються такі нові поняття, як струни та брани, до яких застосовують теорію фазових переходів, які відбувалися протягом тисячних часток секунди від початку виникнення Всесвіту. Експериментального матеріалу, на жаль, обмаль, є тільки непрямі підтвердження, пов'язані з мікрохвильовим випромінюванням. Ці дослідження значно дискусійні, але є сучасними, цікавими та стимулюють розвиток більш “земних проблем”.\*

Говорячи про місце статистичної фізики в сучасній науковій картині світу та про її роль на сучасному етапі побудови фізичних уявлень, академік НАН України В.Г.Бар'яхтар підкреслював, що її застосовують при вирішенні різних проблем фізичної науки: “Ефекти, які ми досліджували у магнетизмі, збагатили конкретно, нетривіально фізику взаємодії багатьох частинок. Результати зі зростання ентропії мають загально філософське значення у фізиці. Сьогодні проблема переходу від упорядкованого руху до хаосу є однією з центральних, викликає надзвичайну зацікавленість бозе-ейнштейнівська конденсація. Зростання ентропії — це шлях, за яким можна прослідкувати, як з механіки, здавалося б, оборотної, виникають необоротні явища, як виникає стріла часу”.\*

Представник львівської школи статистичної фізики І.М.Мриглад писав про роль статистичної фізики в науковій картині світу: “Статистична фізика є однією із ключових галузей сучасної теоретичної фізики, яка описує закономірності поведінки багаточастинкових систем у природі. В силу такого означення до переліку об'єктів її вивчення потрапляють практично усі різновиди матерії — від газів, плазми та простих рідин і до полімерів, скла, рідкокристалічних і міцелярних систем. Традиційне коло явищ, що описує ця наука охоплює сьогодні практично все, що відносилось раніше до хімічних та біологічних наук. Окрім того, в силу значної загальності розвинутих тут підходів і методів, в останні роки отримали бурхливий розвиток такі екзотичні напрямки статистичної фізики як фізика складних систем, економічна фізика, фізика комплексних мереж тощо, де слово фізика часто використовується-

ся лише для позначення методів і мови, які є притаманні більше саме статистичній фізиці. До екзотичних задач статистичної фізики відносяться нині також проблеми руху транспорту, польоту великої групи птахів чи плавання риб, особливостей формування громадської думки і таке інше. Уже один такий далеко неповний перелік показує, що методологія статистичної фізики та її математичний апарат мають велику пізнавальну силу і велике евристичне значення. Фактично в рамках цієї науки формується своєрідна наукова методологія пізнання світу, яка стає корисною при вирішенні багатьох проблем суспільства, навіть тих, які видаються цілком віддаленими від проблем фізики” \*.

Як зазначала відомий в Україні спеціаліст в галузі статистичної фізики О.В.Пацаган, “Методи статистичної фізики є невід’ємною складовою частиною методологічного апарату теоретичної фізики, який направлений на розкриття і розуміння основних законів і явищ навколишньої природи (як неживої, так і живої)” \*.

Представник наукової школи статистичної фізики С.В.Пелетмінського Ю.В.Слюсаренко писав, що “статистичну фізику часто називають “царицею наук”, відзначаючи її роль у формуванні наукового світогляду та методології наукових досліджень. Методи статистичної фізики застосовні (а часто і необхідні чи є єдино можливими) для опису не тільки різноманітних фізичних систем, які складаються з великого числа складових. Завдяки своїй універсальності вони використовуються у хімії, біології, матеріалознавстві. Зараз виникла нова галузь їх використання — економічна фізика” \*.

Ще один учень С.В.Пелетмінського О.М.Тарасов, відзначає, що ключові наукові результати останньої чверті ХХ ст., відзначені нобелівськими преміями з фізики, лежать саме в галузі статистичної фізики. Це, зокрема, роботи, присвячені експериментальному відкриттю у 1972 р. та наступному теоретичному поясненню основних властивостей низькотемпературних надплинних фаз рідкого  $^3\text{He}$  (Нобелівські премії 1996 та 2003 р.); відкриття у 1980 р. та пояснення цілочислового квантового ефекту Холла (Нобелівська премія 1985 р.); відкриття у 1981 р. та пояснення дрібного квантового ефекту Холла (Нобелівська премія 1998 р.); відкриття високотемпературної надпровідності у 1986 р. (Нобелівська премія 1987 р.), що означало якісний прорив на шляху створення матеріалів, які є надпровідниками при кімнатній температурі (однак, на жаль, на сьогодні

відсутня загальна точка зору на мікроскопічний механізм цього явища); експериментальне відкриття у 1995 р. явища бозе-ейнштейнівської конденсації передбаченого у 1925 р. А.Ейнштейном, в ультрахолодних розріджених квантових газах атомів у магнітних пастках (Нобелівська премія 2001 р.). Це відкриття привело до потоку теоретичних робіт з проблеми бозе-ейнштейнівської конденсації у квантових газах з атомів не тільки з цілочисловими (бозевськими), але й з напівцілими (ферміївськими) значеннями спінів. У 2003-2004 р. були одержані ферміївські конденсати з пар атомів-ферміонів (двоатомних квазімолекул) то виявлено надплинність. Ці дослідження є перспективними в плані пояснення поведінки таких складних ферміонних систем з сильною міжчастинковою взаємодією, як атомні ядра та нейтронні зорі, що проявляють властивість надплинності, а також механізму високотемпературної надпровідності. Тому, зазначає О.М.Тарасов, “статистична фізика займає одне з фундаментальних, центральних місць у теоретичній фізиці, дозволяючи описувати різноманітні явища та процеси у різних системах, які складаються з великого числа частинок, що взаємодіють (газоподібні та конденсовані середовища, які можуть знаходитись у різних агрегатних станах — рідкому та твердому). Методи статистичної фізики застосовуються також у фізиці плазми, в ядерній фізиці та астрофізиці в широких діапазонах зміни температур, густин та інших величин, що характеризують стан речовини. Таким чином, без статистичної фізики неможливо уявити собі сучасну наукову картину світу”\*.

Член-кореспондент НАН України М.Ф.Головко також підкреслює фундаментальне значення статистичної фізики нового міждисциплінарного синтезу у природознавстві: “Статистична фізика встановлює зв’язок між мікроскопічними та макроскопічними властивостями, дає відповідь на питання та причини еволюції та деградації систем. Методи, розвинуті в статистичній фізиці, використовуються при моделюванні також економічних та суспільних процесів. Я би відмітив тенденцію до поєднання комп’ютерних та аналітичних методів у різних ділянках статистичної фізики, використання методів, що поєднують властивості системи на ”різних масштабах часу і простору”\*.

Професор В.В.Красильников також вважає, що „статистична фізика є одним з фундаментальних наріжних каменів в науковій картині світу. Але її не можна уявляти собі як дещо закінчене та непорушне. Вона



постійно розвивається, поглиблює та уточнює наше уявлення про світ. Людство пізнає світ саме методами статистичної фізики”, — підкреслював він. \*

Таким чином, ключове значення статистичної фізики для формування нового міждисциплінарного синтезу та імовірнісного стилю мислення у природознавстві, її фундаментальна роль у науковій картині світу визначається тим, що дана теорія встановлює зв'язок між мікроскопічними та макроскопічними властивостями матерії, дає відповідь на питання та причини еволюції та деградації систем. Роль статистичної фізики не обмежується розвитком власного формалізму та конкретних застосувань. Розглядаючи колективні властивості систем, які не залежать від специфікації частинок, вона пов'язує між собою різні галузі природознавства та здійснює перенесення ідей між ними. Методи, розвинуті у статистичній фізиці, використовуються при моделюванні хімічних, біологічних, економічних та суспільних процесів.

При формуванні статистичної фізики було вперше введено об'єктивну випадковість, при цьому необхідності, які покладено у її основу, представляються розподілом ймовірностей. Таким чином, загальний принцип причинності набув нового розвитку і збагатився новим змістом. Сучасна наука розглядає динамічні і статистичні закономірності як невіддільні і водночас такі, що не зводяться одна до одної. Динамічні закономірності відображають такі випадки причинного зв'язку, за яких основну роль у поведінці системи відіграють початкові умови, а статистичні закономірності — випадки, що обумовлені переважно колективним характером явищ або процесів.

### РОЗДІЛ 3. КОРОТКИЙ НАРИС ІСТОРІЇ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В II ПОЛОВИНІ ХІХ–І ПОЛОВИНІ ХХ СТ. (СВІТОВИЙ КОНТЕКСТ)

#### 3.1. Зародження ймовірнісних методів розгляду законів природи у 50–60-х рр. ХІХ ст. (А.Кр'юніг, Дж.Максвелл)

Статистична фізика виникла в середині ХІХ ст. завдяки перш за все працям з молекулярної фізики, а також спробам вчених пояснити на механічній основі закони термодинаміки (насамперед другий закон). Підґрунтя для розуміння необхідності запровадження ймовірнісних уявлень при формулюванні законів природи складало уявлення про те, що макроскопічні властивості, які спостерігаються в реальному досліді, обумовлені мікроскопічними процесами, що розвиваються на атомно-молекулярному рівні. Результатом синтезу молекулярно-кінетичних та термодинамічних уявлень в середині ХІХ- на початку ХХ ст. в працях Дж.Максвелла, Л.Больцмана та Дж.Гіббса, де було встановлено зв'язок між тепловою та механічною формами руху матерії, стало виникнення статистичної фізики як самостійного розділу науки.

Для розгляду процесу еволюції статистичної фізики нами пропонується наступна **періодизаційна схема**:

Передісторія статистичної фізики

Виникнення атомістичних уявлень

(IV ст. до н.е. (Античність) – XVII ст.

(Демокрит, Епікур, Лукрецій Кар, Г.Галілей, І.Ньютон)

Створення основ молекулярно-кінетичної теорії

(початок XVIII ст. – середина XVIII ст.)

- Створення теоретичних засад молекулярно-кінетичної теорії (Д.Бернуллі, Л.Ейлер, М.Ломоносов)

- Створення експериментального підґрунтя молекулярно-кінетичної теорії (Д.Дальтон, А.Авогадро, р.Бойль, Ж.Гей-Люссак, Е.Маріотт)

### **Формування термодинаміки як науки**

(1824 – 50-ті рр. XIX ст.)

(Н.Карно, р.Майер, Дж.Джоуль, Г.Гельмгольц, р.Клаузіус, В.Томсон)

### **Формування рівноважної статистичної механіки як синтезу молекулярно-кінетичних та термодинамічних уявлень**

(50-ті рр. XIX ст. – 20-ті рр. XX ст.)

- Створення засад класичної рівноважної статистичної механіки

(середина XIX ст. – початок XX ст.)

(А.Крґоніг, р.Клаузіус, Дж.Максвелл, Л.Больцман, Дж.Гіббс)

- Створення засад квантової рівноважної статистичної механіки

(1900 – 1925)

(А.Ейнштейн, Ш.Бозе, Е.Фермі, П.Дірак)

### **Створення нерівноважної статистичної механіки**

(30-ті–60-ті рр. XX ст.)

- Формування засад класичної нерівноважної статистичної механіки

(30-ті рр. XX ст. – 50-ті рр. XX ст.)

(В.Паулі, Л.Онсагер, М.М.Боголюбов, Л.Д.Ландау, І.Пригожин)

- Формування засад квантової нерівноважної статистичної механіки

(50-ті–60-ті рр. XX ст.)

(Л.Ван - Хов, р.Кубо, М.М.Боголюбов)

Таким чином, передісторією статистичної фізики була молекулярно-кінетична теорія, в основу якої покладена ідея дискретності матерії або атомізму. Ця ідея, яка проходить через усю історію розвитку природничих наук, є одним з найдавніших уявлень, витоки якого сягають Античності. Існує припущення, що зародження ідеї атомістичної будови речовини започатковано астрономічними спостереженнями античних натурфілософів, їх уявленням про цілісність природи та прагнення від-

дзеркалити єдність будови та законів макро- і мікrokосмосу. Видатний фізик-теоретик р.Фейнман вважав атомістичну ідею настільки змістовною, що достатньою для збереження у випадку гіпотетичної втрати всіх накоплених людством знань.

Відомості про припущення щодо перерваної будови матерії ми знаходимо у працях античних авторів Левкіппа, Демокріта, Лукреція Кара. У XVII–XVIII століттях, коли центральне місце в природознавстві посідала механіка, атомізм набув механістичного характеру: мікрочастинки розглядались як кулі, які рухаються по точних орбітах.

Нове розуміння атомістичної ідеї як наукової гіпотези склалося у період XVII – початку XIX століття завдяки працям П.Гассенді, р. Декарта, р.Бойля, р.Гаука, І.Ньютона, Д.Локка, Ф.Бекона, Х.Гюйгенса, І.Бернуллі, Д.Бернуллі, Л.Ейлера, М.Ломоносова, р.Бошковича, Дж.Дальтона, А.Авогадро, в яких було сформовано молекулярно-кінетичну теорію.

Так, Д.Бернуллі у 1738 р. на основі корпускулярної теорії дав тлумачення закону Бойля — Маріотта, вказавши на його наближений характер та умови виконання [432]. Л.Ейлер у тому ж 1738 р. у своїй „Дисертації про вогонь” розвинув загальний методологічний підхід до тепла як до різновиду руху та поширив дію закону збереження кількості руху на теплові явища [433].

Систематичне пояснення корпускулярної гіпотези, починаючи з 1745 р., належить М.Ломоносову. Він обґрунтував на основі молекулярно-кінетичних уявлень такі явища, як плавлення, випаровування, теплопровідність, розширення тіл, необхідність існування абсолютного нуля [434,Т.1].

Надзвичайно важливими для розвитку молекулярно-кінетичної теорії стали роботи Дж. Дальтона у 1801–1803 рр. з вивчення дифузії газів, що були покладені в основу закону незалежності тисків у газових сумішах. „Якщо будь-які два або більше змішані гази досягають рівноваги, то пружна дія кожного з них на стінку посудини чи на деяку рідину дорівнює такій дії, за якої був би присутній тільки цей газ, коли б він займав весь об’єм, за відсутності всіх інших газів», — писав він [435, с.67]. Даний закон Дж. Дальтон поширив на суміш газу з парою, довівши незалежність тиску водяної пари у повітрі та у пустоті. Він також встановив, що атоми одного й того ж хімічного елемента мають ідентичні властивості,

дав визначення атомної ваги елемента як відношення маси одного атома елемента до маси одного атома водоводу.

У міру розвитку теорії деталізувались властивості і структура атома. Було введено поняття хімічного елемента (Р.Бойль, 1661), іону (С.Аррениус, 1887), атомної ваги (Дж.Дальтон, 1803) та валентності (А.Купер, Е.Франкленд, Ф.Кекуле, 60-ті роки XIX століття). Розвиток атомної теорії в хімії було започатковано доведенням у 1808 р. Ж.Гей-Люссаком закону кратних співвідношень для газів, які хімічно взаємодіють (виявилось, що об'єми таких газів можна подати простими співвідношеннями), а також формулюванням А.Авогадро у 1811 р. двох принципів: вся речовина складається з молекул, які утворені з атомів; у рівних об'ємах будь-яких газів при однакових умовах міститься однакова кількість молекул [436]. Зазначені досліді Гей-Люссака і аналогічні виміри Джоуля у 1845 р. підтвердили незалежність внутрішньої енергії ідеальних газів від їх об'ємів. Це доводило, що діючі між молекулами сили надзвичайно малі.

У перші десятиліття XIX ст. потреби виробництва зумовили інтерес до інтенсивного вивчення теплових явищ, у зв'язку з чим з'явилася велика кількість досліджень, що мали практичну спрямованість. Вони були пов'язані з вивченням властивостей газів і пари, процесів теплопровідності, теплового випромінювання та взаємозв'язку між теплою та іншими явищами. Так, дослідження в галузі теплового розширення газів стимулювались недосконалістю конструкції барометра та необхідністю визначення об'ємного розширення газів для внесення поправок у його показання залежно від висоти. Вивчення даного питання було розпочато ще у XVI столітті К.Дребблем, а потім було продовжено в працях Г.Амонтона, П.Мушенбрека, Ла-Гіра, Ж.Делюка та Прістлі 1699–1702 рр. [437,438].

Значний внесок у цьому напрямі було зроблено у 1802 р. Ж.Гей-Люссаком. Вважаючи, що розширення газу є рівномірним, він одержав коефіцієнт об'ємного розширення повітря, що дорівнював  $\frac{1}{266}$  град<sup>-1</sup> за шкалою Цельсія, а також аналогічні результати для інших газів (закон Гей-Люссака) [439].

„Розширення газу не залежить від різних фізичних властивостей чи особливої природи цих тіл. Всі гази в цілому, наскільки я можу зробити висновок, при однаковому тиску розширюються від теплоти однаково”, — писав він [440,с.20]. У цьому ж році Дж.Дальтон незалежно від

Гей-Люссака також провів серію досліджень, у яких одержав коефіцієнт об'ємного розширення  $0,00373 \text{ град}^{-1}$  та вперше висловив думку про те, що сам процес розширення не є рівномірним. Слід зазначити, що Ж.Шарль дійшов аналогічного висновку раніше, у 1787 р., але його дані не були опубліковані.

Роботи з вивчення теплових властивостей газів та їх теплоємностей продовжували Ж.Гей-Люссак, С.Пуассон, П.Дюлонг, Н.Клеман, Ш.Дезорм та інші вчені. У 1813 р. у дослідях Ф.Делароша та Ж.Берара було одержано перші достовірні дані теплоємностей водяної пари, повітря, кисню та інших газів, що знаходяться під постійним тиском [441]. Проте спроби визначити теплоємності газів при сталому об'ємі успіху не мали. Разом з тим ряд спостережень вказували на те, що теплоємності одного газу при сталих тиску та об'ємі мають бути різними. Так, Е.Дарвін в 1788 р. та М.Пітке в 1799 р. вказували на пониження температури повітря під час його розширення, Молле у 1803р. відзначав підвищення температури газу при його стисканні [442]. На різницю даних теплоємностей як для газів, так і для твердих і рідких тіл першим вказав Ж.Біо у 1816 р.[443, Т.4, С.275].

У 1807 р. дослід, проведений Ж.Гей-Люссаком, не підтвердив залежність теплоємності газу від об'єму, проте ним було експериментально показано різницю питомих теплоємностей газів при сталих об'ємі та тиску ( $C_p > C_v$ ) [444]. Ці дані наштовхнули С.Пуассона у 1807 р та П.Лапласа у 1816 р. на дослідження зв'язку між явищем поширення звуку в газах і тепловими ефектами, які виникають при зміні його об'єму [445,с.364;34]. Оскільки відомі на той час розрахунки 1686 р І.Ньютона значення швидкості звуку не збігались з експериментальними даними, то для їх узгодження Ж.Пуасон та П.Лаплас запропонували ввести у вираз для швидкості звуку у повітрі коефіцієнт  $\sqrt{\frac{C_p}{C_v}}$ . Це дозволило знайти співвідношення  $C_p/C_v$  з формули  $V_{\text{зв.екс.}} = V_{\text{зв.теор}} \sqrt{\frac{C_p}{C_v}}$  [446]. Воно було підтверджено експериментами Клемана і Дезорма у 1819 р., які одержали для повітря значення 1,357 (сучасне значення 1,41) [447], а також П.Дюлонга у 1829 р., який визначив  $C_p/C_v$  для різних газів. Він також одержав, що це співвідношення не є сталим для різних газів та вперше показав, що даний факт не пов'язаний з похибкою експерименту [448].

У 1819 р. Дюлонг та Пті розробили метод визначення різних речовин за часом охолодження тіл, на основі якого було встановлено загальний закон: добуток питомих теплоємностей хімічно простих речовин є сталим [449]. У 1830–1840 роках Ф.Нейман, В.Реньо та Г.Копп підтвердили цей закон та поширили його на хімічні сполуки.

Ключовим моментом для подальшого розвитку всієї фізичної науки стало формулювання у 1850–1851 рр. р.Клаузіусом та В.Томсоном другого закону термодинаміки. Цей закон був результатом узагальнення численних дослідних фактів і дав поштовх формуванню термодинаміки як нової наукової феноменологічної дисципліни, предметом якої є процеси перетворення тепла в будь-які види руху та взаємодії або, навпаки, їх перетворення у тепло. Причому вже у 80-ті роки ХІХ століття стало зрозуміло, що обидва постулати термодинаміки виходять за рамки вчення про теплоту та є загальними законами природи.

Створення та становлення термодинаміки викликало відродження молекулярно-кінетичних уявлень. Так, на цій основі Дж.Джоуль вперше обрахував швидкість молекули водню, температуру абсолютного нуля та теплоємність деяких газів. У 1856 р. А.Кр'юнігом була створена наочна модель газу як ідеально пружних куль, що не взаємодіють між собою і хаотично рухаються із сталою швидкістю, поки не зіткнуться одна з одною чи зі стінкою посудини. Ця модель виявилась надзвичайно важливою та дозволила показати, що кінетична енергія поступального руху залежить від температури, а також пояснити явища дифузії, розчинення та теплопровідності [450]. А.Кр'юніг також вперше висловив ідею про необхідність застосування ймовірнісних методів розрахунку. „Шлях кожної молекули настільки невпорядкований, що обчислити його неможливо. Проте, використовуючи закони теорії ймовірностей, можна разом з тим замість цілковитого хаосу одержати повний порядок”, — писав він [451].

Надзвичайно важливий внесок у створення кінетичної теорії газів зробив р.Клаузіус. У 1857 р. вийшла його праця «Про природу руху, що ми називаємо теплом», в якій він, на основі моделі „бильярдних куль” Кр'юніга, доповненій введенням обертального та коливального рухів молекул, дав пояснення теплових процесів, зокрема теплопровідності і внутрішнього тертя, у газах, рідинах, твердих тілах. У ній чітко вказувалося, що теплова енергія є кінетичною енергією хаотичного руху молекул та обґрунтовувались закони Дальтона і Гей-Люссака. р.Клаузіусу

належить також заслуга введення поняття довжини вільного пробігу та нової функції стану тіла — дисгрегації як міри ступеня його дисперсії.

Закон збереження імпульсу вимагав, щоб тиск газу був пропорційний середній кінетичній енергії молекул з деяким універсальним коефіцієнтом пропорційності. Разом з тим, із закону Бойля—Маріотта випливало, що ця енергія пропорційна абсолютній температурі. Це положення виявилось фундаментальним, і має виключення у сучасній квантовій теорії тільки при дуже низьких температурах.

Крім того, дані оцінки швидкостей молекул у газах виявились неочікувано високими і на перший погляд були несумісними з фактом повільної взаємної дифузії газів та їх малою теплопровідністю. Прямі експериментальні виміри були здійснені тільки у 1920 р. О.Штерном. Однак у 1858 р. р.Клаузіус показав, що в цих явищах головну роль відіграла не стільки швидкість молекул, скільки середня довжина вільного пробігу між двома зіткненнями. Числові значення цих середніх шляхів, які пояснили повільність дифузії, одержав у 1860 р. Дж. Максвелл у своїй знаменитій праці про розподіл молекул за швидкостями.

Розглянуті результати в галузі молекулярно-кінетичної теорії стали підґрунтям при подальшому застосуванні ймовірнісних уявлень для опису фізичних процесів і створення рівноважної статистичної механіки в працях Дж.Максвелла, Л.Больцмана та Дж.Гіббса (середина XIX—початок XX століття), у яких було встановлено зв'язок між тепловою та механічною формами руху матерії.

Статистична фізика як самостійний розділ фізики виникла у другій половині XIX століття. Саме тоді у 1860 р. ідеї р.Клаузіуса було розвинуто Дж.Максвеллом, з праці якого 1860 р. у розвитку кінетичної теорії починається новий етап, пов'язаний з систематичним застосуванням теорії ймовірностей [452].

У цій праці Дж.Максвелл одержав закон розподілу молекул газу за швидкостями (розподіл Максвелла). Тут він також вперше висловлює сумнів з правомірності застосування законів класичної механіки до опису руху атома і зазначає, що розглядає свою модель тільки як математичну аналогію реальності. „Слід бути обережними при перенесенні висновків, одержаних в експериментах з тілами, які складаються з величезної кількості частинок, на більш тонкі спостереження та експерименти, які могли б бути виконані, якщо б можна було сприймати окремі молекули» , — писав він [453].



Дж.Максвелл вказував, що зіткнення молекул приводитимуть не просто до вирівнювання їх швидкостей, а навпаки, будуть сприяти встановленню деякого розподілу їх значень. Таким чином, Дж.Максвелл вперше було сформулював статистичний підхід, а саме, необхідність пошуку не швидкості окремої молекули, а кількості молекул із заданою швидкістю в даний момент. Суть запропонованого статистичного підходу полягала в тому, що даний закон неможливо звести до динаміки, він відображає лише статистичну впорядкованість, що виникає у системі з великою кількістю частинок. Термін „статистична механіка” також було введено Дж.Максвеллом, але пізніше, у 1878 р.

Вважаючи, що молекули взаємодіють за законом пружних куль, після зіткнення яких всі напрямки є рівноймовірними, і що компоненти швидкостей кожної молекули — незалежні випадкові змінні, Дж.Максвелл формулює закон розподілу газу за швидкостями:

$$f(v) = n \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} e^{-\frac{m(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{2kT}}.$$

На цій основі він вперше одержав довжину вільного пробігу  $l=1/447000$  дюйма, число зіткнень в 1 секунду  $n=8077200000$ , а також розвинув молекулярну теорію дифузії та показав незалежність коефіцієнта в'язкості від густини. Останній результат ним також було підтверджено експериментально. Зазначимо, що на основі висновків Максвелла в 1865 р. І.Лошмідт вперше обчислив „діаметри молекул” повітря на основі середніх довжин вільного пробігу як  $12 \cdot 10^{-8}$  см, а число молекул у молі — як  $10^{23}$ .

У 1866 р. Дж.Максвелл у праці „Динамічна теорія газів” [454] дав строге доведення свого закону розподілу швидкостей, виключивши попередню умову про незалежність компонент швидкості та розглядаючи молекули не як пружні кулі, а як точкові центри сил. Він також ввів гіпотезу про пропорційність сил відштовхування п'ятому ступеню відстані між центрами, що, проте, викликала серйозні заперечення.

Поступово почали також розглядатись молекули із внутрішніми ступенями вільності, для яких було встановлено узагальнений закон розподілу та виведено важливий наслідок — закон рівнорозподілу: середня кінетична енергія будь-якого ступеня вільності пропорційна

абсолютній температурі, причому коефіцієнт пропорційності є універсальною сталою. Обчислення питомої теплоти багатоатомних газів на основі цього закону дало результати, які повністю відповідали досвіду.

Слід зазначити, що кінетична теорія газів привнесла у фізику принципово нову точку зору ймовірного розгляду. Оскільки неможливе вивчення шляхів окремих молекул, то суттєвим стало обчислення середніх параметрів: середнього вільного пробігу, середнього числа ударів молекули в одиницю часу, розгляд тиску та температури як середніх значень для великої кількості молекул.

### **3.2. Формування рівноважної статистичної фізики як синтез молекулярно-кінетичних та термодинамічних уявлень (кінець XIX – 20-ті рр. XX ст.) (Дж. Максвелл, Л.Больцман, Дж.Гіббс)**

Невдовзі дослідження Дж.Максвелла продовжив Л.Больцман. Завдяки чіткому формулюванню ймовірнісних понять та введенню постулату про молярну та молекулярну неупорядкованість газу, Л.Больцман у 1872 р. вивів формулу, що описує розподіл молекул газу в зовнішньому полі, зокрема, в полі сили тяжіння (розподіл Больцмана). Він також довів теорему про рівномірний розподіл кінетичної енергії за ступенями вільності, з'ясував ймовірнісний зміст ентропії та дав статистичне тлумачення другого закону термодинаміки.

Виявилось, що у випадку розподілу Больцмана густина газу зменшується з висотою, а його температура залишається сталою. Одержане кінетичне рівняння, що дозволило описувати нерівноважні стани газів, стало також одним з важливих досягнень вченого. Це рівняння давало зміну функції розподілу, яка характеризує кількість частинок в околі деякої точки фазового простору. Хоча Л.Больцман не одержав розв'язку свого рівняння в загальному випадку, проте він вивів надзвичайно важливий наслідок, який було названо спочатку мінімум-теоремою, а потім  $H$ -теоремою. На основі цієї теореми у 1877 р. Л.Больцману вдалося встановити кількісний закон, який інтерпретував другий закон термодинаміки в термінах теорії ймовірностей, а також провести аналіз межі застосування поняття ентропії [455].

При цьому виявилось, що знайдена ним величина  $H$  не може зростати під впливом руху атомів, а виявляє необоротний характер, з точністю до знака подібний поведінці термодинамічної ентропії. Мінімум  $H$ , як показав Больцман, відповідає розподілу Максвелла.

Особливість даної теореми полягає в тому, що з оборотного механічного рівняння випливало існування функції  $H$ , яка необоротно змінювалась з часом за рахунок зіткнень молекул, що також розраховувались за законами механіки, інваріантними відносно заміни  $t$  на  $-t$ . На цій основі Больцман показав неможливість повної оборотності молекулярного руху і одержав мікроскопічну інтерпретацію другого закону термодинаміки. «Вершиною життя Больцмана з 1877 р. стало доведення зв'язку між ентропією та ймовірністю стану, який все ясніше усвідомлювався — однієї з найбільш глибоких думок усієї фізики» , — писав М.Лауе [38,с.117]. Числове значення сталої Больцмана в 1900 р обчислив М.Планк.

Ідея статистичної закономірності дозволила Л.Больцману показати, що енергія переходить з менш ймовірної форми в більш ймовірну і що якщо початковий розподіл енергії в тілах був менш ймовірним, то надалі ймовірність розподілу буде збільшуватися. Він вважав, що при повній хаотичності рухів молекул немає підстав припускати, що в одній частині тіла швидкості молекул будуть у середньому відрізнятися від швидкості молекул в іншій частині. Якщо з деякої причини такий стан виникає, то надалі через повну безладність молекулярних переміщень він зміниться на більш ймовірний рівномірний розподіл температури. Тому тепло і переходить від нагрітого тіла до холодного. Ймовірність цього кінцевого стану системи більше, ніж початкового, або, що то ж саме, ентропія системи протягом цього необоротного процесу зростає. Проте, оскільки стан максимальної ймовірності близький до стану з дещо меншою ймовірністю, то завжди будуть зустрічатись невеликі відхилення від нього — флуктуації. Це був принципово новий результат ймовірнісного розгляду явищ природи.

Таким чином, у працях Л.Больцмана було сформовано точку зору, згідно з якою статистичні закономірності є об'єктивними законами, яким підпорядковуються молекулярні процеси на відміну від законів для окремих частинок, та показано, що другий закон термодинаміки має ймовірнісний характер. Таке розуміння суттєво відрізнялось від поглядів Максвелла і Клаузіуса, які розглядали статистику як метод розрахунку середніх величин. Больцман же трактував статистичні закономірності як новий вид об'єктивного причинного зв'язку, при якому розподіл енергії прямиє до найбільш ймовірного.

У подальшому це призвело до необхідності пошуку зв'язку статистичних законів з динамічними законами, поставило проблему обґрунтування статистичного детермінізму та направленості часу. Причому важливо, якщо на ранній стадії розвитку молекулярно-кінетичної теорії використання статистики розглядалось лише як засіб подолання обмежених людських можливостей, то після Больцмана така точка зору виявила свою обмеженість. Стало зрозумілим, що статистичні закономірності принципово неможливо звести до динамічних законів і що вони відповідають тим випадкам причинного зв'язку, які обумовлені колективним характером процесів. Ці закономірності охоплюють більш широке коло явищ, а необхідності, які лежать в їх основі, подають розподіл ймовірностей. Таким чином, до формулювання законів природи було вперше введено об'єктивну випадковість. Тим самим принцип детермінізму не тільки не зазнав поразки, а й суттєво розширився і збагатився новим змістом.

Однак спочатку роботи Больцмана не привернули уваги вчених. У той час ідея про можливість вивести другий закон термодинаміки із законів механіки ще не втратила своїх прихильників, і сучасникам Больцмана здавалася незвичною думка про те, що цей, один з найбільш загальних законів природи, має ймовірнісну природу. Такого погляду дотримувались В.Міхельсон, Г.Гельмгольц.

З часом теорію Больцмана було піддано критиці. Особливо різко проти неї виступали послідовники Е.Маха, які взагалі не погоджувались з існуванням молекул. Тільки у ХХ столітті, після створення А.Ейнштейном та М.Смолуховським теорії броунівського руху, ідея про статистичний характер другого закону термодинаміки одержала визнання. Експериментальна перевірка закону розподілу Максвелла — Больцмана була здійснена у 1932 р. О.Штерном.

Інший підхід до побудови статистичної фізики розглядався американським фізиком Дж.Гіббсом — сучасником Больцмана. Ще у 1862 р. р.Клаузіус вперше поставив питання про можливі сфери застосування термодинаміки та запропонував використати її для опису хімічних процесів. Принциповими на цьому шляху стали дослідження Дж.Гіббса, в яких статистична механіка вперше розглядалася як самостійна наука і одержала фундаментальне обґрунтування, застосовне для довірливих, а не тільки для газопо-

дібних систем. Сьогодні розподіл Гіббса є принципом, який відіграє таку саму роль у статистичній фізиці, яку відіграють рівняння Ньютона в класичній механіці або рівняння Максвелла в електродинаміці. Тому значення для фізичної науки праці Гіббса “Основні принципи статистичної механіки” [456], що вийшла в 1902 році, часто порівнюють зі значенням “Трактату” Максвелла з електродинаміки.

У цій роботі Дж.Гіббс розглядав феноменологічний метод термодинаміки як перше наближення при вивченні фізичних і хімічних процесів. „Закони термодинаміки неважко одержати з принципів статистичної механіки, які вони не цілком виражають, а слугують чимось на кшталт сліпого провідника у пошуках цих принципів”, — писав Дж.Гіббс [457,т.2,с.9].

Він розглядає у  $6N$ -мірному просторі рух консервативної системи з  $N$  частинок, яка описується узагальненими координатами та імпульсами. Далі Гіббс вводить ансамбль однаково розподілених за різними фазами механічних систем, кожна з яких подано точкою у  $6N$ -мірному фазовому просторі, а рух усього ансамблю описується рівнянням неперервності для рідини, що не стискається, згідно з теоремою Ліувілля.

Термодинамічна система, яка розглядається, уявляється таким ансамблем. Для неї ставиться завдання знайти в будь-який момент часу, як повне число систем, розподілене за конфігураціями та швидкостями, якщо в деякий момент їх розподіл відомий. При цьому основним є рівняння, яке описує швидкість зміни числа систем, замкнених усередині певних малих меж координат та швидкостей.

У праці Дж.Гіббса в трьох еквівалентних формулюваннях доводиться теорема 1838 р. Ж.Ліувілля про збереження фазового об'єму при зміні консервативної динамічної системи з часом: як збереження фазового об'єму, фазової густини та ймовірності фази. На цій основі ним виведено основне рівняння статистичної механіки:

$$\left( \frac{dD}{dt} \right)_{p,q} = - \sum \left( \frac{dD}{dp_i} \dot{p}_i + \frac{dD}{dq_i} \dot{q}_i \right),$$

яке в умовах статистичної рівноваги має вигляд:

$$\sum_i \left( \frac{dD}{dp_i} p_i \cdot + \frac{dD}{dq_i} q_i \cdot \right) = 0 ,$$

де  $D$  — фазова густина. Це рівняння вперше було оприлюднено у 1884 р., а надруковано в 1885 р. [458].

У загальному випадку ця проблема надзвичайно складна, тому Гіббсом було розглянуто тільки випадок статистичної рівноваги. Розподіл систем, які входять в ансамбль, за динамічними станами є реальною системою в тому сенсі, що середнє за ансамблем від деякої функції  $G(p,q)$  динамічного стану системи  $G = \int G(p,q)f(p,q,t)dpdq$  збігається зі значенням відповідної термодинамічної функції  $G_{набл}$ , яка визначається експериментально. Результат цього спостереження — це середнє за часом  $G(p,q)$ :

$$G_{набл} = \frac{1}{t} \int_{t_0}^{t_0+t} G(p,q)dt .$$

Побудоване рівняння Гіббс назвав принципом збереження фазової густини та сформулював його так: "Для ансамблю механічних систем, тотожних за своєю природою, які перебувають під дією сил, що визначаються тотожними законами, але неперервно розподілені за фазами, фазова густина є сталою у часі для змінних фаз рухомої системи за умови, що сили системи є або функції тільки її координат, або залежать ще й від часу" [456,с.23].

Залежно від способу фіксації макроскопічного стану систем ансамблю Гіббс розрізняє макроскопічний статистичний ансамбль — ансамбль ізольованих систем, в якому задається енергія системи, її зовнішні параметри (об'єм, зовнішні поля) та кількість частинок в ній; канонічний статистичний ансамбль — ансамбль систем, які перебувають у термостаті з фіксованою кількістю частинок; та великий канонічний статистичний ансамбль — ансамбль систем в загальному термостаті з нефіксованою кількістю частинок.

Дослідження властивостей канонічного ансамблю дозволило Дж.Гіббсу показати аналогію статистичних та відповідних термодинамічних рівнянь. Це стало можливим завдяки збігу середніх за ансамб-

лем значень різних величин з їх значеннями, які одержані з рівнянь феноменологічної термодинаміки. Таким чином, даний результат став підтвердженням адекватності формалізму канонічного розподілу термодинамічним методам дослідження. При цьому було досягнуто більшу порівняно з Максвеллом та Больцманом простоту у формулюванні принципів статистичної механіки. Зокрема, більш загального визначення набуло поняття ентропії. Воно виявилось справедливим для будь-якого числа ступенів вільності, на відміну від больцманівського, яке справедливе лише в нескінченній границі.

Цитуючи Дж.Гіббса, можна сказати, що він точно визначив величини та строго довів „положення, які мають силу для будь-якого числа ступенів вільності і які при достатньо великому числі ступенів вільності будуть сприйматися людиною як однакові з величинами і положеннями емпіричної термодинаміки” [456,с.168].

Розподіл Гіббса дозволив найбільш загальним чином зв'язати статистику з термодинамікою і тим самим завершити молекулярно-кінетичне обґрунтування цієї феноменологічної науки, розпочате Больцманом. При цьому виявились деякі вади класичної статистичної фізики, наприклад, неможливість створення послідовної теорії теплового випромінювання, пояснення парадокса Гіббса, вирішення питання про значення ентропії (третє начало термодинаміки). Це вдалося подолати лише на наступному етапі розвитку статистичної фізики, пов'язаному з появою квантової механіки.

Водночас з розробкою фундаментальних питань кінетичної теорії газів та статистичної фізики розвивались застосування цієї теорії. Це, насамперед, праці Й.Ван дер Ваальса, який в 1873 р. запропонував рівняння стану реальних газів і рідин, а також дослідження його учнів, які визначили поправки до закону ідеальних газів при високих тисках.

Г.Лоренц також використав кінетичну теорію як основу для своєї електронної теорії провідності у металах (1903 р.) і розв'язав кінетичне рівняння Больцмана для спеціального випадку суміші важких і легких частинок. Проста наближена форма його розв'язку широко використовується і нині.

Важливими для розробки математичних методів рівноважної статистичної механіки стали праці Ч.Дарвіна та р.Фаулера 1922 р., в яких було запропоновано метод обчислення статистичного інтеграла [459–461].



### 3.3. Проникнення квантових уявлень у статистичну фізику (1900–1925)

Квантова ера почалась у фізиці в грудні 1900 р. з відкриття дискретної природи випромінювання в класичних працях М.Планка [462]. Одним з тих вчених, хто стояв біля джерел створення квантової статистичної фізики, був також А.Ейнштейн. Він присвятив різним питанням статистичної фізики, термодинаміки та кінетичної теорії газів близько 40 статей, написаних ним від 1900 до 1925 р. Завдяки його виключно плідному інтересу до цих галузей фізики ним було зроблено важливий внесок у розвиток квантової теорії.

Так, у 1905 р. А.Ейнштейн дав повне пояснення винайденому у 1827 р. броунівському руху — одному з найбільш наочних підтверджень уявлень молекулярно-кінетичної теорії та реального існування атомів [463]. Він показав, що теоретично значущим є тільки відношення середньоквадратичного зміщення до кореня квадратного з часу, що було підтверджено вимірюваннями у 1906 р. Ж.Перрена та Т.Сведберга, на основі яких було експериментально визначено стала Больцмана та число Авогадро [464–465]. Незалежно теорію броунівського руху на основі своєї теорії флуктуацій у 1906 р. розробив М.Смолуховський [466].

Слід зазначити, що одним з принципів моментів в історії термодинаміки, який зв'язав два різних розділи фізики — термодинаміку та оптику, стала праця Г.Кірхгофа 1859 р., у якій він застосував термодинамічні принципи до оптики та створив термодинаміку теплового випромінювання. Г.Кірхгоф поширив поняття температури на випромінювання, яке перебуває у термодинамічній рівновазі з тілами, встановив пропорційність при однаковій температурі між поглинальною та випромінювальною здатністю тіл та її незалежність від природи тіла.

Першим, хто знайшов правильний вираз для функції Кірхгофа та обґрунтував спектральні закономірності випромінювання абсолютно чорного тіла, був М.Планк. Його фундаментальні результати 1900 р. — гіпотеза кванта, а також виведений ним закон розподілу енергії у спектрі випромінювання абсолютно чорного тіла, стали ключовими моментами у розвитку статистичної фізики та започаткували квантову статистику — теорію поведінки фізичних систем, що складаються з величезної кількості мікрочастинок.

Теорія теплового випромінювання, створена М. Планком, успішно пояснила властивості теплового випромінювання, що спостерігаються експериментально, та усунула принциповий дефект класичної теорії теплового випромінювання — „ультрафіолетову катастрофу”. Проте спробам застосувати до випромінювання, як до фотонного газу, класичні статистичні критерії перешкоджали зміна числа частинок в об’ємі та неможливість існування деяких станів внаслідок квантової гіпотези. Індійський фізик Д.Бозе, розглядаючи теплове випромінювання як газ фотонів, вважав, що до фотонів не можна застосовувати закони статистики як для звичайних матеріальних частинок та вніс поправку на нерозрізненість фотонів [467]. Він підраховував не самі кванти, а комірки, що містять у собі їх різну кількість. Беручи це за основу, при визначенні найбільш ймовірного стану Ш.Бозе одержав закон Планка.

Німецький переклад статті Бозе потрапив на редактування до А.Ейнштейна, і він дав їй позитивний відгук. Водночас А.Ейнштейн одержав дисертацію Л. де Бройля. Зіставляючи результати цих вчених та застосовуючи нові статистичні закони до ідеальних газів, у своїх двох статтях 1924 та 1925 рр. А.Ейнштейн побудував квантову теорію одноатомного газу і дав чисто статистичне обґрунтування фазового переходу, який зараз називають конденсацією Бозе—Ейнштейна [430, т.3, с.481–503]. Коментуючи свою роботу, А.Ейнштейн вказував, що різниця між підрахунком „за Больцманом” та „за Бозе—Ейнштейном” віддзеркалює невідому поки що гіпотезу про взаємний вплив молекул невідомої поки що природи. Таким чином, як зазначав А.Пайс, А.Ейнштейн підійшов дуже близько до створення хвильової механіки систем тотожних частинок [468, с.58]. Так була побудована квантова статистика, що одержала назву статистики Бозе—Ейнштейна.

Створення квантової статистики стало найяскравішим досягненням А.Ейнштейна в галузі статистичної фізики. Як і при одержанні інших результатів у квантовій теорії, він, використовуючи статистичні методи, побудував квантову теорію молекулярного газу, відкрив явище конденсації, на основі теорії флуктуацій ввів поняття корпускулярно-хвильового дуалізму методом, який відрізнявся від запропонованого раніше Л.де Бройлем.

Питаннями причинності А.Ейнштейна почав займатися починаючи 1916 р. з праці про нове доведення закону Планка „До теорії теплого випромінювання”, в якій він вказав на відсутність класичної причинності у процесі спонтанного випромінювання [430, т.3. с.44]. Однак побудована у 1923–1928 рр. квантова механіка викликала у нього глибоке занепокоєння принциповою статистичністю тлумачення мікроявищ та відходом від класичного причинного опису явищ природи. Адаже, за твердженням О.Штерна, Ейнштейн був глибоко переконаний в тому, що термодинаміка, на відміну від інших галузей фізики, не повинна змінюватися. „Я захоплююсь працями фізиків молодого покоління, що об'єднані під назвою квантова механіка, та вірю в правильність цієї теорії. Я тільки вважаю, що обмеження, які приводять до статистичного характеру її законів, повинні бути з часом ліквідовані”, — писав А.Ейнштейн [430, т.4, с. 110]. Скептичне ставлення А.Ейнштейна до квантової механіки стало причиною його відмови виступити з доповіддю про квантову статистику на Сольвеевському конгресі 1927 р. „Це пов'язано з тим, що я не міг брати активну участь у сучасному розвитку квантової теорії, а це необхідно для підготовки доповіді. Частково це пояснюється тим, що я не дуже здібний до сприйняття бурхливих змін, які відбуваються, частково тим, що не схваляю чисто статистичний підхід, на якому базуються нові теорії”, — писав він Г.Лоренцу [468, с. 414].

Відстоюючи тезу про те, що статистичний характер квантової механіки пов'язаний з її недостатністю внаслідок неповноти набору величин, які необхідні для її опису, А.Ейнштейн вважав, що подальший розвиток теорії мікроявищ буде відбуватись в напрямі побудови теорії елементарного процесу, заснованої на принципі причинності. За його точкою зору, в майбутній фізиці статистична квантова теорія мала займати приблизно таке ж місце, яке займає статистична механіка в рамках класичної. У

1927 р. А.Ейнштейн зазначав: ”Тільки в квантовій механіці диференціальний метод Ньютона перестав відповідати дійсності і строга причинність залишила нас, але останнє слово в цій галузі ще не сказано. Так нехай же дух ньютонівського методу надихне нас для відновлення відповідності між фізичною реальністю та найбільш глибокою рисою вчення Ньютона — строгою причинністю” [430, т.4, с.94].

Розв’язанню цієї задачі були присвячені останні роки А.Ейнштейна, коли він шукав шляхи до побудови саме такої фундаментальної теорії — єдиної теорії поля, в якій природнім чином збереглася б класична причинність, а квантова механіка випливала б з неї як конструктивна теорія.

Ще одна квантова статистика була створена в 1926 р. незалежно італійським фізиком Е.Фермі й англійським фізиком П.Діраком (статистика Фермі—Дірака) [469,470]. Статистика Фермі—Дірака застосовується до частинок з напівцілим спіном, зокрема, до електронів. Важливо, що у дослідженнях цих вчених, крім принципу нерозрізності частинок, враховувався також принцип Паулі.

Слід підкреслити, що такий загальний результат, яким є встановлення нової квантової статистики, Фермі одержав, намагаючись розв’язати часткову задачу виведення формули Сакура—Тетроде. Цікаво, що стаття Фермі вийшла на декілька місяців раніше, ніж праця Дірака. Проте в статті Дірака не згадувалось про результат, одержаний Фермі. Тому Фермі вирішив у листі від 25 жовтня 1926 р. звернути увагу Дірака на свою працю. Як говорив Дірак в інтерв’ю 1963 р., він насправді читав статтю Фермі “Про квантування ідеального одноатомного газу”, але забув про це, оскільки його шлях був зовсім іншим: він не намагався розв’язати конкретну проблему, а прагнув в найзагальнішому вигляді сформулювати свою нову квантову механіку [471, с.167].

Перший крок до відкриття статистики Фермі зробив, коли надрукував замітку про теорію Штерна визначення абсолютного значення константи ентропії ідеального газу [472]. У 1924 р. він повернувся до задачі про константу ентропії, розглядаючи в невеликій, але змістовній статті труднощі, на які наштовхуються при застосуванні правил квантування Зоммерфельда до системи ідентичних частинок. Фермі зазначив, що зазвичай недолік застосування правил Зоммерфельда до складних систем пов’язували з неможливістю розділити змінні, однак на його думку,

цей недолік є наслідком неможливості розрахунку орбіт для системи, яка містить у собі декілька ідентичних частинок. Ці частинки не можна розрізнити, отже, не можна і застосовувати умови Зоммерфельда, які виникає потреба модифікувати. Як саме змінити правила квантування, Фермі не пропонує. Однак він продовжує обчислювати точне значення константи ентропії ідеального газу та формулює декілька гіпотез щодо її квантування. Він також розглянув різні способи квантування ідеального газу, вказавши, що вони не є еквівалентними і дадуть різні значення ентропії.

Невдовзі Фермі написав статтю італійською мовою, яку розширив у публікації в “*Zeitschrift für Physik*” (доповідь 7 лютого 1926 р.). Він вказав, що через притягання до центра (області пружного потенціалу) густина газу є функцією відстані, яка обертається на нуль на нескінченно великій відстані. Таким чином, при нескінченно великих  $r$  виродження „знімається” і статистика переходить у класичну. Серед безпосередніх результатів, одержаних Фермі за допомогою нової статистики, є визначення константи ентропії для ідеального газу.

Подальший розвиток квантової статистики обумовив появу математичного апарата, що значно відрізняється від того, який застосовувався в класичній статистиці. Так, зв'язок квантових статистик з математичним апаратом квантової механіки був обґрунтований П. Діраком, а їх зв'язок зі спіном — В. Паулі у 1940 р.

На відміну від Фермі, Дірак в статті “До теорії квантової механіки” поставив задачу дати найбільш узагальнене формулювання квантової механіки. Він записав рівняння Шредінгера у формі, яка придатна не тільки для визначення власних функцій, а й для будь-якого стану. Погоджуючись з точкою зору Гейзенберга щодо ролі спостережуваних величин у фізичній теорії, він вважає  $(m, n)$  та  $(n, m)$  одним станом системи двох електронів. Дійшовши висновку, що власні функції сукупності частинок розділяються на дві категорії (симетричні та антисиметричні відносно координат), Дірак вказав, що антисиметрична функція тотожно обертається на нуль, якщо два електрона містяться на одній орбіті, та, відповідно, мають однакові квантові числа. Звідси робився висновок, що власні стани сукупності частинок, підпорядкованих принципу Паулі, мають бути зображені антисиметричними функціями, інакше на одній орбіті була б довільна кількість електронів. Але це не відповідає досліду.

Даний результат Дірак узагальнив на теорію ідеального газу, яка виявилась ідентичною теорії Фермі. У цьому випадку, якщо розглянути симетричні функції, то ми прийдемо до статистики Бозе—Ейнштейна, а в антисиметричному випадку — до статистики іншого типу, яка справедлива для електронів у атомі.

Квантова статистика відіграла важливу роль у розвитку фізики конденсованих середовищ, і, насамперед, теорії твердого тіла. У подальшому її було застосовано при створенні електронної теорії металів, загальної теорії електропровідності твердих тіл, включаючи напівпровідники, використано при поясненні природи рідкого стану, вивченні стану речовини при низьких температурах (пояснення третього закону термодинаміки, надпровідності, надплинності), побудові теорії фазових переходів II роду.

Так, квантову теорію у 1907 р. Ейнштейном було застосовано для обчислення теплоємності твердих тіл, а в 1911 В.Нернстом — теплоємності газів. У 1928 р. А.Зоммерфельд за допомогою функції розподілу Фермі—Дірака описав процеси перенесення в металах, на засадах цього набула подальшого розвитку квантова теорія електро- і теплопровідності, термоелектричних, гальваномагнітних та інших кінетичних явищ у твердих тілах.

Відкриття в 1911 р. надпровідності Г.Камерлінг-Оннесом і надплинності П.Капіцею у 1938 р. стимулювали розвиток нових методів у квантовій статистиці. Були побудовані феноменологічні теорії надплинності Л.Ландау в 1941 р. і надпровідності Л.Ландау і В.Гінзбургом у 1950 р., розроблені нові методи розрахунку в статистичній квантовій теорії багаточастинкових систем. Одним з найяскравіших досягнень стало створення Дж.Бардіним, Л.Купером і Дж.Шриффером і незалежно М.М.Боголюбовим у 1957 р. мікроскопічної теорії надпровідності [473,474].

Суттєвий внесок у розвиток квантової статистичної фізики зробив р.Фейнман, який запропонував метод інтегрування за траєкторіями (1948), графічний метод зображення амплітуд розсіяння та народження частинок (1949), теорію квантованих вихорів у надплинному гелії та зв'язок спектра елементарних збуджень з кореляційною функцією густини, яка вимірюється методами дифракції нейтронів (1955 р.) [475].



## РОЗДІЛ 4. ПЕРЕДІСТОРІЯ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ (XIX–20-ті рр. XX ст.)

### 4.1. Експериментальні передумови сприйняття статистичної фізики в Україні (М.П.Авенаріус, М.О.Умов, М.Д.Пильчиков, Ф.Н.Шведов)

Науково-дослідна діяльність у галузі фізики в Україні в XIX — на початку XX століття була тісно пов'язана з навчальним процесом у вищій школі, передусім у Харківському, Київському, Львівському та Одеському університетах. Хоча вона розвивалась не систематично, а завдяки зусиллям окремих вчених, проте їх досягненнями часто ставали роботи високого рівня. Так, питання тлумачення будови матерії вивчалось в Україні вже в XVII–XVIII ст., перш за все науковцями Києво-Могилянської академії, які розглядали матерію головним об'єктом фізики як і вважали її за основу природних речей. І.Гізель, Ф.Прокопович, М.Козачинський, Г.Кониський та Г.Щербацький сформулювали погляд про єдність і однорідність як земної, так і небесної матерії. Ф.Прокопович, крім того, вважав, що вона має властивості протяжності: ширини, довжини, глибини, висоти, і запропонував принцип кількісного і якісного збереження матерії. Таке розуміння матерії створило передумови для виникнення на теренах України механіко-матеріалістичних концепцій, відповідно до яких матерія сприймалась як сукупність незмінних первинних елементів Всесвіту [96]. Найгрунтовніше таке розуміння матерії розглядав Г.Щербацький, який вважав, що вона є субстанцією, яка може являти собою атоми Демокріта.

На початку XIX століття ідеї атомної будови матерії також підтримували в Україні ряд вчених. Одним з них був вчений-природознавець і філософ-матеріаліст Т.Ф.Осиповський, який розглядав речовину як



сукупність частинок, що взаємодіють одна з одною внаслідок сил тяжіння та відштовхування. Він працював у Харківському університеті від часу його заснування. Народився Т.Ф.Осиповський 22 січня 1765 р. у с. Осиповому (тепер Володимирської обл.), у 1799–1803 рр. був професором фізико-математичних наук в Петербурзькому педагогічному інституті, від часу заснування Харківського університету у 1805 до 1820 р. — професором математики Харківського університету (1813–1820 рр. — ректор). В актових промовах “Про простір і час” 1807 р. і “Міркування про динамічну систему Канта” 1813 р. [476,477] він розглядав простір і час як умови існування матерії та вважав рух без матерії неможливим [478].

Прихильником реальності атомів, кінетичної теорії теплоти, хвильової теорії світла та противником теорії теплороду також був завідувач з 1839 р. кафедри фізики Харківського університету В.І.Лапшин. Він народився 1809 р. у Петербурзі, де закінчив у 1828 р. університет. Після навчання в Професорському інституті при Дерптському університеті в 1835–1863 рр. працював у Харківському університеті, в 1865–1870 рр. був професором Новоросійського університету. Серед вчених—прихильників дискретної будови речовини можна назвати завідувача кафедри фізики А.П.Шимкова, за ініціативою якого в 1867-1899 рр. для вивчення курсу математичної фізики у Харківському університеті були рекомендовані монографії р.Клаузіуса та Дж.Максвелла.

У Київському університеті курс механічної теорії теплоти читав професор М.І.Тализін, перший вітчизняний фізик, керівник кафедри фізики у 1858–65 рр. У Львівському університеті активно працював як викладач і вчений А.Гандль (народився у 1837). Він був автором ряду праць, що були надруковані у періодичних виданнях Віденської академії, зокрема, про будову рідин, кристалічну будову солей, поглинання світла.

Протягом ХІХ та до початку 30-х років ХХ століття в Україні було виконано ряд робіт, які сприяли експериментальному дослідженню того кола явищ, що в подальшому започаткували феноменологічну базу формування статистичної фізики, і теоретичному осмисленню та розробці нових ймовірносних ідей. Це, перш за все, роботи в галузі критичного стану речовини Михала Петровича Авенаріуса та його учнів, в галузі термодинаміки та дифузії водних розчинів Миколи Олексійови-

ча Умова, а також роботи з дослідження термодинамічного потенціалу Миколи Дмитровича Пильчикова та Олексія Петровича Грузинцева, теоретичні роботи Маріана Смолуховського з броунівського руху та праці з обґрунтування другого закону термодинаміки Миколи Миколайовича Шиллера, Миколи Миколайовича Пирогова та Тетяни Олексіївни Афанасьєвої-Еренфест.

Значний внесок у молекулярну фізику та вивчення критичного стану речовини належить професору Київського університету, засновнику першої в Україні науково-дослідної лабораторії експериментальної фізики Михайлу Петровичу Авенаріусу. В 1875 р. він вперше в університеті запровадив для студентів лабораторний практикум з фізики, почав залучати здібних студентів до дослідницької діяльності, став ініціатором створення при університеті Товариства дослідників природи.

Михайло Петрович Авенаріус народився 7 вересня 1835 р. у Царському Селі. У 1858 р. закінчив Петербурзький університет, у 1865–1890 рр. завідував кафедрою фізики та метеорологічною обсерваторією Київського університету (з 1866 р. - професор), у 1876 р. був обраний членом-кореспондентом Петербурзької Академії наук.

Значний вплив на формування М.П.Авенаріуса як вченого здійснив М.І.Пирогов, який з 1858 р пропагував докорінне оновлення та зміни університетської освіти, в основу чого вважав за необхідне покласти тісний зв'язок викладання та наукового дослідження. Основне завдання освіти М.І.Пирогов вбачав у засвоєнні студентами наукового методу. „Покажіть освіченій людині в певному масштабі, на будь-якій будь-якої галузі науки, тільки по суті, метод і механізм, яким сучасна наука доходить до результатів — і все інше він одержить сам, якщо дійсно прагне знань», — писав він [479, с.571-572].

З травня 1862 р. до жовтня 1864 р. М.П. Авенаріус у складі групи молодих вчених, загальне керівництво освітою яких здійснював М.І.Пирогов (так званих пироговців), був відряджений Міністерством народної освіти Росії за кордон для підготовки до професорської діяльності. Більшу частину часу він провів у Берліні, де слухав лекції в університеті, брав участь у фізичних зборах у Г.Магнуса та проводив у його лабораторії самостійну наукову роботу. Протягом останнього півроку він місяць ознайомлювався з методикою викладання фізики у Парижі, а потім працював у Гейдельберзі у Г.Кірхгофа.

О.Г.Столетов так писав про М.П.Авенаріуса: „У літописах російської фізики М.П.Авенаріусу належить почесне місце і як досліднику, і як вчителю. Ім'я його не повинно бути забутим і в світовій науці” [480, с.432]. „Це була людина м'якого і в той же час прямого характеру, він ніколи не кривив душею, говорив і діяв завжди відповідно до своїх переконань і на його слово можна було покластися. До науки та професорських обов'язків ставився відповідально, як до святого діла. Свідчення рідних, колег та учнів доповнюють це особисте враження. Вони всі згадували про нього як про відмінного сім'янина, якого гаряче любили в родинному колі, як про стійкого та надзвичайно чесного члена колегії, як друга та улюбленця учнівської молоді. В колективі співробітників та у колі товаришів він користувався повагою навіть у людей з „іншого табору”, не визнавав опортунізму та формалістики. Студенти цінували його як захоплюючого лектора та невтомного робітника—керівника, а також як надійного захисника у правому ділі. Завжди делікатний, доброзичливий без поблажок, він вмів щадити молоде самолюбство, вмів надихнути талановитого та підбадьорити слабкого; являв собою високий моральний приклад, а за необхідності не відмовляв і у матеріальній допомозі”, — так змальовував науковий портрет М.П.Авенаріуса О.Г.Столетов [480, с.426].

Наукові праці М.П.Авенаріуса були присвячені вивченню термoeлектричних явищ та молекулярній фізиці, зокрема, критичному стану речовини. У зв'язку з розвитком парової машини визначення критичних величин було однією з найважливіших задач фізики у 70–80-х роках ХІХ століття. Цими питаннями займались в Росії одночасно з дослідженнями, що проводилися в київській лабораторії, також О.Г.Столетов, П.О.Зилов, Б.Б.Голіцин. “Використовуючи основи механічної теорії тепла і дані з критичного стану тіл, останнім часом фізики з особливим інтересом розглядають питання щодо змін, які відбуваються в тілах під дією теплоти. Проте через недостатність дослідних даних, особливо з критичного стану тіл, постали перепони — з одного боку, на шляху подальших теоретичних пошуків, а з іншого — щодо вирішення, яким з пропонованих теорій надати перевагу”, — писав М.П.Авенаріус про предмет своїх досліджень [481, с.7].

У 1865 р. М.П.Авенаріус захистив при Петербурзькому університеті магістерську дисертацію „Про термoeлектрику”, в 1866 р. — там же докторську дисертацію „Про електричні різни-

ці металів при різних температурах”. У цих та подальших працях було досліджено залежність термоелектрорушійної сили від температури спаїв, подано і обґрунтовано на основі механічної теорії теплоти формулу цієї залежності [482,483]. “Застосування основ механічної теорії тепла до явищ термоелектрики приводить до того ж виразу електрорушійної сили термоелектричного елемента, який було одержано з дослідів як точний емпіричний вираз закону залежності електрорушійної сили елемента від температури спаїв”, — писав він. [483, с.5]

У курсі фізики О.Д.Хвольсона ця поправка приписується англійському фізику Тету, який дав її трьома роками пізніше, ніж вона була опублікована М.П.Авенаріусом.

З 1873 р. інтереси М.П.Авенаріуса зосередилися на вивченні рідкого стану і пари при зміні температури і тиску. Він перший вказав, що у критичній точці прихована теплота випаровування дорівнює нулю, а також запропонував новий метод визначення критичної температури для ряду рідин [484].

Протягом 1875–1889 рр. М.П.Авенаріус зі своїми учнями В.І.Зайончевським, О.Е.Страусом, К.М.Жуком та О.І.Надеждіним виконав цикл досліджень критичних значень для багатьох речовин, які ввійшли в основний фонд фізичних величин і довго залишалися незмінними [485,486]. М.Авенаріус також установив формулу теплового розширення рідин:  $V = a - b \log(T_{кр} - t)$ , де  $T_{кр}$  і  $t$  — відповідно температура критична і спостережувана;  $a$  і  $b$  — деякі сталі для цієї рідини.

Ця формула точно визначала зміну об'єму рідини залежно від зміни температури на всьому проміжку температур аж до критичної [487,488].

Розквіт фізичної лабораторії Авенаріуса припадає на 1877–1886 рр. У 1874 р. університет виділив 2 тис. крб. на переобладнання фізичної лабораторії із хімічної, проте умови, в яких проводилися дослідження, були надто важкими. Незважаючи на це, роботи лабораторії набули широкого авторитету.

Так, учень М.П.Авенаріуса В.І.Зайончевський у 1878 р. опублікував працю «Визначення пружності насиченої пари деяких рідин при високих температурах» [489]. Він виміряв пружності насиченої пари

до критичної температури і знайшов критичні температури та тиски сірчаного ефіру, сірчистого ангідриду, сірчистого вуглецю, бензолу, ацетону, хлористого етилу, уксусного етилу, чотирьохлористого вуглецю та інших речовин. Останньою в цьому ряду була дисертаційна праця Надеждіна, яка побачила світ у 1886 р, вона містила у собі визначення критичної температури, критичного тиску та критичного об'єму 18 речовин [481].

За словами О.Г.Столетова, з усього набору критичних температур, який був зібраний у другому виданні 1894 р. відомих фізичних таблиць Ландольдта і Бернштейна, близько четвертої частини було одержано в молодій київській лабораторії [480, т.2, с.429]. Через 30 років ці таблиці вийшли у п'ятому виданні. Багато даних в них було замінено, однак дані В.І.Зайончевського 1878 р. (які були найбільш ранніми з усіх даних у таблицях) та дані О.І.Надеждіна були збережені повністю. З 34 визначень критичних об'ємів, поданих у таблицях, половина належить О.І.Надеждіну. Достовірність дослідних визначень, зроблених співробітниками М.П.Авенаріуса, підтверджується також тим фактом, що і через 70 років у "Довіднику з глибокого охолодження в техніці" М.П.Малкова та К.Ф.Павлова [490], виданому у 1947 р., теж були наведені визначені О.І.Надеждіним критичні температури ізобутілену та пропілену. У перекладі "Довідника фізика-експериментатора" Д.Кей та Т.Лебі [491], виданому у 1949 році, також зустрічаються одержані В.І.Зайончевським дані критичних температур та тисків для сірчаного газу і хлороформу.

Особливий інтерес становило на той час визначення критичних значень для води, як речовини, надзвичайно важливої для застосування. Вимірювання для води були пов'язані з особливими труднощами, оскільки металеві ємності для цього не підходили через їх недостатню герметичність, а скляні — лопались. Р.Клаузіус, І.Ван де Вальс, Ш.Каньяр де ла Тур, Д.І.Менделєєв та ін. намагалися різними шляхами знайти критичну температуру води. Результати, що було знайдено, значно різнилися між собою, від 323 до 873<sup>o</sup>C. Таким чином, критична температура води була невизначена.

На основі спостережень за критичними температурами двох рідин один з учнів М.П.Авенаріуса О.Е.Страус у 1880 р. показав, що для суміші спостерігається критичний стан, подібний до критичного стану чис-

тих рідин, та встановив емпіричну формулу для визначення критичної температури суміші за критичними температурами її компонент. Використовуючи цю формулу, він розробив (1882р.) метод експериментального визначення критичної температури води, за яким ця температура становила  $370 + 5^{\circ}\text{C}$  (сучасне її значення  $374,15^{\circ}\text{C}$ ). Користуючись цими даними, він також знайшов критичний тиск для води, який на той час не можна було визначити. Він становив 195,5 атм. (сучасне його значення дорівнює 225,65 атм.). На ряді прикладів О.Е.Страус показав, якщо це значення застосовувати для обчислення температур кипіння різних рідин, то можна дістати результати, дуже близькі до спостережень [492].

Вперше пряме визначення критичної температури води провів 7 березня 1885 р. О.І.Надеждін (1885–1886) за допомогою винайденого ним приладу — диференціального денсиметра [493]. О.І.Надеждін народився в 1858 р., у 1882 р. закінчив Київський університет і був залишений при ньому для підготовки до професорського звання. Вже на третьому курсі за працю “Про зміни, помітні у властивостях тіл поблизу так званої температури абсолютного кипіння” одержав золоту медаль і премію ім.І.Пирогова, в 1886 р. захистив магістерську дисертацію „Етюди з порівняльної фізики”.

Оскільки оптичний метод встановлення критичного стану для води був незастосовний, то Надеждін запропонував для цього новий метод, який увійшов у науку як “метод Надеждіна”. Прилад Надеждіна складався з трубки, що була вставлена в оправу з тригранною віссю, на якій вона могла коливатись, подібно до коромисла терезів. Спочатку трубка врівноважувалась так, щоб вона займала горизонтальне положення. Потім частина трубки заповнювалась рідиною, а інша частина — насиченою парою. При цьому трубка нахилалась. Критична температура визначалася як така, при якій зникає межа між густинами рідини та пари, що виявлялось за поверненням трубки у горизонтальне положення. Важливою перевагою методу Надеждіна стала можливість його застосування у тих випадках, коли речовина має такий інтенсивний колір (як бром чи йод), що складно побачити меніск, або коли ця речовина руйнує скло (як вода). За методом Надеждіна було одержано  $t_{\text{кр.води}} = 358^{\circ}\text{C}$ , що добре узгоджувалося з даними Страуса. Результати з визначення критичної температури води, які О.Г.Столетов характе-

ризував як кульмінаційний момент діяльності лабораторії Авенаріуса, сприяли зростанню її наукового авторитету. Роботи лабораторії навіть друкувалися в центральному російському фізичному журналі (Журнал Російського фізико-хімічного товариства) під загальним заголовком: "З фізичної лабораторії університету св. Володимира."

О.І.Надеждин також встановив зв'язок між точкою кипіння й критичною температурою рідини [494]. Досліджуючи залежність від температури пружності насиченої пари деяких органічних рідин та визначаючи критичні температури декількох сумішей, він помітив, що критична температура і температура кипіння сумішей підвищуються на одну й ту ж величину. О.І.Надеждин припустив, що цей закон діє для близьких за складом речовин-полімерів, ізомерів. Тому, досліджуючи ряд ізомерів, він переконується в існуванні такої закономірності. Дещо пізніше з'явилася праця Павлевського, який висловив такі ж припущення для гомологів і дав результати вимірювань для 17 ефірів в підтвердження цієї закономірності. О.І.Надеждин навів також подальші приклади існування цього співвідношення для гомологів. [495,496]. Вибираючи ряди чи групи з аналогічними властивостями (гомологи, ізомери, похідні одних і тих же радикалів) і знаходячи для них часткові закономірності, О.І.Надеждин вважав, що часткові узагальнення мають слугувати ступенями для загального синтезу, для виявлення вигляду функції, яка зв'яже властивості тіла з його будовою та молекулярною масою. В знайденій закономірності він вбачав ознаки того, що залежність температури кипіння від молекулярної маси і будови має той же вигляд, що і для критичної температури.

У наступній своїй праці про теплоємність рідин [497] О.І.Надеждин установлює нову закономірність: відношення теплоти випаровування рідини до добутку теплоємності на критичну температуру є сталим для будь-якої рідини, якщо проводити порівняння при температурах, за яких питомий об'єм кожної рідини становить однакову частку її критичного об'єму (відповідні об'єми). Він також підтвердив це положення експериментальними даними, і далі показав, що відношення внутрішніх робіт при випаровуванні і нагріванні різних рідин, взятих при відповідних об'ємах, прямо пропорційно критичному тиску. Для пояснення цих фактів О.І.Надеждин пропонує гіпотезу, що в рідині всі молекули об'єднуються в групи і що значення критичного тиску пропорційне числу молекул, які утворюють одну складну частинку рідини.

У вступі до своєї дисертації О.І.Надеждін розкриває вихідні методологічні положення даної роботи. “Субстратом всіх фізичних явищ є матерія чи речовина” [481,с.2], “...атомістична гіпотеза одержала таку ступінь ймовірності, що дозволяє хімічний атом вважати реальністю” [481,с.4]. Виступаючи прихильником атомістичної гіпотези, О.І.Надеждін висловлював свою думку, що безперечним є “існування того, що рухається, найменших частинок, атомів” [481,с.4].

Для всебічного та повного вивчення фізичних явищ О.І.Надеждін вважав за необхідне досліджувати залежність між фізичними властивостями та складом тіл. Він очікує, і вважає це висновком із Періодичної системи елементів Д.І.Менделєєва, що повинен існувати “тісний зв’язок між атомною (іноді частинковою) вагою і фізичними та хімічними властивостями тіла” [481,с.4]. Завдання “знайти та виміряти цей зв’язок” він розглядає як програму майбутніх досліджень [481,с.3].

У дисертації О.І.Надеждіна досліджується дія тепла на тверді та рідкі тіла. Розуміючи, що за станом сучасної йому науки результати порівняльного вивчення дії тепла на різні речовини “ще довго будуть мати частковий характер”, вчений прагне максимально повно розглянути та критично проаналізувати наявні дослідні відомості, розібрати та перевірити існуючі теорії. Дисертація складалась з трьох частин. У першій розглядалось теплове розширення твердих тіл, співвідношення між коефіцієнтом розширення, молекулярним об’ємом та температурою плавлення. Друга частина присвячена тепловому розширенню рідин і переходу тіл з рідкого стану в газоподібний. Тут містяться власні визначення О.І.Надеждіним критичного стану ряду ефірів жирних кислот, викладено його методику, описано критичний стан. Розглянуто також коефіцієнти розширення при звичайних температурах, на основі численних вимірювань лабораторії Авенаріуса дискутується питання про залежність між точкою кипіння та критичною температурою. Визначаючи, що сталість різниці цих двох температур спостерігається у метамірних та гомологічних речовин (і то тільки приблизно) для температур кипіння при нормальному тиску, вчений пов’язує цю залежність зі сталістю добутку коефіцієнта розширення на абсолютну температуру кипіння рідини. Далі в праці порівнюються формули для розширення рідин, досліджуються висновки з рівняння стану щодо розширення рідин, а також розглядаються дані про пружність насиченої пари.



“Я Вам надіслав працю Наєждіна. Сподіваюсь, що Вам буде приємно побачити такий капітальний доробок, виконаний без допомоги закордонних вчених....Тільки одні його визначення пружності пари в цій праці заслуговують, на мою думку, докторського ступеня”, — писав М.П.Авенаріус А.Г.Столетову 21 березня 1886 р. [498].

Через рік, у передмові до посмертного видання фізичних досліджень О.І.Наєждіна, М.П.Авенаріус так оцінює цю дисертацію: “Пропоновані ним дослідні дані критичного стану тіл та пружності рідин при високих температурах переважають за своїм значенням всі відомі на цей час дані. Оскільки цей матеріал ним і опрацьований, то дане дослідження є капітальною працею” [499, с.5–6] О.Г.Столетов також схвально характеризував праці О.І.Наєждіна з критичного стану речовини, називаючи його “глибоким знавцем питання, яке нас цікавить” [480].

На жаль, вже через два місяці після захисту дисертації, в червні 1886 р. О.І.Наєждін помер у Німеччині, куди його було відряджено з науковою метою на два роки. З сумом писав М.П.Авенаріус про долю свого найталановитішого учня: “Хоча Росія не може поскаржитись на відсутність здібностей у її синів, але рідко ці здібності приносять бажані плоди. Ті чи інші негаразди заважають виконанню часто дуже широко поставлених наукових завдань, і залишається тільки шкодувати про втрату для науки молодих сил, які подавали великі надії. Зі смертю О.І. ми втратили набагато більше; незважаючи на свої молоді роки, він не тільки подавав надії, а й встиг блискуче виправдати найсміливіші очікування своїх наставників та товаришів і в 28 років посісти почесне місце серед європейських вчених” [499,с.6]

Такий перебіг подій, безумовно, був пов'язаний з тим, що протягом усього періоду інтенсивної діяльності умови роботи в лабораторії Авенаріуса були складними. “Якщо врахувати те, що кімнати мають висоту 8 футів, а вікна дуже малі, то можна сказати, що приміщення нашої лабораторії до неможливості мізерне”, — писав В.І.Зайончевський О.Г.Столетову 4 жовтня 1895 р. [498]. У той же час за словами учня М.К.Авенаріуса Е.К.Шпачинського, “Авенаріус по декілька годин поспіль проводив щоденно в одній з кімнат своєї лабораторії серед запалених газових горілок та розжарених магнусовських ванн, при неможливо високій температурі, в сухій переповненій вуглекислотою атмосфері, весь час на ногах, терпляче слідкуючи за показаннями термометрів, з олівцем у руці для запису об'єму та ін.” [498].

Роки таких занять підірвали сили М.П.Авенаріуса і вже у 1890 р. у віці 55 років він вимушений був припинити читання лекцій. Ядро лабораторії теж розпалося. Так, В.І.Зайончевський перейшов на роботу доцентом до Інституту сільського господарства та Лісівництва в Нову Олександрію, О.Е.Страус переїхав у 1881 р. у Петербург, де почав займатись електротехнікою, К.М.Жук зосередився на учбовому процесі.

Розглянуті роботи лабораторії Авенаріуса мають численні приклади оригінальних методичних прийомів, які давали можливість всебічно і глибоко розглядати складнодоступні явища. Наприклад, М.П.Авенаріус для створення потрібних тисків міг замінити тепловим розширенням допоміжної рідини нагнітальний насос, який був відсутній, тобто розв'язував поставлену задачу надзвичайно простими технічними засобами. Його співробітники завжди наслідували його принцип про те, що "необхідно розглядати явище у можливо більш широких межах зміни" причини, яка його обумовлює" [500].

Фізичні дослідження проводились також і в інших університетах на теренах України. Так, активна наукова діяльність з фізики в Новоросійському (Одеському) університеті пов'язана з іменами П.Павлова, М.О.Умова, М.Д.Пильчикова та Ф.Н.Шведова. У Одеському університеті широко проводились дослідження з молекулярної фізики молекулярної фізики. Тут розпочав свою діяльність П.Павлов, теоретично і експериментально вивчаючи зв'язки між термодинамічними властивостями дисперсійних систем і ступенем їх дисперсійності. Ним була вперше встановлена залежність температури топлення від поверхневої енергії твердого тіла, вивчені термодинамічні потенціали хімічних елементів та їх сполук, рівновага між кристалічною та рідинною фазами, сформульовано загальне правило фаз конденсованих систем, досліджувались адсорбція і поверхневий натяг на межі поділу двох фаз.

З 1868 р. в університеті працював Ф.Н.Шведов (1840–1905 рр.). Він народився у Кілії (тепер Одеська обл.), закінчив 1863 р. Петербурзький університет. З 1870 р. був професором Новоросійського університету, в 1895–1903 рр. — його ректором. У 1870 р. йому було присуджено ступінь доктора фізики після захисту дисертації „Про закони перетворення електрики в теплоту”. Ф.Н.Шведов створив фізичну лабораторію, поповнив фізичний кабінет новими приладами, на посаді ректора домігся створення хімічного і фізичного інститутів. Наукові

праці вченого стосувалися молекулярної фізики, електрики, астрофізики. Ф.Н.Шведов перший спостерігав (1889 р.) пружність форми й аномалію в'язкості колоїдних розчинів, вивчав процес релаксації напруг у колоїдах, вивів рівняння стаціонарного в'язко-пластичного плинину речовини. Він став засновником нового наукового напрямку — реології дисперсних систем та високомолекулярних сполук [501].

У 1871 р. доцентом кафедри фізики Новоросійського університету було обрано М.О.Умова (1846–1915 рр.). Він народився в Симбірську, в 1867 р. закінчив Московський університет, у 1871 р. захистив магістерську дисертацію „Теорія термомеханічних явищ у твердих пружних тілах”. Протягом 1871–1893 рр. працював у Новоросійському університеті (у 1875 р. став професором). У 1893–1911 рр. він — професор Московського університету, де з 1896 р. після смерті О.Г.Столетова очолював кафедру фізики.

Уже в своїй магістерській праці М.О.Умов зробив спробу об'єднати теорію пружності з термодинамікою та теорією теплопровідності. У працях 1873–1874 рр., особливо в докторській дисертації „Рівняння руху енергії в тілах”, М.О.Умов запровадив поняття густини енергії, швидкості її руху, а також потоку енергії, вивів диференціальні рівняння руху енергії в пружному твердому тілі й рідині, сформулював теорему, що пов'язує потік механічної енергії крізь площадку з тиском, якого вона зазнає, та швидкістю руху енергії (теорема Умова). Він перший застосував закон збереження енергії до вивчення хвильових процесів, показавши, що поширення хвиль пов'язане з перенесенням енергії, та запропонував його нове формулювання. Ця робота М.О.Умова мала суттєве значення для побудови статистичної фізики нерівноважних станів і необоротних процесів.

В університеті М.О.Умовим були виконані також теоретичні дослідження з теорії коливальних, термодинаміки, термопружності. Для його робіт характерним було філософське тлумачення проблеми [502]. Зокрема, він запровадив поняття теплових напруг, виконав експериментальні дослідження дифузії водневих розчинів та явищ поляризації світла в каламутних середовищах тощо. Досліджуючи явища дифузії у водних розчинах, М.О.Умов сформулював більш точний закон для знаходження дифузійного потоку, а саме показав суттєві обмеження застосування закону Фіка, згідно з яким кількість речовини, що продифундувала, пропорційна до градієнта концентрації, а коефіцієнт

пропорційності (коефіцієнт дифузії) вважається величиною сталою. Вчений встановив, що у випадку дифузії водних розчинів солей і кислот закон Фіка можна застосовувати тільки при ізотермічних умовах та для дуже слабких розчинів [503].

Експериментальні дослідження проводились також у Харківському університеті. У 1892–1902 рр. на кафедрі фізики працював відомий вітчизняний фізик М.Д.Пильчиков. Зокрема, його монографія "Матеріали щодо питання про застосування термодинамічного потенціалу до виведення електрохімічної динаміки" (1896 р.) започаткувала вітчизняні дослідження термодинаміки процесів у електролітах. У 1881–1919 рр. у Харківському університеті працював також О.П.Грузинцев, який у 1900-1914 завідував кафедрою фізики, був засновником семінару і фізичної бібліотеки при ньому. Важливим внеском в дослідження властивостей середовищ, що складаються з великої кількості частинок, стала запропонована ним концепція "світлового ефіру", який він трактував як певне дискретне середовище, що складається з "ефірних частинок" [504]. Основні рівняння теорії виводяться вченим на механічній основі, де ефірні частинки взаємодіють між собою та з матеріальними частинками, внаслідок чого в кожній точці ефірного середовища виникає ряд механічних сил — пружності, тertia, гідростатичного тиску, опору руху ефірних частинок, дії матеріальних частинок на ефірні частинки. Зворотною дією ефірних частинок на матеріальні частинки, яка виявлялася як опір руху ефірних частинок і зміна пружності ефіру, О.П.Грузинцев нехтував внаслідок її малості. Таким чином, ним були розглянуті фізичні взаємодії в системі, що складається з ефірних та матеріальних частинок, та визначена робота кожної із сил на основі використання закону збереження енергії.

Починаючи з 1894 р. року наукові інтереси О.П.Грузинцева зосередились безпосередньо на питаннях молекулярної фізики та термодинаміки. Ним були побудовані теорія осмотичного тиску (1894), теорія капілярності та гідростатики (1899–1901 рр.), теорія стехіометрії (1912 р.), досліджено асоціації молекул у твердих сполуках (1914 р.). Результати своїх досліджень в цій галузі він підсумував та узагальнив у двох монографіях: "Термодинамічна теорія хімічних реакцій" (1913 р.) та "Застосування термодинаміки до хімічних реакцій з твердими фазами" (1915 р.). Зокрема, в праці "Застосування термодинаміки

до хімічних реакцій з твердими фазами” ним було розроблено теорію хімічних реакцій, що базується на методі термодинамічного потенціалу. Причому вчений вважав за необхідне враховувати енергію не тільки поступального та обертального, а й коливального руху молекул, а при розрахунках внутрішньої енергії він використовував квантову теорію твердого тіла, яка саме тоді створювалась П.Дебаєм, М.Борном і Т.Карманом.

Курс лекцій О.П.Грузинцева з термодинаміки, який читався ним навесні 1912 р. і був виданий у 1913 р., також містить у собі результати його власних досліджень у галузі термодинаміки хімічних реакцій. Характерною рисою курсу є широке застосування методу термодинамічного потенціалу. Значна частина книги присвячена теорії хімічної рівноваги фаз. Слід підкреслити, що у розділах про термодинамічні властивості твердих тіл використовуються положення квантової теплоємності твердих тіл, створеної А.Ейнштейном у 1907 р. В праці також подано власне виведення автором формули Ернста—Ліндемана, вперше одержаної Ф.Ліндеманом у 1910 р. напівемпіричним шляхом, а також наведено її критичний аналіз та приклади застосувань [505,506].

Важливе значення для розвитку уявлень про будову речовини мала діяльність в Харківському університеті професора хімії у 1826–1911 рр., академіка АН СРСР, засновника вітчизняної фізичної хімії М.М. Бекетова. Він став одним з тих, хто ввів закон діючих мас, поставив та оригінально вирішив питання про зв'язок між будовою і властивостями елементів, про перетворення елементів та енергетичні зміни, які супроводжують ці перетворення, а саме, про відношення між атомними масами елементів, що з'єднуються та кількістю теплоти, яка виділяється при цьому. У підручнику неорганічної хімії він висловлював передбачення, якщо буде відкрито подільність атомів, то процеси, пов'язані із нею, цілком відізнятимуться від хімічних процесів і будуть супроводжуватися величезним виділенням енергії [507]. З праць послідовників М.М.Бекетова у галузі термодинаміки та вивчення розчинів у Харківському університеті слід відзначити книгу професора І.П.Осипова “Вступ до вивчення термодинаміки хімічної рівноваги” та його докторську дисертацію “Теплота горіння органічних речовин та її зв'язок з явищами гомології, ізомерії та конституції”, а також праці професора П.Д.Хрущова “Про деякі нові дослідження з теорії розчинів” та професора Д.П.Турбаби “Термодинаміка” [508].

## 4.2. Перші теоретичні узагальнення ймовірнісних уявлень (М.М.Пирогов, М.Смолуховський, М.М.Шиллер, Т.О.Афанасьєва Еренфест)

Розглянуті у розділі 3.4. експериментальні роботи сприяли формуванню на їх базі теоретичних узагальнень. Так, одним з перших, хто розпочав роботу в галузі узагальнень ймовірнісних уявлень в Україні, був відомий польський фізик Маріан Смолуховський (1872–1917 рр.), який працював у Львівському університеті протягом 1898–1913 рр. Саме його основоположні класичні праці зі статистичної фізики започаткували систематичні теоретичні дослідження у Львівському університеті. Насамперед, це статті „Середній шлях газових молекул і його зв’язок з теорією дифузії” та „До кінетичної теорії броунівського молекулярного руху і суспензій”, які вийшли з друку у 1906 р. [509,510].

М.Смолуховський народився в м.Фордербрюле поблизу Відня. У 1894 р. закінчив Віденський університет, де його вчителями були Стефан та Екснер. Удосконалював М.Смолуховський свої знання в лабораторіях Г.Липпмана, В.Томсона та Е.Варбурга. Так, у 1895–1896 рр. у Парижі у Липпмана він теоретично й експериментально вивчав теплове випромінювання, в 1896–1897 рр. в Глазго у Томсона — радіоактивність та провідність газів, у 1897 р. працював у Берліні у Варбурга. Після повернення до Австрії у 1898 р. одержав у Відні вчений ступінь. У 1898–1913 рр. працював у Львівському університеті (з 1900 р. — професор теоретичної фізики). З 1913 р. був професором Краківського університету, пізніше — ректором. Помер М.Смолуховський 25 вересня 1917 р. у Кракові [511,221,10].

“Коло наукових інтересів М.Смолуховського охоплювало молекулярну теорію теплоти. Особливо його цікавили ті наслідки з молекулярної кінетики, які не можна було зрозуміти з точки зору класичної термодинаміки; він відчував, що тільки вивчивши ці явища, можна буде подолати сильний опір, який чинили молекулярній теорії вчені кінця ХІХ століття”, — писав про нього А.Ейнштейн. [430,т.4,с.36]

Ще у 1898 р. М.Смолуховський теоретично обґрунтував явище температурного стрибка між стінкою і газом при поширенні тепла в сильно розріджених газах, яке було відкрито експериментально в 70-х роках XIX століття Е.Варбургом та А.Кундтом. Це стало досить значущим аргументом на користь молекулярної кінетики [221,10]. Проте загальне визнання кінетична теорія одержала лише в 1905–1906 рр., коли було теоретично доведено, що вона може кількісно пояснити відкритий у 1828 р. Р.Броуном хаотичний рух частинок у рідині [512].

Саме у цей період одночасно з працями А.Ейнштейна [513,514] з'являються зазначені вище праці М.Смолуховського з броунівського руху [466,515]. Дослідження вченого з цієї тематики, а також з питань межі застосування другого закону термодинаміки, обґрунтовували й розвивали ідеї Л.Больцмана. Таким чином, виходячи з кінетичного закону рівномірного розподілу енергії, М.Смолуховський запропонував у 1905–1906 рр. незалежно від А. Ейнштейна теорію броунівського руху, яка сприяла утвердженню кінетичної теорії теплоти та її висновків.

Праці з броунівського руху М.Смолуховського побачили світ через кілька місяців після праць А.Ейнштейна. Зі слів М. Смолуховського можна навіть зробити припущення про те, що ці результати були одержані декількома роками раніше. “Питання про суть відкритого ботаніком Робертом Брауном (1827 р.) явища змулених у рідині мікроскопічних частинок, яке багато дискутувалося, нещодавно було підняте у двох теоретичних працях Ейнштейна, результати яких достатньо відповідають тим, які я одержав декілька років тому, виходячи зовсім з інших міркувань, і які я вважаю з тих пір вагомим аргументом на користь кінетичної природи цього явища. Хоч я досі не зміг одержати експериментальні результати, тобто перевірити це уявлення, тим не менш я наважився одразу ж надрукувати ці міркування; я сподіваюсь допомогти поясненню цього цікавого явища, тим більше, що мій метод є більш безпосереднім і простим, а тому може бути переконливішим, ніж метод Ейнштейна”, — писав М.Смолуховський [466, с.133-134].

Він звертав увагу на те, що метод Ейнштейна заснований на міркуваннях непрямого характеру, які не завжди видаються достатньо переконливими. Наприклад, застосування законів осмотичного тиску до частинок та обчислення швидкості їх дифузії чи застосування боль-

цманівського закону (про статистичний розподіл стану систем під дією потенційних сил) до опору тертя, якого зазнають частинки. Проте тожність своїх результатів з результатами Ейнштейна надзвичайно задовольняла вченого. “У будь-якому разі збіг результатів двох різних методів, які висвітлюють механізм одного й того ж процесу, є позитивним фактом. Різниця в числовому множнику пояснюється введенням різних положень для спрощення, і для застосувань, природно, не має ніякого значення», — зазначав М.Смолуховський [466,с.155].

Виступаючи прихильником статистичних ідей Л.Больцмана, М.Смолуховський вважав, що перевірити їх можна перш за все там, де статистична теорія виходить за межі термодинаміки, наприклад, розраховуючи саме ті миттєві випадкові відхилення, яких слід очікувати відповідно до кінетичної теорії від середнього, найімовірнішого стану, що відповідає термодинаміці, а також розглядаючи питання щодо змоги виявлення їх на досліді у деяких випадках. “Ми обмежимося заздалегідь розглядом таких станів, які відповідають термодинамічній рівновазі, оскільки тут особливо простежуються протиріччя. Дійсно, тоді як згідно зі звичайним термодинамічним уявленням, замкнена система прямує до стану рівноваги, який однозначно визначається умовою мінімуму потенціалу, то відповідно до кінетичної теорії, стан системи у термодинамічній рівновазі повинен коливатися біля деякого середнього нормального стану, і навіть у деяких випадках може відхилятися від останнього як завгодно далеко», — писав він [515,с.167].

Розглядаючи явище з різних сторін, він дійшов висновку, що воно “залежно від прийнятої точки зору виявляється трьома різними формами: з макроскопічної точки зору називається “дифузією”; з мікроскопічної, тобто якщо слідкувати за історією окремої матеріальної частинки, це — “броунівський молекулярний рух”, і, нарешті, якщо не упускати з уваги певний елемент об’єму та зазначати кожен змін числа частинок у цьому об’ємі, то тут мова йде про “флуктуації концентрації”. Природно, що між цими різними формами явищ існує внутрішній зв’язок, і нашою головною задачею є теоретичне дослідження цього зв’язку та більш точне визначення границь застосування звичайної теорії дифузії” [516,с.333].

Наочна теорія Смолуховського, хоч і більш наближена, дозволила детально прослідкувати механізм явища броунівського руху і поясни-



ти його не лише як результат теплового руху молекул навколишнього середовища, а й кількісно обґрунтувати реальність молекул. Зокрема, вченим було показано, що внутрішнє тертя постійно зменшує миттєву швидкість частинки в рідині, тоді як неупорядковані співдари відновлюють її.

“Пізнання суті броунівського руху привело до несподіваного зникнення всіх сумнівів щодо достовірності больцманівського розуміння термодинамічних законів. Стало ясно, що термодинамічна рівновага в точному значенні цього слова взагалі не існує, а скоріше, кожна надовго залишена сама по собі система здійснює неупорядковані коливання навколо стану ідеальної термодинамічної рівноваги», — писав А.Ейнштейн [430,т.4,с.37].

У подальшому, виконуючи свою програму встановлення зв'язку між броунівським рухом, дифузією та флуктуаціями, М.Смолуховський побудував у 1913–1914 рр. теорію флуктуацій [517,518] та на її основі у 1916 р. теорію колоїдних розчинів [516]. Його праці з теорії флуктуацій не лише сприяли утвердженню молекулярної теорії, а й стали підґрунтям для розуміння зв'язку між статистичною фізикою і термодинамікою. Так, встановлені закони флуктуацій рівноважних станів у молекулярних системах вчений використав для обґрунтування обмеженості тлумачення р.Клаузіусом другого закону термодинаміки. Теорія М.Смолуховського дала можливість визначити час, через який настає новий аномальний стан системи, а отже, спростувала гіпотезу „теплової смерті” Всесвіту. В узагальнюючих доповідях у Мюнстері у 1912 р. та у Геттінгені 1913 і 1916 рр. М.Смолуховський розвиває свої нині загальноприйняті погляди на межі застосування другого закону термодинаміки як статистичного закону [515–517]. Ним було також запропоновано власне формулювання другого закону термодинаміки: “Неможливо здійснити жодного автоматичного пристрою, який би тривалий час продукував корисну роботу за рахунок теплоти більш низької температури” [515,с.197]. Крім того, вчений був переконаний, що дійсно необоротних явищ не існує, що “...всі явища, які здаються необоротними, в дійсності є оборотними. Для цього не потрібно ніякого спеціального пристрою, необхідно тільки зачекати, поки це станеться само собою відповідно до законів випадку, тобто поки настане порівняно велике відхилення від нормального стану. Будь-якого стану з

часом буде досягнуто, яким би “неймовірним” він не був, і буде одержано будь-яке значення роботи  $A$  за рахунок навколишньої теплоти. При цьому тільки у випадку, коли ми значно виходимо з області середньої флуктуації, час  $T$ , в середньому необхідний для цього, настільки сильно зростає, що границя відношення  $A/T$  дорівнює нулю, тобто

$$\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{A}{T} = 0.$$

Таким же чином при чесній азартній грі можна виграти будь-яку бажану суму, якщо тільки гра буде продовжуватись досить довго, тобто якщо ми будемо мати в розпорядженні достатньо часу і капіталу, щоб не бути примушеними достроково припинити гру. Однак, незважаючи на це, така гра не може бути постійним джерелом заробітку, оскільки час, необхідний за припущенням для виграшу деякої суми, зростає у квадратичному відношенні до величини останньої” [515, с.197–198].

Слід зазначити, що оскільки флуктуації у випадку броунівського руху дуже малі, то в цілому вони не спостережувані. Однак у 1908 р. М.Смолуховському вдалося знайти іншу групу спостережуваних явищ, у яких ці флуктуації виявляються майже безпосередньо. Це — опалесценція газів та рідин в критичному стані. В 1908 р. на основі теорії флуктуації М.Смолуховський побудував теорію критичної опалесценції. Він показав, що чим більше стисливість речовини, або окремої складової частини цієї речовини, тим більшими є неперервні просторово-часові флуктуації, які зазнає густина внаслідок хаотичності теплового руху. На цій основі вчений визначив, що флуктуації мають приводити до оптичного помутніння речовини, що пояснювало блакитний колір неба та червоний колір сходу Сонця. Саме ці явища доводять існування просторових флуктуацій густини повітря.

Важливою є також праця М.Смолуховського 1913 р. з вивчення поведінки броунівських частинок під дією зовнішньої сили [519]. Він одержав рівняння, яке може розглядатись як рівняння дифузії під дією зовнішньої сили, за допомогою якого пояснив досліди Ф.Еренгафта та р.Міллікена з визначення величини заряду на невеликих матеріальних частинках, завислих у газі, які доводили неподільність заряду електрона, а також досліди Ф.Перрена, Ільїна та А.Вестгрена щодо дослі-

дження розподілу частинок гуммігута. Вчений також у 1915 р. дослідив поступовий перехід між трьома стадіями, що відповідають різним значенням часу, з перевагою то броунівського руху, то вільного падіння, то осадового розподілу, які до тих пір розглядалися окремо [520].

Рівняння Смолуховського та рівняння Ейнштейна для залежності функції розподілу від спостережуваного параметра фізичної системи, яка знаходиться в тепловій рівновазі, записані для різних функцій і мають різні розв'язки, але зображають один і той же процес. Відтоді, як статистичні методи почали застосовувати не тільки в молекулярно-кінетичній теорії, а й для опису об'єктів іншої природи, наприклад, при дослідженні поведінки електричного диполя в полі випромінювання, було з'ясовано, що там виникає рівняння, аналогічне рівнянню Ейнштейна (рівняння Фоккера—Планка). Пізніше у зв'язку з розвитком теорії марковських процесів це рівняння було виведено у загальному вигляді і було показано, що рівняння Смолуховського є рівнянням Фоккера—Планка в конфігураційному просторі, справедливим на часових інтервалах, більших порівняно з часом релаксації за імпульсними змінними, і являють собою узагальнене рівняння дифузії.

М.Смолуховському належать роботи також і в інших галузях фізики — щодо теорії планетних атмосфер, процесів горотворення, методу подібності в аеродинаміці. Доречно навести характеристику, дану у 1917 р. М.Смолуховському А.Ейнштейном як людині і педагогу: “Кожний, хто близько знав Смолуховського, любив у ньому не тільки вченого з гострим розумом, а й благородну, тонку і доброзичливу людину. Світова катастрофа останніх років викликала у нього почуття невимовного болю за жорстокість людей та за збиток, нанесений нашому культурному розвитку. Доля занадто рано обірвала його благодійну діяльність як дослідника та педагога; однак ми будемо високо цінувати його життя та його праці” [430, т.4, с.39].

Слід зазначити, що дискусія, яка виникла серед фізиків після формулювання другого закону термодинаміки, мала велике значення для усвідомлення статистичного характеру законів природи. Пошуки чітких формулювань закладеної в другому законі термодинаміки ідеї необоротності і спроби усвідомити місце нового закону в системі фізичних законів мали принциповий вплив на подальший розвиток фізики в другій половині ХІХ століття.

Якщо перший закон термодинаміки після визнання закону збереження енергії відповідаючи прийнятим загальним поглядам на природу, не викликав заперечень та успішно застосовувався в суміжних з фізикою галузях, а саме в хімії і біології, то сприйняття другого закону термодинаміки було іншим. Особливо багато заперечень виникало у зв'язку з поширенням другого закону на необоротні процеси. Адже новий закон затверджував досі невідому односторонність перебігу всіх реальних процесів. Заперечення стосувалися насамперед того, що поняття ентропії формулювалося лише як безпосереднє узагальнення досвіду, а також не відокремлювалися одне від одного два різних положення — принцип існування ентропії і принцип її зростання. Численні спроби по-новому сформулювати другий закон та гостра дискусія з цього приводу (М.Пирогов, М.Шіллер, К.Каратеодори, Е.Цермело, А.Пуанкаре, В.Оствальд, Е.Мах, М.Окатов) вказували на внутрішню незадоволеність вчених його логічною побудовою.

Альтернативним виявився шлях аксіоматичної побудови термодинаміки, розвинутий перш за все у працях М.Шіллера, К.Каратеодори і Т.Афанасьєвої-Еренфест. Першим фізиком, хто систематично розробляв даний підхід і довів існування ентропії на загальній основі, незалежно від еквівалентності теплоти і роботи, був М.М.Шіллер, який став наступником кафедри фізики Київського університету після М.П.Авенаріуса. Він народився у Москві, де закінчив у 1868 р. університет і був залишений у фізичній лабораторії в О.Г.Столетова. У 1875–1903 рр. вчений викладав у Київському університеті (з 1876 р. — професор, з 1890 р. завідувач фізичним кабінетом і лабораторією), у 1903–1905 рр. був ректором Харківського технологічного інституту, керував кафедрою фізики після М.П.Авенаріуса протягом 1890–1903 рр. М.М.Шіллер є автором близько 90 наукових праць, в тому числі трьох курсів теоретичної фізики. Його наукові дослідження стосувалися теоретичної механіки, термодинаміки, математичної фізики, електродинаміки, оптики, молекулярної фізики та інших галузей. Він одним із перших фізиків застосував у 1879 р. закон термодинаміки до вивчення стану пружного тіла [521]. Вивчаючи пружність насичених газів, вчений теоретично довів, що кривизна поверхні рідини відіграє роль додаткової сили, і пружність насиченої рідини змінюється в той чи інший бік залежно від характеру дії, додатково прикладеної до по-

верхні рідини, яка досліджується на пружність насиченої пари (закон Томсона—Шіллера). Причому він не тільки розвинув теорію цього питання, а й підтвердив її.

Разом з оригінальними дослідженнями окремих наукових проблем М.М.Шіллер присвятив чимало праць аналізу основних понять і законів фізики, здебільшого термодинаміки. Він детально проаналізував основні термодинамічні поняття і закони — температуру, кількість теплоти, термічну рівновагу, перший і другий закони термодинаміки. Доповнивши й уточнивши поняття адіабатичного процесу у 1898, М.М.Шіллер показав, що диференціальне рівняння другого закону термодинаміки повинно мати інтегрувальний дільник, який є універсальною функцією температури [522–525]. Другий закон термодинаміки за Шіллером приводить до тих же наслідків, що і класичні формулювання. Зводячи основний зміст даного закону до твердження про існування інтегрувального дільника для  $dQ$ , М.М.Шіллер його формулює так:» Для даного тіла не можна підібрати такий адіабатний коловий процес зміни параметрів, незалежних від температури, за допомогою якого можна було б досягти безперервного підвищення або зниження температури тіла. Або інакше: при будь-якій оборотній адіабатній зміні тіла, яка характеризується за допомогою  $n$  незалежних один від одного параметрів, будь-який з вищезгаданих параметрів повертається до свого початкового значення, якщо інші  $n-1$  параметрів повертаються до своїх» [526].

Ім'я нашої співвітчизниці, що народилася в Києві, Тетяни Олексіївни Афанасьєвої-Еренфест, талановитого математика і фізика, на жаль, мало кому відомо навіть серед наукової громадськості. Її праці, присвячені обґрунтуванню статистичної механіки, зокрема, змісту поняття ентропії і принципу її існування, ролі ймовірності у фізичних процесах, логічному обґрунтуванню другого закону термодинаміки, почали публікуватися з 1906 р.

Можливість застосування методу статистичних ансамблів щодо реальних механічних систем строго довели Пауль та Тетяна Еренфести в 1911 р. у статті в Математичній енциклопедії [527]. Розробляючи ідеї Л.Больцмана, вони показали, що зміна функції  $H$ , яка залежить від процесу, підпорядковується виключно законам теорії ймовірності, застосування яких у статистичному обґрунтуванні поняття ентропії не заперечує

чує принцип детермінізму. Тетяна Олексіївна в праці «До питання про кінетичне тлумачення необоротних процесів» також довела, що несумісність властивостей квазіперіодичності і переважного спадання  $H$ -функції є уявною, оскільки обидві властивості є логічними наслідками з тих самих основ теорії імовірності. Вона побудувала функцію, яка явно поєднує ці властивості [528]. Тим самим Т.О.Афанасьєвою-Еренфест було зроблено принциповий крок в узгодженні припущення детермінізму всередині газу із застосуванням формул теорії імовірності.

Т.О.Афанасьєва-Еренфест вводить поняття гіпотез першого і другого порядку і показує, що остання лежить в основі теорії газу за рівноваги, теорії стаціонарних процесів,  $H$ -теореми Больцмана. Згідно з її тлумаченням саме явище визначає і порядок гіпотези, і припустиму похибку. Незмінно застосовуючи гіпотезу одного порядку, ми тим самим припускаємо свого роду закономірність щодо досліджуваного явища, тобто статистичне обґрунтування поняття ентропії ймовірності не заперечує принцип детермінізму. Розуміння цього факту сприяло формуванню у фізиці уявлень про клас статистичних закономірностей, що охоплюють більш широке коло явищ та містять у собі, на відміну від динамічних закономірностей, об'єктивну випадковість.

Найбільш суттєвим результатом, який одержала Т.О.Афанасьєвою-Еренфест у 1925–1928 рр., став висновок, що другий закон термодинаміки можна обґрунтувати лише за допомогою аксіом, які перевіряються експериментально. Вона ділить другий закон і формулює чотири аксіоми, що приводять до чотирьох його еквівалентних формулювань для квазістатичних процесів. Ключовим моментом цих праць стало доведення необхідності розрізнення принципів існування і зростання ентропії, які були історично об'єднані. Крім того, Т.Афанасьєва-Еренфест вводить поняття елементарної необоротності (необоротності реальних, нестатичних процесів) і необоротності другого роду. Елементарна необоротність не збігається з поняттям нестатичності, а виводиться з двох аксіом: одна, що заперечує оборотність нестатичного процесу, і друга, що визначає його напрямком. Необоротність другого роду виводиться з властивостей квазістатичного процесу і відповідних аксіом. Вона також обумовлює існування ентропії, зростання якої, у свою чергу, залежить від елементарної необоротності, що визначає односторонність реальних процесів [529].

Праці з аксіоматичної побудови статистичної механіки Т.О.Афанасьєвої-Еренфест разом з працями М.Шіллера, К.Каратеодори та ін. створили базу для наступного кроку в узагальненні поняття необоротності — застосування поняття рівноваги до Всесвіту в цілому —, а також до створення термодинаміки необоротних процесів як загальної теорії реальних процесів у природі.

Як вже зазначалося, спочатку праці Л.Больцмана зі статистичного обґрунтування законів термодинаміки не привернули до себе уваги вчених. Одним з не багатьох фізиків, хто за життя Л.Больцмана уважно стежив за його роботами та усвідомлював глибину нових ідей, був наш співвітчизник М.М.Пирогов, син засновника сучасної хірургії М.І.Пирогова. Прогностичну цінність праць М.М.Пирогова зазначав і сам Л. Больцман. М.М.Пирогов підкреслював необхідність існування поряд з динамічними законами об'єктивних статистичних законів [530–533]. Так, в одній зі своїх праць він писав: «Ще в 1860 р. з'явився знаменний мемуар Clerk-Maxwella: Illustrations of the Dynamical Theory of Gases, якому, очевидно, призначено стати однією з відправних точок нової ери природознавства. Якщо період до 60-х років нинішнього століття справедливо може бути названий Newton'івською ерою, тобто ерою вивчення закономірного, то з 60-х років виявляється з особливою силою майже у всіх галузях природознавства новий напрямок: вивчення закономірності випадкового» [533,с.198].

М.М.Пирогов, розглядаючи ергодичну проблему, першим вірно вказав, що для суттєвого вдосконалення теорії реальних газів Ван дер Ваальса необхідно, крім парних взаємодій, досліджувати ще взаємодію груп молекул — агрегацій. Використовуючи цю модель, Пирогов дав якісний начерк теорії критичних явищ та загальної теорії двофазного стану газ—рідина. Щодо питання помилковості гіпотези теплової смерті Всесвіту, він висловлювався навіть більш категорично, ніж Л.Больцман. Заперечуючи В.Томсону і р.Клаузиусу, М.М.Пирогов писав: “Я думаю, щоо сучасних відомостей, з однаковим успіхом можна захищати два зовсім протилежних положення: 1) переместимість світу постійно зростає, тому що стан світу не стійкий, і 2) переместимість світу є сталою, оскільки стан світу стаціонарний, і ті вражаючі нас зміни, що відбуваються у світі, суть не більше як неминучі коливання поблизу типового стаціонарного стану” [531,с.175].

Найбільш цікаві результати вченого стосуються питання статистичного обґрунтування другого закону термодинаміки і теорії реальних газів. Узагальнюючими дослідження М.М.Пирогова в цьому напрямку є праці 1890 р. “Про закон Boltzmann'a” і “Основи термодинаміки”. Підхід М.М.Пирогова був іншим, ніж у Больцмана, для якого значну роль відігравали модельні уявлення про будову газів і механізм зіткнень між молекулами. М.М.Пирогов ставить питання у більш загальному вигляді. Перш за все він розробляє спеціальний математичний апарат, який відноситься до теорії імовірності. Цей апарат містив у собі ідеї майбутньої теорії випадкових процесів, яка почала розвиватися пізніше, вже в ХХ столітті.

При застосуванні розробленого математичного апарата до статистичного обґрунтування другого закону термодинаміки М.М.Пирогов пропонує розглядати макроскопічне тіло як систему з величезного числа  $N$  матеріальних точок. Стан кожної з них визначається шістьма величинами: координатами і компонентами швидкостей. Таким чином, загальний стан усієї системи може бути зображений як шестивимірна послідовність. Внаслідок величезного числа  $N$  ця послідовність може розглядатися як “суцільна”. Аналізуючи передумови, що покладені в основу виведення розподілу швидкостей Максвеллом, М.М.Пирогов дійшов наступного висновку: закон розподілу Максвелла справедливий лише для безмежного простору. На думку М.М.Пирогова, вплив зовнішнього середовища, наприклад стінок, що обмежують об'єм газу, не сприяє встановленню максвеллівського хаосу. Необхідно знайти особливий механізм взаємодії між стінкою і газом, за якого у газі встановиться розподіл Максвелла. У сучасній статистичній фізиці припускають наявність флуктуаційних рухів у стінці, які і підтримують максвеллівський хаос у посудині. Однак цей шлях подолання труднощів, на які вказав М.М.Пирогов, не був єдиний. Зрівноважуючу дію зовнішнього середовища, що впорядковує певним чином хаос, можна не зводити до нуля, а у випадку наявності зрівноважуючих факторів обмежувати функції Максвелла, які приводять до молекулярно-кінетичного опису газу, що відповідає досліду. М.М.Пирогов вказав ці обмеження. Якщо відсутня зрівноважуюча дія на газ зовнішніх факторів, то при обчисленні середніх величин за допомогою максвеллівського розподілу необхідно брати інтеграли за нескінченними межами. У випадку,



якщо дія зовнішніх зрівноважуючих факторів не може бути усунута, М.М.Пирогов показав, що необхідно обчислювати середні величини за допомогою інтегралів зі скінченними межами. Виявляється, що при певних умовах операції можуть виконуватися, і головні результати кінетичної теорії будуть відповідати досліду.

Задовго до М.Планка М.М.Пирогов також припускав, що взаємодія матерії зі “світлоносним ефіром” (чорним випромінюванням) є причиною багатьох явищ, які не можна описати з точки зору максвелівського хаосу, наприклад, залежність молекулярної теплоємності газу від температури. Так, якщо середню кінетичну енергію молекули обчислювати за допомогою максвелівської функції, використовуючи, за Пироговим, граничні швидкості, які обмежують можливі рухи молекули газу, то одержуємо не лінійну залежність енергії молекули від абсолютної температури, а новий закон. Він з точністю збігається із середньою енергією молекули газу, яку їй приписує квантова теорія Планка.

## РОЗДІЛ 5 СТАНОВЛЕННЯ СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ (30–40 рр. ХХ ст.)

### 5.1. Формування нерівноважної статистичної фізики (світовий контекст) (30–40-і рр. ХХ ст.)

Після розглянутих вище фундаментальних праць Дж.Гіббса стала зрозумілою формальна структура рівноважної статистичної механіки. Значення цієї теорії було усвідомлено завдяки працям Г.Урсела (1928) та Дж.Майера (1937), які успішно застосували рівноважну статистичну механіку для виведення рівняння стану [534,535].

Кардинальною для подальшого розвитку статистичної фізики стала квантова теорія, початок якій поклав М.Планк у 1900 р. [462]. Використання у статистичній фізиці квантових уявлень започаткувало квантову статистичну фізику. Так, у 1924 р.Ш.Бозе [467] ввів розподіл за імпульсами квантів світла та винайшов його зв'язок з розподілом Планка, Е.Фермі (1925) [470] також одержав функції розподілу частинок, що підпорядковуються принципу Паулі. Зв'язок розподілів Фермі–Дірака та Бозе–Ейнштейна з математичним апаратом квантової механіки було встановлено у 1926 р. П.Діраком і описано у праці “Про основи квантової механіки”. Логічні принципи рівноважної статистичної механіки було критично опрацьовано П.Еренфестом та Т.О.Афанасьєвою-Еренфест (1911) [527], а її математичні методи широко розвинули Ч.Дарвін і р.Фаулер (1922), які запропонували метод обчислення статистичного інтеграла [459–461].

Потреба розробити загальну точку зору на нерівноважні процеси та дослідити зв'язок між рівняннями типу Больцмана, що описують процеси перенесення, та рівнянням Ліувілля, яке є основним рівнянням теорії ансамблів, обумовила появу низки праць. У цьому напрямі першою була робота Ж.Івона (1935) [536], (пізніше – [537]), за нею

вийшли роботи М.Борна і Г.Гріна (1946–1947) [538], підсумовані в книзі [539], а також роботи Дж.Кірквуда (1941–1947) [540] та М.М.Боголюбова (1946) [541]. Одним з результатів стало створення формальної теорії рідкого стану, в розвиток якої великий внесок зробив і також і Дж.Майер [542]. Дані роботи, разом з дослідженнями М.С.Крилова (1950) [543] започаткували динамічне обґрунтування статистичної теорії нерівноважних процесів.

Надзвичайно важливими для розвитку статистичної фізики в Україні стали також праці Л.Ландау, виконані ним в 30-ті рр. ХХ ст. у Харківському фізико-технічному інституті. Це, зокрема, створена ним теорія фазових переходів II роду, теорія Фермі-рідини та теорії надплинності, теорія космічних променів, результати з фізики плазми. Ці роботи, розвинуті в подальшому учнями Л.Д.Ландау, започаткували систематичні дослідження в галузі статистичної фізики в Україні.

Початок історії нерівноважної термодинаміки можна датувати 1931 роком, коли вийшли дві праці норвезького фізико-хіміка Л.Онсагера (Нобелівського лауреата 1968 р.) „Співвідношення взаємності в нервноважних процесах” [544], у яких він розвинув засади загальної теорії, яка намічала єдиний підхід до розгляду нерівноважних процесів. Дана теорія, названа автором „квзітермодинамікою”, будувалась за аналогією з динамікою частинок, де головними були поняття сили та швидкості. Так, при розгляді таких необоротних процесів, як дифузія, теплопровідність та електропровідність, Л.Онсагер вводить „термодинамічні сили і швидкості.” Зокрема, термодинамічна сила — це величина, що характеризує ступінь відхилення системи від її термодинамічно рівноважного стану. У випадку електропровідності швидкістю є сила струму, а термодинамічною силою — ЕРС джерела струму або від’ємний градієнт потенціалу поля. Для теплопровідності швидкістю є вектор потоку енергії, а сила пропорційна градієнту температури. На основі даного підходу Л.Онсагер запропонував лінійні термодинамічні рівняння руху, система яких може описати одночасні потоки енергії та дифузії двох речовин, теплопровідність в анізотропному тілі тощо. Ключовим моментом теорії Онсагера стало виведення умов для коефіцієнтів рівнянь. Виявилося, що справджується умова  $L_{ik} = L_{ki}$ , яка дістала назву співвідношень взаємності та привела до суттєвого

спрощення термодинамічних рівнянь руху. Надалі з'ясувалось, що співвідношення взаємності тісно пов'язані з принципами симетрії, зокрема, з принципом Кюрі, в основу якого було покладено твердження про зв'язок симетрії системи з характером процесів у ній. Дані співвідношення відображають на макроскопічному рівні інваріантність мікроскопічних рівнянь руху відносно обернення часу.

Різні властивості співвідношень взаємності та межі їх застосовності пізніше вивчали Х.Казимір, П.Мазур та С.де Гроот, Й.Мейкснер, Л.Д.Ландау та Є.М.Ліфшиць, Кокс. Так, у 1945 р. Х.Казимір [545, 546] сформулював співвідношення взаємності таким чином, що вони стали справедливими для більш широкого класу необоротних процесів, ніж це передбачалось Л.Онсагером. Починаючи з 1941 р. Й.Мейкснер, а пізніше І.Пригожин побудували феноменологічну теорію необоротних процесів, яка містила у собі як теорему взаємності Онсагера, так і безпосереднє обчислення для ряду фізичних випадків джерела ентропії, що відповідає некомпенсованому теплу Клаузіуса [547–549]. У цілому в працях цих вчених було показано, що співвідношення взаємності, хоч і залежать від молекулярної структури системи, проте виражають чисто феноменологічні зв'язки між величинами, які входять у термодинамічні рівняння руху. Отже, вони можуть розглядатися як один з принципів нерівноважної термодинаміки, який внаслідок лінійності рівнянь застосовний до систем, які не дуже сильно відхиляються від положення рівноваги.

Після Л.Онсагера найбільш суттєвий внесок у нерівноважну термодинаміку було зроблено нідерландськими вченими де Донде, І.Пригожиним, С.де Гроотом, К.Денбигом, П.Мазуром. Для подальшого розвитку нерівноважної теорії було необхідно встановити її зв'язок з фундаментальними динамічними принципами механіки. Запропонований у 1946 р. М.М.Боголюбовим динамічний підхід до обґрунтування та узагальнення кінетичного рівняння Больцмана дозволив виявити загальні принципи побудови скороченого опису макроскопічних систем та побудови рівнянь нерівноважних процесів. Подальше розвинування динамічний підхід одержав у працях Л. Ван Хова та І.Пригожина. Оригінальний метод вивчення нерівноважних систем за їх реакцією на зовнішні механічні збурення без складання керуючих рівнянь запропонував р.Кубо.

Фундаментальні праці зазначених вчених сприяли тому, що бурхливий розвиток у всіх галузях фізики в останні десятиліття ХХ ст. позначився, зокрема, на статистичній фізиці нерівноважних станів, яка виокремилась у самостійний розділ науки, і узагальненням якої став новий міждисциплінарний науковий напрям — синергетика.

## **5.2. Л.Д.Ландау і початок систематичних досліджень у галузі статистичної фізики в Україні (30-і рр. ХХ ст.)**

Фізика в Україні набула інтенсивного розвитку після створення низки наукових інститутів, це перш за все Український фізико-технічний інститут (УФТІ) в Харкові у 1928 р. Завдяки роботам цього інституту було суттєво змінено стан фізичних досліджень в Академії наук, започатковано та зроблено значний внесок у розвиток ключових напрямів: фізика твердого тіла, фізика конденсованого стану, фізика низьких температур, ядерна фізика, радіофізика.

УФТІ було організовано за рішенням уряду України на основі пропозиції академіка А.Ф.Іоффе — створити ряд фізичних інститутів на всій території СРСР, зокрема, в Харкові — столиці України, великому промислового й культурного центрі. Головними співробітниками УФТІ стали фізики, що переїхали з Ленінградського фізико-технічного інституту — І.В.Обреїмов, О.І.Лейпунський, Л.В.Шубников, К.Д.Синельников, А.К.Вальтер, В.С.Горянський, Г.Д.Латишев, А.Ф.Прихотько, О.М.Трапезникова, Л.В.Розенкевич та інші. До складу УФТІ ввійшли також молоді харківські вчені А.О.Слуцкін і Д.С.Штейнберг.

У серпні 1932 р. теоретичний відділ УФТІ очолив Лев Давидович Ландау, який, незважаючи на свої 24 роки, вже був всесвітньо відомим фізиком. Діяльність Л.Д.Ландау значною мірою сприяла перетворенню УФТІ у світовий центр фізичної науки [243,47]. Людина величезного творчого потенціалу, теоретик надзвичайно широкого світогляду, один з останніх універсалів фізики, Л.Д.Ландау здійснив могутній вплив на формування та становлення стиля фізичного мислення. Він також увійшов в історію науки як талановитий педагог і вихователь кадрів теоретиків, який розробив оригінальну систему їх ефективної підготовки, створив велику і авторитетну наукову школу зі своїм стилем і традиціями.

Говорячи про свого вчителя, один з перших учнів Л.Д.Ландау академік НАН України О.І.Ахієзер писав: „Широта та діапазон його творчих інтересів справді величезні. У наш час важко, а може навіть і неможливо знайти ще одного вченого такого ж діапазону, чи, висловлюючись фізично, спектра інтересів. Універсалізм його був унікальним, бо характеризувався рідкісною глибиною проникнення в суть фізичних явищ” [550, с.60].

«Ландау був фізиком „надекстракласу”, — зазначав В.Л. Гінзбург. — Це був абсолютно унікальний фізик...І якщо я виділяю Ландау з усіх, то тому, що оцінка його «класу» складається з багатьох інгредієнтів. По-перше, це наукові досягнення...По-друге, це рідкісна універсальність знань, знання всієї фізики. І, по-третє, він був Учителем з великої літери, Учителем за покликанням. Добуток трьох таких «множників» занадто великий» [551, с.73–74].

Лев Давидович народився в Баку 22 січня 1908 р. У 1922 р. поступив до Бакінського університету, але 1924 р. перевівся на фізичне відділення Ленінградського університету, який закінчив у 1927 р. У 1929–1931 рр. він стажувався у Данії, Великобританії та Швейцарії. Особливим стало для молодого вченого перебування в Копенгагені, в Інституті теоретичної фізики Нільса Бора та можливість спілкування з провідними фізиками того часу — М.Борном, В.Гейзенбергом, В.Паулі, П. Діраком. Після повернення у 1931 р. на Батьківщину Л.Д.Ландау починає працювати у Ленінградському фізико-технічному інституті, а в 1932 р. очолює теоретичний відділ УФТІ.

Харківський період для Л.Д.Ландау був в науковому відношенні напруженим і плідним. Саме тут почалася реалізація його ідей щодо навчання теоретичної фізиці, сформувалися його перші учні, які започаткували наукову школу. У 1932–1937 рр. він керував теоретичним відділом УФТІ й одночасно завідував кафедрою теоретичної фізики Харківського механіко-машинобудівного інституту (нині — політехнічний інститут), з 1935 р. — кафедрою експериментальної фізики Харківського університету [552, 243].

У ті роки Л.Д.Ландау та його учні виконали низку важливих фундаментальних робіт. Так, він один з перших 1933 р. ввів поняття антиферромагнетизму як особливої фази магнетиків [553, т.1, с.97–101] і невдовзі після відкриття цього явища Л.В.Шубниковим обґрунтував його теоре-

тично. У 1934 Л.Д.Ландау та Є.М.Ліфшиць побудували теорію утворення електронно-позитронних пар при зіткненнях швидких заряджених частинок (до цього досліджувався лише механізм утворення пар фотонами) [553, т.1, с.110–122]. У 1935 р. він разом з Є.М.Лифшицем розвинув послідовну термодинамічну теорію доменної структури феромагнетиків та теорію дисперсії магнітної проникності феромагнетиків у змінному магнітному полі, встановив рівняння руху магнітного моменту домену в змінному магнітному полі (рівняння Ландау—Ліфшиця), побудував теорію феромагнітного резонансу [553, т.1, с.1128–1143]. У 1936 р. Л.Д.Ландау, О.І.Ахієзер та І.Я.Померанчук пояснили розсіяння світла світлом в області високих частот, коли неможливо побудувати функцію Лагранжа електромагнітного поля [553, т.1, с.222–223].

Працями Л.Д.Ландау зі створення теорії фазових переходів II роду, теорії фермі-рідини та теорії надплинності, теорії космічних променів, фізики плазми було започатковано систематичні дослідження в галузі статистичної фізики в Україні. Ще в своїй студентській праці 1926 р. він уперше ввів для опису стану систем поняття матриці густини (статистичний оператор), що стало вирішальним для квантової статистики і кінетики квантових систем. Головне місце в науковій роботі Ландау як за безпосереднім значенням, так і за обсягом застосувань займає теорія фазових переходів II роду, побудована у 1937 р. [554]. Ідеї, які були покладені в її основу, містилися вже в його замітці 1935 р. [8].

Поняття про фазові переходи різного порядку вперше з математичної точки зору було запроваджено П.Еренфестом, залежно від порядку термодинамічних похідних, що можуть зазнавати стрибків у точці переходу. Однак питання про те, які саме з цих переходів справді можуть відбуватися, а також у чому полягає їх фізична природа, залишалися відкритими.

Якщо звернутися до самого феномену фазових переходів, то слід зазначити, що зазвичай при фазовому переході спостерігається стрибок стану тіла, наприклад, перебудова кристалічної ґратки. Однак можливий і інший тип переходів, пов'язаних зі зміною симетрії, коли жодного стрибка в зміні стану тіла не відбувається, і розміщення атомів у кристалі змінюється неперервно, але як завгодно малий зсув атомів від їх початкового симетричного розміщення є достатнім для того, щоб симетрія ґратки одразу змінилися. Такий перехід однієї кристалічної



модифікації в іншу називають фазовим переходом II роду на відміну від звичайних фазових переходів I роду.

У випадку фазових переходів II роду стрибкоподібно змінюються похідні термодинамічного потенціалу: теплоємність, стисливість, коефіцієнт теплового розширення. При цьому перші похідні залишаються незмінними, а термодинамічні функції стану тіла (його ентропія, енергія, об'єм і т.п.) — неперервними при проходженні через точку переходу. Це означає відсутність виділення чи поглинання тепла, яке характерне для переходів I роду.

Загальна термодинамічна теорія фазових переходів II роду була розроблена Ландау в 1937 р. Він обумовив фазовий перехід II роду зміною симетрії системи, вперше вказавши на глибокий зв'язок між можливістю існування неперервного (у розумінні зміни стану тіла) фазового переходу і стрибкоподібною зміною деякої властивості симетрії тіла в точці переходу. Л.Д.Ландау також показав, що в точці переходу спостерігається не будь-яка зміна симетрії. Він запропонував метод, що дозволяє визначити, які типи зміни симетрії можливі.

Оскільки стани обох фаз у точці переходу II роду збігаються, то симетрія тіла саме в точці переходу повинна містити у собі елементи симетрії обох фаз. Виявилось, що вона збігається із симетрією з однієї сторони від цієї точки, тобто із симетрією однієї фази. Таким чином, симетрія однієї з фаз є більш високою, а симетрія іншої фази — більш низкою. На відміну від фазового переходу II роду, зміна симетрії тіла при фазовому переході I роду не має жодних обмежень, і симетрії обох фаз можуть не мати нічого спільного. У переважній більшості всіх відомих фазових переходів II роду більш симетрична фаза відповідає вищим температурам, а менш симетрична — нижчим. Зокрема, перехід II роду з упорядкованого в неупорядкований стан відбувається при підвищенні температури. Це правило, однак, не є термодинамічним законом і допускає винятки.

Зміна симетрії тіла при фазовому переході II роду може відбуватися як при зміщенні атомів, так і при зміні впорядкованості кристала. Може здійснюватися також і взаємне перетворення двох фаз, які розрізняються іншою властивістю симетрії. Такими, наприклад, є точки Кюрі феромагнітних речовин (точки перетворення феромагнетика в парамагнетик), коли відбувається зміна симетрії розміщення елемен-

тарних магнітних моментів у тілі, перехід металу у надпровідний стан (за відсутності магнітного поля), перехід рідкого гелію в надплинний стан. Тому розвинута Л.Д.Ландау кількісна теорія була заснована на припущенні про регулярність розкладання термодинамічних величин поблизу точки переходу за степенями введеного ним коефіцієнта впорядкування. Це дозволило йому дослідити відомі випадки фазового переходу II роду, побудувати загальну класифікацію всіх можливих переходів та їх особливостей, дати термодинамічне тлумачення явищам надплинності та надпровідності. Так, на цій основі Л.Д.Ландау розробив теорію проміжного стану надпровідників, показавши, що в цьому стані надпровідник складається з послідовних шарів нормальної та надпровідної фаз. Спільно з І.Я.Померанчуком у 1937 Л.Д.Ландау видав працю „Про властивості металів при дуже низьких температурах [553, т.1, с.208–221]. Нині зрозуміло, що теорія фазових переходів II роду Ландау не відображала всі властивості і механізм фазового переходу II роду, не враховувала можливі особливості величин у точці переходу. В останні роки свого життя Л.Д.Ландау багато працював над проблемою з'ясування характеру цієї особливості, та, на жаль, не встиг прийти до однозначних висновків.

Дві праці Л.Д.Ландау зі статистичної фізики стосуються фізики плазми. Характерні особливості, які відрізняють плазму від інших макроскопічних середовищ, безпосередньо зв'язані з її колективними властивостями, що виявляються в існуванні різних власних хвиль та коливань. Одна із зазначених праць Л.Д.Ландау 1936 р. “Кінетичне рівняння у випадку кулонівської взаємодії” [556], над якою він працював у Харківському фізико-технічному інституті, мала надзвичайно важливе значення для започаткування робіт з фізики плазми в Україні. Там вперше було одержати кінетичне рівняння з урахуванням кулонівської взаємодії між частинками. Через повільне зменшення кулонівських сил у цьому випадку не можна було застосувати звичайні методи для побудови кінетичних рівнянь. Проте Ландау вдалося вивести кінетичне рівняння для плазми у випадку кулонівської взаємодії та одержати інтеграл зіткнень для заряджених частинок при їх кулонівській взаємодії. Ці результати стали основою теорії релаксаційних процесів у плазмі. Значення цієї роботи було усвідомлено пізніше, коли почала розглядатися можливість побудови термоядерних установок і фізика плазми

стала однією з пріоритетних галузей науки. Відтоді одержаний інтеграл зіткнень, який використовується в задачах з релаксації у плазмі, електропровідності та нагрівання плазми, почали називати інтегралом зіткнень Ландау.

Інший важливий результат Л.Д.Ландау в царині фізики плазми стосується коливань плазми і полягає у тому, що було підтверджено закон дисперсії хвиль Ленгмюра, проте показано наявність їх згасання (згасання Ландау) у випадку плазми без зіткнень, але з урахуванням так званого самоузгодженого поля частинок, що описується кінетичним рівнянням Власова [557]. Це означало, що навіть в умовах високих частот, коли зіткненнями між частинками в плазмі можна знехтувати, коливання будуть все ж таки згасаючими. Таким чином, ця праця Л.Д.Ландау разом з працею А.О.Власова [558] стала основоположною у побудові кінетичної теорії плазми.

Після цього з'явилися численні статті, у яких було пояснено фізичну природу згасання Ландау та показано, що воно зумовлюється резонансною взаємодією електронів із самоузгодженим полем хвилі, тому відіграє важливу роль в усіх плазмових процесах. Від неї було започатковано ще один важливий напрям у фізиці плазми, розвиток якого належить учням і послідовникам Л.Д.Ландау. Це — дослідження взаємодії пучків заряджених частинок із плазмою. Так, у 1948 р. О.І.Ахієзер спільно з Я.Б.Файнбергом незалежно від Д.Бомі і Е.Гросса (1949 р.) передбачили ефект пучкової нестійкості плазми, через яку проходить електронний пучок. Даний ефект виявлявся як виникнення у плазмі не згасаючих, а зростаючих коливань [559]. Разом з працями А.О.Власова та Л.Д.Ландау з фізики плазми ця праця була покладена в основу сучасних досліджень колективних процесів у плазмі і мала важливе значення для практичних застосувань, зокрема для розробки методів нагрівання плазми.

Праці Л.Д.Ландау з вивчення закономірностей процесів у плазмі, а також їх застосування до термоядерного синтезу започаткували традиційний напрям фізики і техніки в Україні. Ці питання досліджувались у наукових школах самого Л.Д.Ландау, а також у дочірніх школах академіків О.І.Ахієзера, Я.Б.Файнберга, О.Г.Ситенка.

Л.Д.Ландау належать також пріоритетні результати щодо застосування методів статистичної фізики до теорії ядра. Основоположним у

вихідному уявленні Н.Бора, що стало засадами розвитку нових поглядів на ядерні реакції, був розгляд ядра як системи з великим числом ступенів вільності. Тому взаємодія налетілої частинки з ядром-мішенню (перший етап ядерної реакції) вже не могла тлумачитися як задача про рух однієї частинки у силовому полі ядра, адже при зіткненні енергія цієї частинки розподіляється між багатьма ступіннями вільності ядра. Як наслідок виникає сильно збуджена система (проміжне або складене ядро), властивості якої вже практично не залежать від індивідуальних особливостей першого етапу реакції.

Цей важливий висновок про незалежність другої фази реакції (розпад складеного ядра) від її першої фази (утворення складеного ядра) обумовив розуміння того, що процес розпаду ядра практично цілком визначається властивостями збуджених станів проміжного ядра, такими як енергія, спин, парність. Отже, головною проблемою в дослідженні ядерних реакцій стало вивчення збуджених станів ядер.

Дослідженням цих питань займався Я.І.Френкель, який у 1918–1921 рр. працював в Україні у Кримському університеті. У своїх роботах він, виходячи з уявлення ядра як системи, що складається з великої кількості частинок, робить сміливу для того часу спробу — застосувати до ядра замість законів механіки закони статистики, що дало змогу описувати збуджені стани, виходячи з нових понять. Уперше таку думку Я.І.Френкель висловив у березні 1936 р. у своєму виступі на сесії Фізико-математичного відділення Академії наук СРСР у Москві.

На основі цих нових ідей Л.Д.Ландау, а пізніше В.Вайскопф і Х.Бете створили статистичну теорію ядра, що тепер є одним з основних розділів ядерної фізики. Початок розвитку ідеї Френкеля про статистичний розгляд явищ у атомному ядрі був покладений у праці Л.Д.Ландау “До статистичної теорії ядер”, надрукованої у 1937 р. [560]. Виходячи із загальних міркувань та розглядаючи систему нуклонів ядра як вироджений ідеальний фермі-газ, що підпорядковується статистиці Фермі—Дірака, він вивів основні формули і співвідношення, зокрема, формули для розподілу ядерних рівнів і визначення порядку їх ширини. “Якщо враховувати взаємодію частинок у ядрі, то, звичайно, немає жодних підстав розглядати ядро як “тверде тіло”, тобто як “кристал”, а варто розглядати його як “рідку краплю” з протонів і нейтронів. На відміну від звичайних рідин у цій рідині суттєву роль відіграють квантові

ефекти, тому що квантова невизначеність координат частинок всередині ядра значно більша за їх взаємні відстані. Незважаючи на те, що ми ще не маємо методу для теоретичного дослідження “квантових рідин”, можна все ж таки одержати деякі властивості ядер, застосувавши до них статистичні міркування”, — пояснював свій підхід Ландау.

“Будемо вважати енергію ядра в нормальному стані рівною нулю. У цьому стані “температура” ядра  $T$  теж дорівнює нулю ( $T$  ми будемо вимірювати нижче в енергетичних одиницях). Оскільки енергія “збудження” ядра у випадках, що нас цікавлять, мала порівняно з енергією зв’язку ядерних частинок, то і температуру  $T$  збудженого ядра можна вважати малою. Тому вільну енергію  $F$  збудженого ядра можна розкласти в ряд за степенями  $T$ . Обмежуючись першим членом, маємо

$$F = -\frac{\alpha T^2}{2},$$

де  $\alpha$  — стала. Членом  $T$  в першому степені нехтуємо відповідно до теореми Нернста. Ту обставину, що розкладання в ряд повинно починатися у рідин від члена  $T^2$ , можна вивести як з аналогічних співвідношень для газів, так і безпосередньо з дослідів Кеєзона, згідно з якими теплоємність електронної рідини в металах пропорційна  $T$ ; — писав він. [560, с. 819–820].

Виходячи із зроблених припущень, Л.Д.Ландау виводить наступне основне рівняння для ентропії  $S$  збудженого ядра:

$$S = \sqrt{2\alpha E},$$

а також одержує число рівнів у одиничному інтервалі енергії, тобто “щільність” квантованих рівнів ядра:

$$\frac{dN}{dE} = e^S \cdot \frac{dS}{dE} = \frac{1}{T} e^{\sqrt{2\alpha E}}.$$

Ця формула визначає розподіл за енергіями всіх рівнів, з усіма можливими моментами обертання. З неї можна одержати обернену величину  $\sigma = dE/dN$ , що виражає середню відстань між сусідніми збудженими рівнями ядра на шкалі енергії.

Далі в праці Ландау розглядаються питання станів ядра з певним моментом, шириною резонансних рівнів для нейтронів при розсіянні (пружному і непружному), розрахунку радіаційних переходів ядер із збудженого стану. Ці питання нині становлять основу статистичної теорії ядер, тому їх розгляд Л.Д.Ландау був значною віхою у її розвитку.

Харківський період наукової творчості Л.Д.Ландау важливий також тим, що саме на цей час припадає початок формування наукової школи вченого [552,243]. Метою Л.Д.Ландау в УФТІ було чітко визначено: створення теоретичного відділу, виявлення творчої молоді і робота з нею, наукова діяльність у сфері теоретичної фізики, педагогічна робота в харківських вузах, організація семінару, написання книг і оглядів з теоретичної і загальної фізики, співпраця з експериментаторами інституту. Все це він повністю реалізував за короткий час. Співробітники теоретичного відділу, на думку Л.Д.Ландау, мають бути єдиним цілим в організаційному плані, інтенсивно займатися науковою працею, бути строго дисциплінованими, обов'язково складати екзамени з теоретичної фізики та брати участь у теоретичному семінарі.

Особистість Л.Д.Ландау викликала захоплення творчої молоді. Його доступність, постійна готовність до обговорення фізичних проблем визначили навколо вченого коло осіб, які бажали з ним працювати. Однак Л.Д.Ландау чітко розумів, що багато хто з них не має достатньої професійної підготовки, тому з 1933 р. почав створювати програми необхідного мінімуму знань у галузі теоретичної фізики і математики, оволодіння яким було обов'язковим для молодих фізиків-теоретиків (теормінімум Ландау).

“Питання навчання теоретичній фізиці, як і фізиці в цілому, зацікавили його ще зовсім молодим, — згадував Є. М. Ліфшиць. — Саме тут, у Харкові, він уперше став розробляти програми “теоретичного мінімуму” — основних знань з теоретичної фізики, необхідних для фізиків-експериментаторів, і окремо для тих, хто хоче присвятити себе професійній дослідницькій роботі з теоретичної фізики. Не обмежуючись розробкою одних лише програм, він читав лекції з теоретичної фізики для співробітників УФТІ, а на фізмеху — для студентів. Захоплений ідеями перебудови викладання фізики в цілому, він прийняв завідування кафедрою загальної фізики в ХДУ... “[561, с.12].

Л.Д.Ландау надавав великого значення оволодінню фізиком-теоретиком математичною технікою, тому претендентам у теоретики перш за все необхідно було витримати іспит з математики в її практичних аспектах, а потім — іспити з фізичної частини програми теормінімуму, що містили у собі основні знання з семи розділів теоретичної фізики: механіки, теорії поля, квантової механіки, статистичної фізики, механіки суцільних середовищ, електродинаміки, релятивістської квантової теорії. На думку Л.Д.Ландау, цими знаннями мали володіти всі теоретики незалежно від майбутньої спеціальності, оскільки теоретик повинен у “чорновому варіанті” знати всю теоретичну фізику, а викладацька діяльність повинна йому в цьому допомогти. Після опанування основами теоретичної фізики учні могли розв’язувати конкретні фізичні задачі, обов’язково поєднуючи наукову працю з викладанням, причому курси щоразу змінювалися. Таким чином, молоді теоретики ставали фахівцями широкого профілю.

Теормінімум Ландау виявився одним з найбільш дієвих способів постійного наукового контакту з вчителем. Екзамен став тією основою, на якій виникла наукова школа, адже практично всі учні і співробітники вченого пройшли через теормінімум. Це дало підставу І.М.Халатникову написати: “Школа Ландау виникла не стихійно, вона була задумана, запрограмована, як тепер говорять, а теормінімум став механізмом, що дозволяв робити протягом багатьох років селекційну роботу — відбирання талантів” [562,с.267–268].

Органічно пов’язаним з теормінімумом був і багатотомний курс теоретичної фізики, написаний Л.Д.Ландау з одним з його найближчих учнів Є.М.Ліфшицем. Ідея курсу як серії монографій, у яких викладаються основні розділи теоретичної фізики, народилася в Харкові, там же почалася і її реалізація. Так, у статистичній фізиці викладалася також термодинаміка, причому на основі загального розподілу Гіббса, завдяки чому встановлювався її глибокий зв’язок зі статистичною механікою [563]. Семитомний курс теоретичної фізики, практично завершений ще за життя Л.Д.Ландау, являв собою енциклопедію теоретичної фізики, в той же час слугував методичним посібником для науковців, аспірантів і студентів. Книги курсу стали настільними, неодноразово перевидавалися і перекладалися багатьма мовами. Разом з теормінімумом Ландау курс теоретичної фізики відіграв значну роль у

підготовці кадрів фізиків-теоретиків у нашій країні. У харківській період учнями Ландау були Є.М.Ліфшиць, О.С.Компанієць, О.І.Ахієзер, І.Я.Померанчук, І.М.Ліфшиць, В.Г.Левич, В.А.Герман та інші.

Одним з учнів Л.Д.Ландау харківського періоду був В.А.Герман, який провів ряд досліджень із взаємодії світла з атомними системами. Діяльність вченого мало висвітлена в історико-науковій літературі, однак нами знайдені архівні матеріали, які свідчать, що Веніамін Львович Герман народився 10 травня 1914 р. у Замброво (Польща). Закінчив Харківський університет (1936 р.), у якому з 1936 р. почав викладати (з 1944 р. був керівником кафедри теоретичної механіки) та водночас працювати в Харківському фізико-технічному інституті (у 1945 р. став доктором фізико-математичних наук, у 1946 — професором). У 1955–1964 рр. очолював відділ теоретичної фізики новоствореного Інституту радіофізики та електроніки, підготував 15 кандидатів наук [564]. Праці В.А.Германа стосувались фізики твердого тіла, зокрема, тензорних властивостей кристалів, теорії суцільних середовищ, квантової механіки, електродинаміки і теорії відносності, нелінійної фізики, кавітації, теорії спектрів, поляризації світла. Він дослідив взаємодію світла з атомними системами, побудував теорію пластичності анізотропних середовищ, розв'язав ряд важливих задач статистичної радіофізики, а саме, побудував теорії розсіяння, поглинання та поширення радіохвиль [565–572]. Під час керівництва В.А.Германа кафедрою теоретичної механіки Харківського університету там почали розроблятися нові напрями, такі як магнітогазодинаміка, астрофізика, теорія пластичності і температурних напруг, кристалофізика, газо- та магнітодинамічна теорія мастил, анізотропна теорія пружності, теорія ударних хвиль, теорія турбулентності та теорія граничного шару. Проте головним напрямом досліджень кафедри стала механіка суцільних середовищ. В.А.Герман ввів у навчальні плани курси магнітної гідродинаміки та тензорного аналізу, об'єднав декілька окремих дисциплін в один курс механіки суцільних середовищ. Помер вчений 24 жовтня 1964 р.

На початку 1937 р. обстановка навколо Ландау, яка на тлі посилення репресій сталінського режиму нагніталась його недоброзичливцями, дуже ускладнилася і він змушений був переїхати до Москви, залишивши Харківський університет і УФТІ. У лютому 1937 р. Л.Д.Ландау очолив теоретичний відділ Інституту фізичних проблем АН СРСР. На



жаль, переїзд не дав можливості вченому уникнути арешту. Він майже рік провів у в'язниці.

У Москві відбувався інтенсивний розвиток школи Ландау. Цьому значною мірою сприяли організований ним теоретичний семінар, де доповідалися оригінальні роботи і реферувалися статті з найбільш авторитетних фізичних журналів. Саме тут виявлялася та універсальна підготовка, що давав теормінімум. Зробити доповідь на семінарі було важко, але почесно. Доповідача піддавали наче “допиту з пристрастю”, учасникам дозволялося перебивати його. Скоріше це була не доповідь, а діалог між доповідачем і аудиторією на чолі з Л.Д. Ландау. О.І.Ахієзер згадував, що семінар був своєрідним явищем — не просто зборами, на яких надають слово і чемно дякують, а скоріше «запорозькою січчю», на якій на доповідача, що уособлював у собі автора, «накидався» Ландау зі своїми питаннями і величезним критицизмом. Відбувалася своєрідна боротьба розумів, що було дуже цікаво для всіх учасників семінару.

Л.Д. Ландау привчав своїх учнів до самостійності, не ставив перед ними задач і не давав тем, вважаючи, що учні повинні самі знаходити їх. Він також ніколи не робив того, що, на його думку, повинні були робити самі учні. Але коли учень, винайшовши задачу і зробивши попередні викладки, зупинявся на складному етапі, Ландау давав пораду, а іноді допомагав навіть серйозним розрахунком. У цьому виявлявся науковий стиль Л.Д.Ландау, якому були властиві ясність і чіткість постановки питань, бачення найбільш прямого шляху їх вирішення, прагнення «тривіалізувати» складні речі. Усі ознаки цього стилю містять у собі його чіткі і ясні праці. Ландау ретельно обмірковував кожну фразу, яку після знаходження найбільш вдалого формулювання один з учнів, з ким він у цей час працював, записував. Вчений залучав до підготовки статей своїх найближчих співробітників, найчастіше Є.М.Ліфшиця. Саме в такий спосіб відточувався стиль викладання та водночас вирішувалися робочі питання.

У 1962 р. відбулося непоправне — автомобільна катастрофа зупинила інтенсивну наукову роботу Л.Д.Ландау, і хоч його життя було врятовано, він вже не міг повернутися до творчої діяльності. Помер вчений 1 квітня 1968 р.

Наукові напрями, започатковані Ландау, розроблялися далі його учнями. Зі створенням у 1964 р. Інституту теоретичної фізики АН СРСР, що нині носить ім'я Л.Д.Ландау, вони сформувалися інституційно і продовжують відігравати провідну роль у сучасній теоретичній фізиці. Стиль школи Ландау, її дух, високий дослідницький клас існують і зараз, оскільки ряд учнів (І.М.Ліфшиць, А.Б.Мігдал, І.Я.Померанчук, О.І.Ахієзер) стали засновниками власних теоретичних шкіл. Вони зберегли успадковані традиції школи, демонструючи тим самим її еволюцію, цілісність та ефективність методів підготовки молодих теоретиків, запроваджених Л.Д.Ландау.

### 5.3. Розгортання широкомасштабних досліджень зі статистичної фізики в Україні

Ідеї та методи статистичної фізики також набули інтенсивного розвитку у працях академіка НАН України Миколи Миколайовича Боголюбова та його наукової школи, яка працювала водночас з науковою школою Л.Д.Ландау. Різні аспекти статистичної фізики стали домінуючими в творчості М.М.Боголюбова на початку 40-х років після розробки ним проблем нелінійної механіки, і вивчалися ним до останніх днів життя. Ці дослідження охоплювали обґрунтування статистичної механіки, рівноважну статистичну механіку класичних і квантових систем, нерівноважну статистичну механіку. Запропоновані М.М.Боголюбовим методи виявились надзвичайно ефективними та привели до низки принципових результатів, що започаткували новий підхід та новий етап у цій галузі знання.

Основою досліджень М.М.Боголюбова зі статистичної фізики стали його попередні праці з математичної фізики. Крім строгого обґрунтування асимптотичних методів нелінійної механіки, М.М.Крилову і М.М.Боголюбову також належить ряд теорем нелінійної механіки, що стосуються абстрактної теорії динамічних систем. Одним з постулатів, що був покладений у основу статистичної фізики, є постулат про ергодичність, згідно з яким середні характеристики систем частинок за часом та за фазовим простором збігаються. Наприкінці 30-х років Дж. фон Нейман і Г.Біркгоф довели ергодичні теореми, пов'язані з ергодичною гіпотезою Больцмана. При доведенні вони припустили в динамічній системі наявність інваріантної міри. Для гамільтонових систем такою мірою, згідно з теоремою Ліувілля, є звичайний об'єм фазового простору, проте чи існує інваріантна міра довільної динамічної системи, було невідомо.

У 1936–1937 рр. М.М.Крилов і М.М.Боголюбов дали позитивну відповідь на це складне питання. Досліджуючи нормальні структури точних розв'язків рівнянь за допомогою топологічних методів, зокрема, досліджень А.Пуанкаре і А.Данжуа відносно відображення тора на себе, М.М.Крилов та М.М.Боголюбов дійшли висновку про те, що майже періодичність є скоріше за все винятком, ніж правилом. При цьому виникла потреба розгляду різних середніх значень динамічних змінних як функцій часу [573,574]. Таким чином, М.М.Крилов і М.М.Боголюбов підійшли до ергодичної теорії. У вересні 1935 р. на Першій міжнародній конференції у Москві вони зробили доповідь «Загальна теорія міри та її застосування до вивчення динамічних систем нелінійної механіки.» Результати цих досліджень було викладено в 1937 р. перш за все у праці «Загальна теорія міри в нелінійній механіці», де вони встановили існування інваріантної міри компактної динамічної системи, ввели важливе поняття ергодичної множини та довели ряд теорем щодо розбиття інваріантної міри на міри, локалізовані в ергодичних множинах [575,576]. Ця праця була першим значним результатом з функціонального аналізу в Україні і принесла авторам широке визнання. Один з творців ергодичної теорії Дж. фон Нейман надіслав їм листа, в якому вітав з успіхом.

Результати М.М.Боголюбова з нелінійної механіки та абстрактної теорії динамічних систем, крім самостійного значення, започаткували дослідження широкого кола питань топологічної динаміки та статистичної механіки, розробку яких він почав в циклі праць 1937–1939 рр., присвячених вивченню динамічних систем, що знаходяться під впливом випадкових збурень. Так, у спільній з М.М.Криловим праці 1939 р. розглядались проблеми виведення на основі методів теорії збурень фундаментальних для статистичної механіки рівнянь Фоккера—Планка для динамічних систем із випадковою силою, без припущення існування ймовірності переходу з одного стану в інший, як це розглядалося раніше [577]. Ними досліджувались ергодичні властивості процесу Маркова та вперше розглядались диференціальні рівняння з “білими шумами”, які становлять основу сучасної теорії стохастичних диференціальних рівнянь [576,578–581]. Даний напрям в подальшому розробляв учень М.М.Боголюбова член-кореспондент НАН України Й.І.Гіхман.

Фактично в цих роботах вже було використано новий підхід, який пізніше М.М.Боголюбов з успіхом застосував у статистичній механіці. Суть його полягала в тому, що основні рівняння статистичної механіки виводяться на основі мінімально необхідних фундаментальних принципів без додаткових, чисто технічних припущень.

На момент звернення М.М.Боголюбова до статистичної фізики формальна структура рівноважної статистичної механіки вже була зрозумілою завдяки фундаментальним працям Дж.Гіббса. Значення цієї теорії усвідомили після праць Г.Урсела (1928 р.) та Дж.Майера (1937 р.), які успішно застосували рівноважну статистичну механіку для виведення рівняння стану [534-535]. Логічні принципи рівноважної статистичної механіки критично опрацювали П.Еренфест та Т.Афанасьєва-Еренфест (1911 р.) [527], а її математичні методи широко розвинули Ч.Дарвін і р.Фаулер (1922 р.), які запропонували метод обчислення статистичного інтеграла [459-461].

Кардинальною для подальшого розвитку статистичної фізики стала квантова теорія, яку започаткував М.Планк у 1900 р. [462]. На основі використання у статистичній фізиці квантових уявлень сформувалась квантова статистична фізика. Так, у 1924 р. Ш.Бозе [467] ввів розподіл за імпульсами квантів світла та винайшов його зв'язок з розподілом Планка, а також Е.Фермі (1925) [470] одержав функції розподілу частинок, що підпорядковуються принципу Паулі. Зв'язок розподілів Фермі—Дірака та Бозе—Ейнштейна з математичним апаратом квантової механіки було встановлено у 1926 р. П.Діраком. З цих робіт бере початок квантова статистична фізика.

Потреба розробити загальну точку зору щодо нерівноважних процесів та дослідити зв'язок між рівняннями типу Больцмана, що описують процеси перенесення, та рівнянням Ліувілля, обумовила появу низки праць. У цьому напрямі першою була праця Ж.Івона (1935 р.) [536], (пізніше — [537]), за нею вийшли праці М.Борна і Г.Гріна (1946–1947 рр.) [538], підсумовані в книзі [539], а також Дж.Кірквуда (1941–1947 рр.) [540] та М.М.Боголюбова (1946 р.) [247]. Зокрема, було створено формальну теорію рідкого стану, в розвиток якої значний внесок здійснив і Дж.Майер [542]. Ці праці, разом з дослідженнями М.С.Крилова 1950 р. [543], започаткували динамічне обґрунтування статистичної теорії нерівноважних процесів.

З рівняння Ліувілля методом послідовного інтегрування за координатами та імпульсами частинок  $N-1, N-2, \dots$  виводяться рівняння, що визначають зміни частинкових функцій розподілу  $F_s$  класичної системи частинок з парним потенціалом взаємодії. Таким чином, виходить ланцюжок “зачіплених” рівнянь, що пов’язують зміни функцій  $F_s$  та  $F_{s+1}$  у часі. Ці рівняння й було виведено вперше Ж.Івноном в 1935 р., а потім підтверджено та широко використано М.Борном і Г.Гріном, Дж.Кірквудом та М.М.Боголюбовим. При їх виведенні було виконано термодинамічний граничний перехід  $V \rightarrow \infty, N \rightarrow \infty$  при  $V/N = v = \text{const}$ , після якого знехтувано впливом стінок та відкинуто члени  $\sim s/N$ . Важливими є перші рівняння ланцюжка:

$$\frac{\partial F_1}{\partial t} + \frac{p_1}{m} \cdot \frac{\partial F_1}{\partial q_1} = \frac{1}{v} \int \theta_{12} F_2 dq_2 dp_2,$$

$$\frac{\partial F_2}{\partial t} + \left( \frac{p_1}{m} \cdot \frac{\partial}{\partial q_1} + \frac{p_2}{m} \cdot \frac{\partial}{\partial q_2} - \theta_{12} \right) F_2 = \frac{1}{v} \int (\theta_{13} + \theta_{23}) F_3 dq_3 dp_3,$$

$$\text{де } \theta_{ij} = \frac{\partial \Phi(|q_i - q_j|)}{\partial q_i} \cdot \frac{\partial}{\partial p_i} + \frac{\partial \Phi(|q_i - q_j|)}{\partial q_j} \cdot \frac{\partial}{\partial p_j}, \quad m \text{ — маса частинок.}$$

Система цих рівнянь еквівалентна, зрозуміло, рівнянню Ліувілля.

Розглянутий метод нерівноважної статистичної механіки виявився надзвичайно ефективним і у світовій літературі дістав назву методу, або ланцюжка рівнянь ББГКІ (Боголюбова—Борна—Гріна—Кірквуда—Івона). За його допомогою вдається вивести кінетичне рівняння Больцмана для газу малої густини та для газу із слабкою взаємодією між молекулами.

Суттєвий внесок цих праць полягає як у спільності головних припущень, так і в можливості застосування результатів до густіших середовищ (у випадку теорії Кірквуда). М.Борн та його учень Г.Грін мали на меті узагальнити кінетичну теорію для застосування її до рідин. Вони запропонували узагальнення рівняння Больцмана, в основу якого було покладено послідовне використання рівнянь неперервності в просторі координат, швидкостей і прискорень окремих молекул та введе-

но деякий статистичний опис, що дозволяє розв'язати систему даних взаємозв'язаних рівнянь. Цей метод було викладено в серії статей [538], зібраних згодом в окремі книзі, виданій у 1949 р. [539]. Однак у згаданих теоріях не можна було обійтися без додаткових припущень, а також були відсутні вказівки на послідовний метод узагальнення класичного рівняння Больцмана.

Хоч на перший погляд рівняння Кірквуда відрізняється від ланцюжка рівнянь, одержаних у працях Ж.Івона, М.Борна та Г.Гріна, а також М.М.Боголюбова, проте, як показав Дж.Майер, воно за суттю тотожно ланцюжку, тому що без жодних наближень дає ті самі результати. Свое інтегральне рівняння Дж.Кірквуд подав у серії спільних з учнями статей незалежно від невідомої ще в той час за межами Франції більш ранньої праці Ж.Івона [536]. Вихідні положення Дж.Кірквуда та Ж.Івона різні, але зрештою вони приводять до одних і тих же результатів.

Однак до М.М.Боголюбова автори не розглядали важливе питання про граничні умови. Для одержання кінетичного рівняння — замкненого рівняння для функції розподілу — необхідна була додаткова умова, яку і було запроваджено М.М.Боголюбовим. Це умова про послаблення кореляцій, завдяки якій одержують рівняння, що описує також необоротні процеси, зокрема, встановлення рівноважного стану.

Першою працею М.М.Боголюбова в цьому напрямку стала післявоєнна монографія 1945 р. «Про деякі статистичні методи в математичній фізиці» [582], де, розвиваючи ідеї праці 1939 р. [583], він провів подальше дослідження поведінки системи, яка зазнає зовнішнього випадкового впливу. Зокрема, було розглянуто задачу про вплив випадкової сили на гармонічний вібратор та вперше математично строго обґрунтовано загальновідому гіпотезу про встановлення статистичної рівноваги в системі, пов'язаній з термостатом (сукупністю великої кількості осциляторів).

У даній монографії М.М.Боголюбов показав, що залежно від вибору масштабу часу один і той самий випадковий процес можна розглядати як динамічний, марковський, або деякий немарковський процес. Тим самим вперше було запроваджено в статистичну механіку та обґрунтовано ідею про ієрархію часів релаксації в багаточастинковій системі (поняття «час релаксації» вперше ввів Дж.Максвелл у 1866 р.) Запропонована ідея виявилася принциповою для статистичного опису

нерівноважних процесів у газах, рідинах та кристалах, визначивши подальший розвиток статистичної теорії необоротних процесів.

Це стало підґрунтям для наступної фундаментальної монографії 1946 р. «Проблеми динамічної теорії в статистичній фізиці» [247] М.М.Боголюбовим було розглянуто важливе методологічне питання зв'язку статистичних та динамічних закономірностей в природі та запропоновано новий оригінальний метод рівноважної та нерівноважної статистичної механіки, суттєва особливість якого полягала у необхідності чіткого розрізнення масштабів часів, що виникають в задачі. Даючи тлумачення загальної динамічної теорії газів, М.М.Боголюбов висунув ідею про абсолютно різні масштаби часу та пов'язані з ними стадії еволюції: хаотичну, кінетичну та гідродинамічну. Таким чином, у розглядуваних задачах з'явилися принаймні два характерні часи: тривалість взаємодії ( $t$  — порядку  $10^{-12} - 10^{-13}$  с) та час релаксації, який для розріджених газів збігається за порядком величини із середнім часом між двома ( $10^{-8} - 10^{-9}$  с)

М.М.Боголюбов показав, якщо початковий розподіл довільний, то на ранній стадії стан системи може значно відрізнятись від рівноважного і для його опису необхідно задати дуже велике число функцій розподілу: не тільки одночастинкову та двочастинкову, а й функції вищих порядків. Вони швидко змінюються за часом відповідно до рівняння Ліувілля. Проте за проміжок порядку часу зіткнення для багатьох систем з великою кількістю частинок (наприклад, гази з малою густиною чи малою взаємодією) встигає пройти значно швидший процес, ніж релаксаційний. Настає синхронізація функцій розподілу, або кінетична стадія, коли всі функції розподілу повністю визначаються одночастинковою функцією розподілу. Для цієї стадії вдається, виходячи з рівняння Ліувілля, побудувати кінетичне рівняння для одночастинкової функції розподілу. Таким чином, М.М.Боголюбов припускає, що через час порядку  $t_{83}$  можна суттєво спростити опис системи: одночастинкова функція розподілу  $f_1$  задовольняє окреме рівняння типу

$$\frac{\partial f_1}{\partial t} = A(x | f_1) \quad x = (p, q),$$

а функції розподілу багатьох частинок стають функціоналами від  $f_1$ :



$$f'_s(x_1, x_2, \dots, x_s, t) = f'_s(x_1, x_2, \dots, x_s \mid f_1) \cdot$$

Для більших масштабів часу (для газів — з більшим часом вільного пробігу) далі зменшується кількість параметрів, необхідних для опису системи, і настає гідродинамічна стадія, яку можна зобразити гідродинамічними рівняннями (спільно з рівнянням теплопровідності), тобто лише кількома моментами функцій розподілу — середньою кількістю частинок, середніми енергією та швидкістю. Функція розподілу починає залежати від часу тільки через ці параметри, і рівняння гідродинаміки можна одержати безпосередньо з ланцюжка рівнянь як асимптотику. М.М.Боголюбов показав також, що перше наближення ланцюжка рівнянь дає рівняння руху ідеальної рідини, а друге — в'язкої рідини, в якій враховуються також процеси теплообміну.

На основі даного методу ланцюжків рівнянь для функцій розподілу комплексів частинок, використаному у випадку нерівноважних процесів, М.М.Боголюбову вдалося розвинути загальний метод побудови кінетичних рівнянь для систем взаємодіючих частинок — неідеальних квантових газів, що ґрунтується тільки на основних положеннях статистичної механіки. Цей метод вперше дозволив при спеціальному запровадженні малих параметрів строго вивести з єдиної, послідовно мікроскопічної точки зору різні типи кінетичних та гідродинамічних рівнянь для систем з коротко- чи далекодійними, але слабкими, силами. За допомогою цього методу стало можливим уточнювати формули класичної кінетичної теорії подібно до того, як це зроблено в теорії Урсела—Майера для випадку статистичної рівноваги. Зокрема, область застосування кінетичного рівняння Ландау, яке узагальнює рівняння Власова та має фундаментальне значення в дослідженні властивостей плазми, було з'ясовано за допомогою схеми М.М.Боголюбова.

М.М.Боголюбовим було також запропоновано регулярні методи розв'язання кінетичних рівнянь для різноманітних систем як в рівноважному, так і в нерівноважному випадку, наприклад, для найбільш важливих фізичних випадків — короткодії (газ малої густини) та далекодії (система з кулонівською взаємодією). При цьому підсумовування секулярних членів, пропорційних степеням часу, М.М.Боголюбов виконав методами нелінійної механіки. Пізніше І.Пригожин зробив це методом

підсумовування діаграм [584]. Перше строге виведення рівняння перенесення в квантово-механічному випадку без повторного використання припущення про випадковість фаз було здійснене у 1955 р. А.Ван Ховом [585].

Значення розглянутих праць М.М.Боголюбова полягає в тому, що до їх появи дослідження проблеми кінетики здійснювалось методами, в яких існувало внутрішнє протиріччя. З одного боку, рух молекул тлумачився як деякий випадковий процес і вводився до розгляду певний статистичний механізм бінарних зіткнень, а з іншого боку, для розрахунку ефективного перерізу випадкового процесу застосовувалися рівняння класичної механіки. У квантовій статистиці використовувалися такі самі «гібридні» прийоми з тією тільки різницею, що ефективні перерізи обчислювалися за правилами квантової механіки та враховувалися вимоги симетрії. До того ж динамічний процес інерціального руху молекул і стохастичний процес їх зіткнень розглядалися як неінтерферуючі, тому в кінетичному рівнянні член співдудару приписувався конвекційному члену чисто феноменологічно. Внаслідок цього такий підхід, заснований на повному нехтуванні кореляцією між динамічними станами молекул, не можна було безпосередньо узагальнити для одержання рівнянь більш високого наближення. Метод М.М.Боголюбова дозволив усунути ці труднощі.

Замість больцманівської гіпотези молекулярного хаосу (stosszahlansatz) М.М.Боголюбов при побудові кінетичних рівнянь для розв'язання рівняння Ліувілля використав принцип послаблення кореляцій при необмеженому зростанні відстаней між молекулами, завдяки чому одержав необоротність релаксаційного процесу. Цей постулат має статистичний характер і з формальної точки зору виступає як гранична умова, що накладається при знаходженні розв'язків системи рівнянь, завдяки чому явна структура інтеграла зіткнень одержується вже на динамічному рівні. Тому, якщо метод Больцмана, заснований на повному нехтуванні динамічною кореляцією між молекулами, був придатний тільки для розріджених газів і не міг бути безпосередньо узагальнений для одержання рівнянь більш високого наближення, то метод М.М.Боголюбова давав можливість урахувати в кінетичному рівнянні вищі члени розкладання за степенями густини. Фактично, М.М.Боголюбовим було дано нове тлумачення стану систем статис-

тичної механіки як нескінченної послідовності функцій розподілу, де еволюція стану описувалась рівняннями Боголюбова. Внаслідок цього були радикально переглянуті уявлення про суть динамічних процесів, які призводять до виникнення необоротності, і вказано шлях, на якому можна одержати поправки до рівняння Больцмана та вирішити проблему кінетики в найбільш важливих фізичних випадках, зокрема, в системах з кулонівською взаємодією.

Однією з важливих проблем, яка виникає при розгляді великого числа частинок, є необхідність здійснити в розглядуваній системі термодинамічний граничний перехід, щоб одержати точні термодинамічні співвідношення. М.М.Боголюбов приділяв велику увагу строгому математичному обґрунтуванню такого граничного переходу до нескінченного числа ступенів вільності в нескінченному об'ємі для класичних систем [586,587].

У статті [586] спільно зі своїм учнем Б.І.Хацетом він вперше в світовій літературі розпочав строге обґрунтування процедури термодинамічного граничного переходу для кореляційних функцій. Автори виділили клас модельних систем статистичної фізики, який припускає точний розв'язок у термодинамічній границі, довели існування термодинамічної границі для рівноважних систем. Термодинамічний граничний перехід для одновимірних нерівноважних систем, а також для певних багатовимірних систем обґрунтували учень М.М.Боголюбова академік НАН України Д.Я.Петрина спільно з В.І.Герасименко/

Починаючи з 1947 р. наукові інтереси М.М.Боголюбова звернулись до проблем квантової статистичної механіки. Так, спільно зі своїм учнем К.П.Гуровим у 1947 р. він здійснив узагальнення методу побудови кінетичних рівнянь для квантових систем на основі спеціального варіанта теорії збурень за мализною взаємодії [588,589]. При цьому для випадку бозе-системи за відсутності виродження вони побудували кінетичне рівняння у вигляді, уточненому порівняно з больцманівським. Це рівняння відрізнялося від звичайного рівняння Больцмана наявністю додаткового члена, який враховував інтерференцію конвекції та співударів. Фізичний зміст даної поправки з'ясовується при переході до рівнянь гідродинаміки. Якщо звичайне рівняння Больцмана приводить до рівнянь гідродинаміки, що відповідають середовищу з рівнянням стану ідеального газу, то одержане М.М.Боголюбовим і К.П.Гуровим уточ-

нене кінетичне рівняння приводить до поправок коефіцієнтів в'язкості та теплопровідності в рівнянні стану. Таким чином, фундаментальним результатом дослідження Боголюбова було не тільки обґрунтування рівняння Больцмана на основі динамічної теорії, а і його суттєве уточнення.

Дещо інший варіант розкладання за малим параметром був застосований М.М.Боголюбовим у задачі щодо системи частинок, які взаємодіють за законом Кулона. Такою є, зокрема, задача про розчин сильних електролітів. Спільно з С.В.Тябликовим і В.В.Толмачовим він у 1958 р. розробив послідовну теорію сильних електролітів [590]. У 1955 р. М.М.Боголюбовим та Д.Н.Зубаревим було побудовано метод дослідження неідеальних квантових систем, у основу якого покладене введення фур'є-компонент густини як колективних змінних [591].

Результати М.М.Боголюбова з нерівноважної статистичної механіки класичних систем значною мірою сприяли тому, що статистична фізика стала одним із найважливіших розділів сучасної теоретичної фізики. Фундаментальна монографія М.М.Боголюбова «Проблеми динамічної теорії в статистичній фізиці» на багато років визначила розвиток статистичної фізики в Україні і світі, а його результати і нині є підґрунтям для багатьох сучасних методів статистичної фізики.

#### 5.4. Побудова М.М.Боголюбовим мікроскопічної теорії надплинності (1947 рр.)

Фундаментальним внеском у квантову статистичну фізику стали також роботи М.М.Боголюбова з теорії конденсації неідеального бозе-газу. Побудова мікроскопічної теорії надплинності, яка є фундаментальною властивістю бозевських систем, привернула увагу М.М.Боголюбова ще в 1947 р. У цьому ж році було надруковано дві його праці, де описано послідовну наближену схему вторинного квантування щодо моделі неідеального бозе-газу [592,593].

Явище надплинності рідкого гелію, тобто відсутності в ньому будь-якого тертя, було експериментально відкрито П.Л.Капіцею, а також незалежно від нього Дж.Алленом і А.Майзнером у 1938 р. [594–596]. Виявилось, що нижче температури 2,19 К рідкий гелій розкладається на дві компоненти: надплинну, абсолютно позбавлену в'язкості (гелій II) і нормальну (гелій I). З приводу цього відкриття П.Л.Капіца писав у своїй праці: «Ми запропонували вважати, що He-II — ідеально плинна рідина, і за аналогією із надпровідністю назвали цю властивість надплинністю» [597,с.28].

Надплинність рідкого гелію є унікальним явищем природи, у якому властиві мікрооб'єктам квантові закономірності виявляються в макроскопічних масштабах. Дослідження цього явища відбувалось в двох напрямках: побудова феноменологічної макроскопічної теорії, яка б відображала всю сукупність експериментальних фактів щодо даних макроскопічних об'єктів, та розробка мікроскопічної теорії, яка б пояснювала внутрішній механізм явища і встановлювала б зв'язки між динамічними величинами, з яких випливають рівняння мікроскопічної теорії.

На можливість квантово-механічного обґрунтування ефектів у рідкому гелії вказували Л.Тісса (1938 р.) [598] та Г.Лондон (1939 р.) [599]. На цій основі Л.Тісса розробив макроскопічну теорію надплинності, у

якій рідкий гелій при нижчій температурі, ніж температура фазового переходу, розглядався як сукупність надплинної та нормальної компонент, кожна з яких може рухатися зі своєю швидкістю. Більш розвинуту форму макроскопічної теорії надплинності в 1941 р. дав Л.Д.Ландау у статті “Теорія надплинності гелію II”, де рух надплинної компоненти відрізняється від руху нормальної не тільки відсутністю в’язкості, а й тим, що він є обов’язково потенціальним [600]. Л.Д.Ландау побудував досить повну картину відомих властивостей гелію II та передбачив ряд нових. Зокрема, було визначено характер розподілу енергетичних рівнів у спектрі гелію II як квантової рідини, досліджено температурну залежність гелію II, передбачено одночасне існування в гелії II при температурах, що відрізняються від абсолютного нуля, двох рухів — надплинного та нормального, виведено рівняння макроскопічної гідродинаміки гелію II, передбачено в ньому другий звук. Таким чином, Л.Д.Ландау вперше дав якісне пояснення надплинності на основі феноменологічних уявлень про те, що слабкозбуджені стани квантової рідини мають вигляд елементарних збуджень (квазічастинок). Він емпірично зробив припущення про характер спектра елементарних збуджень в рідкому гелії, який складається з двох гілок: фононної, де  $\varepsilon(p) = cp$ , та ротонної, де  $\varepsilon(p) = \Delta + (p - p_0)^2 / 2\mu$ . Тут  $\Delta$ ,  $C$ ,  $p_0$  — деякі сталі,  $\mu$  — ефективна маса. Саме фононний характер спектра при малих імпульсах і забезпечує можливість утворення “зв’язаного” колективу бозонів, який здійснює надплинний рух. Згідно з цією теорією He II, як це й спостерігалось, протікає через вузьку щілину, не переносячи ентропію.

Ці дослідження Л.Д.Ландау продовжив у 1944 р. у статті “До гідродинаміки гелію II” [533, т.1, С.453–457], а також у 1948 р., у спільній з І.Я.Померанчуком праці, де було розглянуто поведінку сторонніх атомів в гелії II [533, т.2, с.35–37.] і у 1949 р., коли ним з І.М.Халатниковим було визначено в’язкість гелію II [533, т.2, с.66–109]. У подальшому в 1956–1957 рр. Л.Д.Ландау побудував загальну теорію фермі-рідин, засновану на представленні енергії збуджень як функціонала від функції розподілу [533, т.2, С.328–348]. За ці дослідження з теорії конденсованих середовищ у 1962 р. Л.Д.Ландау було присуджено Нобелівську премію з фізики.

Проте, незважаючи на успіхи макроскопічної теорії надплинності, вона не привела до повного розуміння причин цього явища та його вну-

трішнього механізму. Зокрема, р.Фейнман [601] показав, що квантова гідродинаміка не передбачає спектра збуджень, як це раніше вважали Ландау та інші дослідники. Оскільки гідродинаміка Ландау повинна приводити до множини більш низьких збуджень, то вона не пояснює надплинності. Помилка Л.Д.Ландау, на думку р.Фейнмана, була в тому, що, неявно припускаючи розрізнення частинок, він не врахував ефекти статистики [602].

Складність побудови мікроскопічної теорії надплинності полягала в тому, що безпосередньо розрахувати властивості реального рідкого гелію було неможливо через відсутність у задачі малого параметра. Ідеальний бозе-ейнштейнівський газ не має властивості надплинності тому, що конденсат (тобто сукупність частинок, імпульс яких точно дорівнює нулю), не створює зв'язаного колективу і ніяк не реагує на процес руху окремих частинок, які містяться у ньому. Таким чином, для пояснення явища надплинності необхідно було враховувати взаємодію між частинками, тому за об'єкт дослідження найдоцільніше було вибрати неідеальні бозе-системи. За цих умов й було розроблено мікроскопічну теорію надплинності М.М.Боголюбовим (1947).

Оскільки елементарні збудження в неідеальному бозе-газі є суперпозицією операторів народження та знищення частинок з протилежно направленими імпульсами, то М.М.Боголюбов припустив, що слабкозбуджені стани неідеального бозе-газу можна розглядати як стани бозе-газу квазічастинок, і що закон дисперсії квазічастинок, які при малих імпульсах мають лінійний хід, задовольняє критерій надплинності. Тим самим фактично було дано мікроскопічне пояснення явища надплинності в  $\text{He}^4$  пов'язане з утворенням термодинамічно стійкого бозе-конденсату в цій системі при досить низьких температурах та при слабкій взаємодії (відштовхуванні), завдяки якій бозе-конденсат створює зв'язаний колектив, і „випадання” окремих частинок з нього стає енергетично не вигідним.

М.М.Боголюбову належить мікроскопічне доведення того, що при деяких умовах в слабконеідеальному бозе-газі вироджений конденсат може рухатися без втрати відносно елементарних збуджень з довільною досить малою швидкістю  $u \leq \min \varepsilon(p)/|p|$  [603]. В ідеальному ж газі, де не враховується взаємодія між бозонами,  $\varepsilon(p) = p^2/2m$ ,  $\varepsilon(p) = p^2/2m$  і явище надплинності відсутнє.

Виходячи із загального гамільтоніана для бозе-систем і припускаючи, що макроскопічна кількість частинок перебуває в основному стані з нульовим імпульсом, М.М.Боголюбов одержав для збуджень апроксимуючий гамільтоніан, який є квадратичною формою від операторів народження та знищення. Оскільки звичайна теорія збуджень тут виявилась незастосовною внаслідок сильної взаємодії частинок з протилежними імпульсами, то для розрахунку спектра  $\mathcal{E}(p)$  елементарних збуджень була запропонована діагоналізація гамільтоніана. Для цього вперше М.М.Боголюбовим було запроваджено  $U-V$ -канонічні перетворення, відомі нині як перетворення Боголюбова, а також поза межами теорії збуджень знайдено спектр  $\mathcal{E}(p)$  елементарних збуджень слабконеідеального бозе-газу, з виразу для якого випливав висновок про єдність спектра фонон-ротонних збуджень. Виявилось, що даний спектр має ті самі властивості, що й спектр гелію II, тобто що гелій II може знаходитися у виродженому стані і мати надплинність. Завдяки цьому було створено теоретичну модель для пояснення явища надплинності гелію II.

Квазічастинкове тлумачення, дане теорією Боголюбова, дозволило побудувати прозору фізичну картину надплинного стану, систему гідродинамічних рівнянь у всьому діапазоні температур, послідовно описати енергетичний спектр надплинної системи та пояснити співвідношення між надплинними та нормальними станами. Висновок М.М.Боголюбова про те, що сили відштовхування між бозонами сприяють надплинності, а сили притягування заважають, тобто що звичайна парна взаємодія не руйнує, а, навпаки, стабілізує основний стан системи, завдяки чому відбувається нібито злипання частинок з протилежними імпульсами, виходило за межі розглянутої ним моделі. В подальшому це стало основою для введення такого важливого поняття класичної і квантової статистики, як стійкість взаємодій. Таким чином, можна стверджувати, що теоретичні праці Л.Д.Ландау та М.М.Боголюбова з теорії надплинності разом з експериментальними роботами П.Л.Капіці започаткували фізику квантових рідин.

У розвиток цих ідей в 1963 р. у праці [604] М.М.Боголюбов, виходячи з рівнянь руху однакових бозе-часток, дав послідовне виведення рівнянь гідродинаміки надплинної ідеальної рідини, і одержав гідродинамічне наближення для функцій Гріна. Він також поширив виведення рівнянь гідродинаміки для нормальної компоненти на випадок наявності надплинної компоненти [605].



У 1949 р. М.М.Боголюбов узагальнив свої результати, пов'язані з побудовою молекулярної теорії надплинності та полярної моделі металу, розробленої спільно з учнем С.В.Тябликовим в [606–608], у монографії “Лекції з квантової статистики” [609]. Ця книга стала першим систематичним викладенням основних положень і методів статистичної механіки квантових систем, перш за все методу статистичних операторів комплексів молекул та тісно пов'язаного з ним методу наближеного вторинного квантування, що базується на квазікласичному описі основного стану системи за методом Фока. Елементарні збудження відповідають малим відхиленням від цього стану. В монографії М.М.Боголюбов запровадив також нове поняття стану систем у квантовій статистичній механіці як нескінченної послідовності статистичних операторів, еволюція якого описується рівняннями для статистичних операторів (нині їх називають рівняннями Боголюбова). Слід підкреслити, що праці М.М.Боголюбова з класичної та квантової статистики в цілому започаткували новий напрям в сучасній математичній фізиці — математичну фізику нескінченних систем, характерною рисою якої є поняття стану. В класичній математичній фізиці стан системи задається скінченним числом функцій, які визначаються через розв'язки скінченної системи диференціальних рівнянь в частинних похідних. На відміну від цього в сучасній математичній фізиці стан описується нескінченною послідовністю функцій від зростаючого числа аргументів, які задовольняють операторні рівняння.

Розроблений Боголюбовим метод побудови секулярного рівняння для полярної моделі металу суттєво поліпшив метод Гайтлера—Лондона і за змістом виявився спеціальною формою методу Рітца. Для розв'язання даного рівняння використовували метод наближеної ортогоналізації пробних хвильових функцій та метод теорії збурень для визначення енергетичного спектра. Було також встановлено важливі співвідношення, що пов'язують ферміонні, бозонні та спінові оператори, та побудовано розв'язок секулярних рівнянь у другому та третьому наближеннях. Саме третє наближення дає можливість вивчення властивостей електричного струму.

Багатоелектронний метод Боголюбова є послідовним методом при тлумаченні обмінної взаємодії в кристалах. Він дає змогу врахувати всі типи обмінних взаємодій більш строго, ніж це може бути зроблено при

«механічному» перенесенні результатів «молекулярної» задачі трьох центрів — чотирьох електронів на кристал.

Методи, розроблені М.М.Боголюбовим у монографії “Лекції з квантової статистики”, стали основою для активного розвитку мікроскопічної теорії феромагнетизму, зокрема, дослідження спектрів елементарних збуджень феромагнітних та антиферомагнітних кристалів. Так, М.М.Боголюбов і С.В.Тябликов розробили один з варіантів теоретико-польової техніки в статистичній фізиці — техніку температурних двочасових (запізнілих і випереджальних) функцій Гріна. Цей метод зручний завдяки простоті аналітичних властивостей фур’є-образів запізнілої і випереджальної функцій Гріна в комплексній площині енергетичної змінної. Важливим новим результатом, одержаним С.В.Тябликовим, було уточнення низькотемпературного розкладання для намагніченості феромагнетиків. Більш докладно ці проблеми досліджувались у працях С.В.Тябликова та Д.М.Зубарева в 1960—1963 рр. Метод двочасових функцій Гріна та його численні застосування в статистичній механіці викладено в 1961 р. у монографії В.А.Бонч-Бруєвича та С.В.Тябликова «Метод функцій Гріна в статистичній механіці» з передмовою М.М.Боголюбова [610].

Нескінченна система рівнянь для двочасових функцій Гріна, складена на основі зредукованого гамільтоніана теорії надпровідності, розглядалася в праці М.М.Боголюбова, Д.М.Зубарева та Ю.О.Церковникова «Асимптотично точний розв’язок для модельного гамільтоніана теорії надпровідності» [611]. Крім того, в 1958 р. С.Т.Беляєв побудував діаграмну техніку для нормальних та аномальних функцій Гріна при нульовій температурі [612].

## 5.5. Створення теорії кристалізації та теорії будови рідин (В.І.Данилов, 30-ті рр. ХХ ст.)

Одним з об'єктів досліджень статистичної фізики є речовина в рідкому стані. Академік НАН України Віталій Іванович Данилов стояв біля джерел зародження фізики рідкого стану в Україні та створив велику наукову школу в цій галузі. Його праці щодо дослідження процесів будови рідин, а також однієї з головних проблем фізики фазових перетворень — кристалізації рідин стали основоположними для формування уявлень про конденсований стан речовини [613–616].

Оскільки важливим етапом при створенні матеріалів з високими характеристиками міцності є процеси термічної обробки сплавів, то вивчення цих процесів, зокрема для сталі, стало основним напрямом розвитку фізичного матеріалознавства в Україні. Перші дослідження з фізики металів були виконані в організованому в 1928 р. Українському фізико-технічному інституті у Харкові; потім проводились з 1931 р. у Дніпропетровській філії УФТІ, на базі якої у 1932 р. було створено Дніпропетровський фізико-технічний інститут ДФТІ; з 1946 р. ця тематика вивчалась у Лабораторії металофізики НАН України, яка стала базою для створення у 1955 р. Інституту металофізики НАН України.

В організації Дніпропетровського фізико-технічного інституту значною була роль завідувача кафедри фізики Дніпропетровського гірничого інституту, професора Дніпропетровського університету (на той час — Інституту народної освіти (ДІНО)) та керівника відділу фізичних вимірів Українського науково-дослідного інституту фізичної хімії Андрія Едуардовича Малиновського. На жаль, його доля складалась трагічно, його було репресовано та страчено у 1937 р. [617].

А.Е.Малиновський організував у ДІНО семінар підвищеного типу з фізики, а потім з учасників цього семінару с у Фізико-хіміко-математичному інституті (виділився з ДІНО у 1930 р.) творив групу, яка працювала над питаннями електронної теорії металів та фізики

горіння та вибухів. До цієї групи входили випускники Дніпропетровського інституту народної освіти, зокрема, один з перших аспірантів А.Е.Малиновського — Віталій Іванович Данилов. Він одразу виявив себе як серйозний і самостійний дослідник та почав розробляти новий напрям досліджень рідкого стану речовини, в тому числі рентгенографічними методами; вивчав термоелектричні властивості сплавів при плавленні та кристалізації; розсіювання рентгенівських променів у розчинах, які містять важкі молекули в легкому розчиннику. Працював також в Українській асоціації фізиків [617].

В.І.Данилов народився 10 квітня 1902 р. в с.Жовте (нині Луганська обл.). Після закінчення у 1926 р. Дніпропетровського інституту народної освіти (нині університет) вступив до аспірантури (керівник-професор А.Е.Малиновський). З 1926 р. викладав фізику в ДІНО, з 1930 — у фізико-хіміко-математичному інституті. З 1934 до 1941 рр. він — професор Дніпропетровського університету, де у 1935 р. організував та очолив кафедру молекулярної фізики; водночас з 1931 р. — науковий співробітник Дніпропетровської філії УФТІ, у 1933–1944 — завідувач лабораторії будови рідких металів (пізніше — кристалізації) Дніпропетровського фізико-технічного інституту. В подальшому, коли Дніпропетровський фізико-технічний інститут у 1944 р. після евакуації переїхав до Москви та був реформований у Інститут металознавства та фізики металів у складі Центрального науково-дослідного інституту чорної металургії, В.І.Данилов продовжував очолювати відділ кристалізації. Аналогічним відділом він керував у 1946–1954 рр. у Лабораторії металофізики АН України, багато зробив для її перетворення в Інститут металофізики та в 1951 р. став його першим директором. Цього ж року вченого було обрано академіком НАН України.

Формування наукової школи В.І.Данилова почалося у 30-х рр. ХХ ст. у Дніпропетровському університеті та Дніпропетровському фізико-технічному інституті, а продовжилось в Києві в Інституті металофізики НАН України. Відділи кристалізації в зазначених установах стали тими центрами, які згуртували навколо В.І.Данилова талановиту молодь і стали основою для формування його наукової школи.

Численні роботи В.І.Данилова та його учнів щодо з'ясування структури рідини та геометрії взаємного розташування в ній атомів і молекул, обумовленого міжатомною та міжмолекулярною взаємодією

в рідині, мали ключове значення для побудови теорії рідкого стану та практичного застосування в металургійній промисловості. Вже на момент створення ДФТІ у 1932 р. одним із завдань інституту мало стати “вивчення внутрішнього механізму перетворень у металах та сплавах при різних видах термічної та механічної обробки, а також вивчення кристалізації металів, головним чином, за допомогою рентгенівського проміння (рентгенометалографія) із застосуванням магнітних, мікроскопічних методів дослідження...” [618].

Слід підкреслити, що за словами С.І.Вавилова, “це був період, коли вчення про рідкий стан залишалось „білою плямою” у фізиці, було мало вивченим та малозрозумілим” [619]. З перших же днів організації лабораторії В.І.Данилов поставив завдання дослідити зв’язок між структурою речовини у твердому та рідкому станах, вивчити закони утворення та росту кристалів, щоб навчитися керувати процесами кристалізації та одержувати металічні зливки з наперед заданою структурою.

Учень В.І.Данилова І.В.Радченко згадував про умови праці в лабораторії: “...в тій же кімнаті, де проводились рентгенометалографічні дослідження рідин, за диктовою перегородкою велися й інші дослідження — Ткаченко, Теверовський, Неймарк, Плужник вивчали процеси переохолодження рідин, зародкоутворення при кристалізації, дію ультразвуку на ці процеси, перевіряли досліди Тамма. В цих умовах були одержані результати тих широко відомих робіт Віталія Івановича 30-х років з рентгенографічного вивчення рідких металів, про які згадував Я.І.Френкель у своїй “Кінетичній теорії рідин” та на які даються посилання у всіх статтях, присвячених структурі рідких металів і сплавів” [619].

У працях В.І.Данилова було встановлено ряд важливих закономірностей, пов’язаних з характерним розподілом атомів у рідких металах і сплавах, а також з переходом речовини з рідкого стану в твердий. Зокрема, було показано, що різні рідкі метали мають різну упаковку атомів, а одноатомні рідини можуть мати різну структуру, яка значно відрізняється від щільної упаковки, причому в багатьох випадках є близькою до координації атомів у кристалі. Тим самим було спростовано тенденцію, яка намітилася після модельних дослідів П.Дебая та Х.Менке (1931), приписувати рідким металам та і взагалі одноатомним рідинам структуру щільно упакованих куль. Було також з’ясовано важливий факт, що

кристалізація визначається спонтанним зародженням центрів кристалізації, а домішки є другорядним фактором.

Дослідження фізичної природи явища зародження центрів кристалізації та вивчення впливу різних факторів на цей процес були розпочаті В.І.Даниловим в період його роботи в Дніпропетровському фізико-технічному інституті у 1932–1941 рр. Ці роботи значно розширили статистичну теорію кристалізації та відкрили нові можливості впливу на структуру литого металу шляхом введення домішок. Так, було встановлено, що частинки домішок у рідині можуть бути у активному й неактивному станах; виявлено і детально вивчено явище активації; запропоновано гіпотезу про механізм активації (В.І.Данилов, О.Д.Козачковський); показано, що процес активації твердих поверхонь має місце тільки в контакті з закристалізованою рідиною, а дезактивація — тільки при перегріванні рідини [620]. Зокрема, В.І.Даниловим та В.Є.Неймарком у 1933–1935 рр. було показано, що рідка ртуть має структуру, яка відрізняється від щільної упаковки, і взаємне розташування атомів у ній наближається до стану, який спостерігається у твердій фазі [621].

Спільно з Б.М.Теворовським вченим було розроблено теорію переохолодженої рідкої фази, в якій були використані введені Я.І.Френкелем уявлення про гетерофазні флуктуації. Розглядаючи зародження центрів кристалізації у переохолоджених рідинах, вчені виділили дві головні проблеми: явище спонтанної кристалізації та вплив на кристалізацію нерозчинних домішок. Розділення цих ефектів є складним завданням, однак В.І.Данилову із співробітниками вдалося, працюючи з чистими органічними речовинами і металами, після їх ретельного очищення виділити зразки, які задовольняють критерій спонтанного утворення в них центрів кристалізації, та вивчити кінетику цього утворення. Разом з тим, при дослідженні закономірності кристалізації на домішках (В.І.Данилов, В.Є.Неймарк, Д.С.Каменецька, А.Т.Помогайбо), було виключено вплив нерозчинних дисперсних домішок та експериментально розв'язано питання про можливість спонтанної кристалізації.

Таким чином, В.І.Даниловим із співробітниками було показано, що основою кристалізації, незважаючи на величезну роль домішок, є спонтанне зародження її центрів. Всі речовини були систематизовані за характером залежності швидкості зародження в них центрів кри-

талізації від переохолодження на три групи, кожна з яких позначається за назвою речовини, що досліджена більш детально (В.І.Данилов, В.Є.Неймарк, Є.Є.Плужник, Б.М.Тверовський, М.А.Левашевич, О.Д.Козачковський). Так, у речовинах групи салолу спонтанна кристалізація відсутня за всіх температурах; група ортохлорнитробензолу характеризується наявністю різкої межі метастабільності. Речовини цієї групи, куди відносять і метали, не вдається перевести в склоподібний стан. У речовин групи пиперіну одержано криву залежності швидкості зародження центрів кристалізації від переохолодження в широкому інтервалі переохолоджень, тому вони виявились зручними об'єктами досліджень.

Цікаві ефекти було виявлено при дослідженні впливу перегріву рідини на здатність її до переохолодження, зокрема, не підтвердився пропонувані раніше зв'язок між температурною залежністю структури рідини та здатністю її до переохолодження. Прямими дослідями було показано, що залежність між ступенем переохолодження та попереднього перегрівання цілком обумовлена домішками, оскільки після достатнього перегрівання домішки дезактивуються й їх роль можна звести до нуля. Саме в цьому випадку спостерігається спонтанне зародження центрів кристалізації. Уявлення про межу метастабільності переохолодженої рідини як характеристики речовини, а не домішок, і яку можна визначити експериментально, було запропоновано В.І.Даниловим та Б.М.Тверовським. Межа метастабільності була визначена для ряду металів і органічних речовин, використана для обчислення поверхневої енергії на межі кристал–рідина.

Вивчення кристалізації чистих рідин дозволило перевірити справедливність флуктуаційної теорії зародження центрів кристалізації, а також обчислити можливі фізичні константи (поверхневий натяг на межі зародок–рідина, енергію активації), які характеризують кінетику кристалізації конкретних речовин. Одержані експериментальні закономірності були узгоджені з висновками флуктуаційної теорії, що дало змогу оцінити поверхневий натяг між кристалічним зародком та рідиною, а також енергію активації, яка відповідає переходу молекули з рідини в зародок.

Одержані результати привели В.І.Данилова до важливої закономірності: чим значніше в рідкій фізі порушено молекулярну упаковку, яка

переважала у кристалі, тим при більшому переохолодженні зароджуються центри кристалізації. За Даниловим, це пояснюється збільшенням поверхневого натягу при збільшенні різниці в упаковках молекул у твердій та рідкій фазах.

У 1948–1958 рр. в Інституті металофізики НАН України було також проведено ряд досліджень (В.І.Данилов, Д.Є.Овсієнко, А.Г.Лісник) щодо встановлення закономірностей кристалізації на так званих ізоморфних домішках та з'ясування природи їхнього впливу. На багатьох системах (органічних сполуках, солях, легкоплавких металах) були вивчені ці особливості поведінки природноактивних (ізоморфних) домішок і тих, що активуються. Виявилось, що такі домішки, перебуваючи в контактi із закристиалізованою рідиною, можуть набувати додаткової активності, яка, обумовлюючи явище залежності переохолодження від перегрівання, легко усувається перегріванням.

Проте, оскільки роль ізоморфних домішок добре вивчена експериментально та задовільно пояснюється флуктуаційною теорією кристалізації, то В.І.Данилов більше цікавився ефектами активованих домішок, досліджуючи які, він дійшов висновку, що активація домішок відбувається тільки в тому випадку, коли вони перебувають у контактi з кристалічною фазою досліджуваної речовини. Швидкість активації залежить від температури і при сильному зниженні останньої зменшується до нуля. Механізм активації пов'язаний із встановленням молекулярного контакту між частинками домішок і кристалами речовини, що закристиалізувалася. Дезактивація домішок, яка зростає вище точки топлення рідини, пов'язана з руйнуванням межового шару, який виникає на поверхні частинок при активації.

Таким чином, працями В.І.Данилова та його учнів було з'ясовано фізичну суть явища зародження центрів кристалізації та впливу на цей процес різних зовнішніх факторів, надано фізичного змісту статистичній теорії кристалізації. Ці результати знайшли застосування, зокрема, в металургії для вивчення формування графітової структури у вугіллі та коксах.

Дослідження структури ряду подвійних рідких металевих систем евтектичного складу (І.В.Данилов, І.В.Радченко, О.С.Лашко) показали, що в рідинах існують області з двома типами упаковки атомів, близькими до розташування атомів компонентів у твердому стані. Так, у 1937 р.



В.І.Данилов і І.В.Радченко винайшли, що дифракційна картина рідких евтектичних сплавів Bi-Pb, Pb-Sn та Zn-Sn є суперпозицією дифракційних картин чистих компонент з урахуванням співвідношення їх концентрації, та висловили припущення, що в рідких евтектичних сплавах поблизу точки плавлення є мікроділянки зі структурою чистих компонент, які дозволяють провести аналогію між структурами рідких та твердих евтектичних сплавів. Таким чином, розплавлені інтерметалічні речовини мають, за даними Данилова, особливу структуру.

Були виконані також роботи з вивчення будови молекул за рентгенограмами рідин. У подальшому рентгенографічні дослідження рідких евтектичних сплавів проводились учнями В.І.Данилова — А.Ф.Скришевським, А.В.Романовою, Я.І.Дутчаком, Є.З.Спектором. Була встановлена квазіевтектична структура подвійних рідких металічних і неметалічних систем з діаграмою стану евтектичного типу та вперше побудовані криві атомного розміщення подвійних рідких систем.

Під керівництвом В.І.Данилова розроблена також методика дослідження структури рідини на моделях методами ультразвуку [622]. Зокрема, досліджувалось поглинання ультразвуку в подвійних рідких системах, вивчалась структура електролітів, визначалась температурна залежність теплоємності рідких металів.

Необхідно підкреслити, що структура рідин досліджувалась школою В.І.Данилова перш за все рентгенівськими методами, що дозволило науково обґрунтувати класифікацію рідин за їхньою здатністю до переохолодження. Відкрите у 1912 р. явище дифракції рентгенівського проміння на кристалах (М.Лауе, В.Фридрих, П.Книппинг) стало фізичною основою методу рентгеноструктурного аналізу, розробленого одразу після цього відкриття у 1913 р. Генрі та Лоуренсом Бреггами та незалежно Ю.В.Вульфом. За допомогою цього методу було вперше розшифровано кристалічну структуру NaCl. У 1916 р. П.Дебай та П.Шерер запропонували метод вивчення структури дрібнокристалічних (полікристалічних) матеріалів за допомогою дифракції рентгенівських променів (метод Дебая–Шерера), та, дослідивши рідкий бензол, поклали початок рентгенографії рідин.

У формуванні нового напрямку в Україні — вивчення будови речовини, перш за все металів і сплавів у рідкому стані, рентгенівськими

методами — В.І.Данилов був піонером, а його монографія “Розсіяння рентгенівських променів у рідинах” 1935 р. стала широко відомою у світі [623].

Надалі у 1934–1937 рр. В.І.Даниловим та І.В.Радченком було проведено рентгенографічне дослідження будови деяких рідких металів, зокрема вісмуту, свинцю, олова. Було показано, що характер цих металів у рідкому стані близький до упаковки цих атомів у кристалах, тобто при плавленні металів та сплавів взаємне розташування атомів не є довільним, а зберігає взаємну координацію, характерну для твердого стану (збереження координаційного числа) [624,625].

“Під час плавлення зникає кристалічна ґратка, але взаємні розташування атомів не є цілком довільними. Ефект міжмолекулярних сил виявляється в тому, що в невеликих ділянках рідини в кожний момент часу атоми об’єднуються в такі групи, у яких їх взаємне розташування є енергетично вигідним. Координаційне число, яке характеризує упаковку атомів у кристалі, при плавленні зберігається. При цьому в рідині будуть зустрічатись атоми, навколо яких є неправильне число сусідів. У будь-який момент часу вся рідина складатиметься з невеликих ділянок з правильним та неправильним взаємним розташуванням атомів”, — писав В.І.Данилов [243,с.103].

Отже,праціВ.І.ДаниловазучнямиЄ.Є.Плужником,В.Є.Неймарком, І.В.Радченком, М.М.Подосинниковим, М.А.Левашевичем, І.З.Олифиренко, Б.М.Теверовським в галузі рентгенівського вивчення будови рідин, виконані у 30-ті роки ХХ ст., стали фундаментальним внеском у фізику рідкого стану і сприяли створенню її теорії. Так, використовуючи метод малокутового розсіяння рентгенівських променів, В.І.Данилов з М.В.Моховим та Я.М.Лабковським дослідили флуктуації густини у рідинах, пов’язали здатність до переохолодження рідких металів із їх структурними особливостями, показали, що найбільшими переохолодження є для тих металів, у яких молекулярна структура в рідкому стані значно порушена в порівнянні з будовою кристалічної фази. Був також знайдений зв’язок між будовою та здатністю до переохолодження для ряду органічних речовин.

Під керівництвом В.І.Данилова виконано розробку нових і вдосконалення існуючих методів рентгенографічного дослідження рідин для виявлення джерел можливих похибок при кількісних розрахунках

функцій атомного розподілу (О.С.Лошко). На цій основі стало можливим більш точно визначити координаційні числа, які характеризують структуру рідкої фази (застосування короткохвильового випромінювання). Перспективні роботи в цьому напрямі, розпочаті у 1940 р., на жаль, були перервані війною.

Результати цих досліджень дозволили давати кількісні характеристики структури деяких розплавлених металів та солей (В.І.Данилов, С.Я.Красницька, А.В.Романова), кристалогідратів і низки водних розчинів електролітів. У цілому, внаслідок рентгенографічного дослідження рідин дійшли висновку, що в них спостерігається впорядкований розподіл атомів і молекул на близьких відстанях — ближній порядок. Зокрема, вивчалася структура металевих систем для з'ясування параметрів ближнього порядку та міжатомної взаємодії.

Вивчення рідкої фази речовини В.І.Даниловим не обмежувалось застосуванням рентгенівських методів. Під його керівництвом в Дніпропетровському університеті була розроблена оригінальна методика дослідження будови рідини на моделях. На керованій ним кафедрі молекулярної фізики університету було здійснено велику роботу з вивчення поглинання звуку в подвійних рідких системах.

В.І.Даниловим та його учнями було виконано праці прикладного характеру, пов'язані із завданнями металургійної та гірничодобувної промисловості. Зокрема, було з'ясовано, що введенням незначних кількостей певного роду домішок можна регулювати кінетику кристалізації рідин, а також впливати на структуру зливка. На конкретних прикладах алюмінію та інших легкоплавких металів (Д.Ю.Овсієнко) шляхом термонамагнічення криворізьких кварцитних руд було показано, що введення десятих часток відсотка частинок активних домішок, вибраних на підставі конкретних фізичних уявлень про природу їх активності, призводить до різкого подрібнення зерен і зміни характеру розподілу зон у зливку. Таким чином, було розроблено спосіб одержання дрібнокристалічної структури зливка та обґрунтовано методику рентгенографічного аналізу марганцевих руд та вугілля. У 1954–1958 рр. у лабораторії виконано ряд робіт (Д.Ю.Овсієнко, К.І.Сосніна) з дослідження впливу умов кристалізації на формування мозаїчної структури.

Науковий доробок В.І.Данилова було відзначено тим, що у 1940 р. він одержав запрошення до участі в конкурсі на Нобелівську премію з

фізики [617]. В.І.Данилов був надзвичайною особистістю і як вчений, і як людина. “В.І.Данилов не тільки крупний вчений-дослідник, він широко відомий як педагог та організатор навчальної та науково-дослідної роботи. В.І.Данилов зробив великий внесок у справу створення та організації кадрів фізиків. Під його керівництвом проведено 16 дисертаційних робіт. Керівники кафедр ряду вузів та колективи декількох лабораторій у різних містах Союзу — учні В.І.Данилова”, — писав у 1951 році академік Г.В.Курдюмов [613, л.4]. “В роботі проф. Данилова характеризує висока вимогливість та наполегливість і постійне прагнення до вдосконалення роботи керованого ним колективу”, — зазначав у 1946 р. віце-президент НАН України М.О.Лаврентьєв [613, л.32].

В.І.Данилову була притаманна виключна захопленість наукою. “...Яке свято було в нас, як радів Віталій Іванович, коли установка запрацює”, — писав І.В.Радченко [619]. Згідно зі спогадами сучасників, В.І.Данилова вирізняло доброзичливе і поважне ставлення до людей. “Працюючи і тісно спілкуючись з ним багато років, я жодного разу не помітив, щоб Віталій Іванович про когось погано відізвався чи когось образив. Це була людина високої культури, величезних знань, великої внутрішньої скромності”, — згадував В.Є.Неймарк [626]. Д.С.Каменецька додає: “Він був людиною з великої літери: виключно ерудований, дуже талановитий фізик. Він міг би бути гарним скульптором — вмів добре ліпити; був делікатним — не міг сказати людині будь-яке неприємне слово, стримувався всупереч порадам лікарів, що позначалося на його нервовій системі. Він був мислителем у фізиці, і які б питання на семінарах чи радах не порушували, виявлялось, що він про них вже думав і викладав їх дуже ясно, навіть ті питання, якими безпосередньо не займався. Незважаючи на свої достоїнства, він був людиною дуже скромною та по-батьківськи ставився до своїх учнів, турбувався не тільки про їхнє наукове зростання, а й про побут. Учнів у нього було багато” [627]. Так, одним з перших учнів В.І.Данилова був випускник фізико-математичного факультету Дніпропетровського університету О.Д.Козачковський, який під його керівництвом виконав роботи з виявлення механізму впливу нерозчинних домішок на кристалізацію. Надалі В.І.Данилов познайомив його з О.І.Лейпунським, під керівництвом якого О.Д.Козачковський працював тривалий час і став директором Фізико-енергетичного інституту в Обнінську (Росія) [617, с.54].

Ґрунтовні наукові результати, а також високі особисті якості привели до згуртування навколо В.І.Данилова його наукової школи. Викладені дослідження В.І.Данилова 30–40 рр. ХХ ст. у галузі кристалізації, які справили великий вплив на фізику металів, металургію, а також на розуміння властивостей конденсованого стану речовини, успішно розроблялись у подальші роки його учнями в Інституті металофізики НАН України (О.С.Лошко, Д.Є.Овсієнко, А.В.Романова), Інституті фізики металів та металознавства (Москва), у який було у 1944 р. реформовано Дніпропетровський фізико-технічний інститут (О.М.Зубко, Д.С.Каменецька, В.Є.Неймарк), Дніпропетровському металургічному інституті (І.В.Радченко), Київському університеті (О.З.Голик, А.Ф.Скришевський). Наукову школу В.І.Данилова складають член-кореспондент НАН України А.Г.Лесник, доктори наук І.В.Радченко, О.З.Голик, О.М.Зубко, О.Д.Козачковський, М.В.Мохов, М.Л.Левашевич, Б.М.Тевєровський, В.Є.Неймарк, Я.І.Дутчак, Д.С.Каменецька, О.С.Лошко, Д.Є.Овсієнко, А.В.Романова, А.Ф.Скришевський, Є.Є.Плужник, Е.З.Спектор.

Сьогодні напрям, започаткований В.І. Даниловим, продовжує розвиватись. Так, в Інституті металофізики НАН України створено фізичну модель гомогенного зародкоутворення при формуванні литих структур, з'ясовано особливостей кінетики і механізмів зародження центрів кристалізації і структуроутворення багатокомпонентних металевих розплавів; встановлено вплив на особливості кристалізації і структуроутворення глибокого переохолодження, структурних неоднородностей, розчинних і нерозчинних включень, характеру фронту кристалізації, умов невагомості; вивчаються процеси релаксацій в аморфних сплавах і проводиться розробка нових матеріалів і виробів з унікальними фізичними властивостями.

## 5.6. Дослідження зі статистичної фізики в наукових інститутах та університетах в Україні (Харківський та Дніпропетровський фізико-технічні інститути, Інститут фізики, Інститут математики, Інститут металофізики, Харківський, Київський, Дніпропетровський, Львівський та Одеський університети)

Дослідження зі статистичної фізики у 30–40 рр. ХХ ст. проводились в ряді наукових інститутів та університетів України. Важливі теоретичні дослідження, зокрема, в галузі кінетики електронів та фазових переходів, проводились у теоретичному відділі Інституту фізики [628]. Теоретичний відділ Інституту фізики було створено та очолено професором Леоном Йосиповичем Кордишем, з 1944 р. ним керував академік НАН України Соломон Ісакович Пекар.

Одним з найзначніших досягнень теоретичних відділів за час керування С.І.Пекара стало створення у другій половині 40-х рр. ним з учнями теорії поляронів та  $F$ -центрів у кубічних кристалах при сильному електрон-фононному зв'язку та найпростішій формі зони провідності, теорії фотопереходів і теплових переходів електронів у локальних центрах, істотно вдосконаленої теорії коливань кристалічних ґраток з урахуванням деформації іонів і атомів при коливаннях [629]. Після організації Інституту напівпровідників теорія поляронів була узагальнена на випадок проміжного та слабкого електрон-фононного зв'язку, та застосована до багатодолинної структури зони провідності. Було також з'ясовано специфіку поведінки рухомого полярону та п'єзополарону (С.І.Пекар, В.М.Буймистров, Г.В.Вихнина, Е.В.Моздор, Л.С.Хазан, В.І.Шека). Завдяки цим результатам стало можливо на новій основі розглядати теорію електропровідності кристалів з іонною ґраткою, вони також суттєво змінили уявлення про носії заряду та знайшли широке застосування у фізичній хімії та ядерній фізиці.

Під час керування теоретичним відділом Інституту фізики О.С.Давидова ним була створена фундаментальна теорія екситонів у молекулярних кристалах та передбачено існування додаткових світлових хвиль. У 1948–1953 рр. О.С.Давидов показав, що у спектрах молекулярних кристалів мають з'являтися специфічні колективні взаємодії, пов'язані з виникненням екситонів, здатних мігрувати кристалом. Зокрема, з теорії випливало, що у спектрах поглинання спостерігатимуться мультиплети смуг, причому кількість смуг у мультиплетах повинна дорівнювати кількості молекул у елементарній комірці кристалу [630]. Такі мультиплети смуг у спектрах молекулярних кристалів вперше були експериментально відкриті А.Ф.Прихотько у 1948 р. У 1966 р. О.С.Давидову був виданий диплом на відкриття, яке відомо під назвою “давидовське розщеплення”. Свої дослідження він продовжував у створеному в 1966 р. Інституті теоретичної фізики, де очолював відділ теорії ядра, а з 1973 до 1988 рр. був директором інституту та створив наукову школу.

Формування високого рівня роботи в галузі теоретичної фізики у Дніпропетровську було пов'язано з приїздом туди у 1928 р. після закінчення механічного факультету Ленінградського політехнічного інституту та аспірантури Ленінградського фізико-технічного інституту в рамках концепції організації науково-дослідних центрів, запропонованої А.Ф.Іоффе, Бориса Миколайовича Фінкельштейна — учня А.Ф.Іоффе, М.М.Семенова та Я.І.Френкеля.

Про цей етап у своєму житті Б.М.Фінкельштейн згадував: “... закінчився термін аспірантури и за рекомендацією А.Ф.Іоффе, М.М.Семенова та Я.І.Френкеля з кінця 1928 р. починається самостійна наукова, педагогічна та науково-організаційна робота у Дніпропетровську” [304,631].

Б.М.Фінкельштейн обійняв посаду професора Дніпропетровського інституту народної освіти, з 1930 р. працював у фізико-хіміко-математичному інституті, що виділився з ДІНО. У фізичній лабораторії Дніпропетровського гірничого інституту він також очолював теоретичні пошуки, які стосувались з'ясування властивостей розчинів, хімічних властивостей атомів та молекул, статистичної механіки та термодинаміки. Зокрема, ним проводились розрахунки спорідненості з воднем галоїдних розчинів і розроблялась теорія галоїдних розчинів. Подальші

наукові роботи Б.М.Фількенштейна стосувались фізики діелектриків, теорії електролітів, фізичного металознавства, методів досліджень у твердих тілах. Він — піонер досліджень з проблем внутрішнього тертя та ядерного парамагнітного резонансу в металах і сплавах.

Організаторська діяльність Б.М.Фількенштейна (разом з А.Е.Малиновським) втілювалася у створення кафедри теоретичної фізики в Дніпропетровській університеті, а також Дніпропетровської філії Всеукраїнського фізико-технічного інституту (з 1932 р. — Дніпропетровського фізико-технічного інституту), директором якого він був у 1931–1937 рр, одночасно керував теоретичною групою. Навколо Б.М.Фількенштейна згуртувалось ядро теоретиків, до складу якого увійшли М.Юхвець, О.С.Компанієць, О.З.Голик, М.В.Беліков, М.М.Чурсін, А.С.Джидарян, Я.Д.Солок. В університеті він читав лекції з теоретичної фізики, класичної електродинаміки та статистики. Його манера викладання була особливою. “На лекції він завжди приносив портрет того фізика, чії ідеї збирався викладати... Окрім затверджених програмою курсів, на своїх лекціях він розповідав про останні відомості в галузі фізики, тому що був ерудованою людиною, був добре обізнаний з новинками літератури. В нього була блискуча пам’ять. Він кожному міг сказати, в якій літературі добре висвітлено питання, яким займається той чи інший студент... Особливого викладацького дару в нього не було, проте він багато нам дав”, — згадувала доктор фізико-математичних наук, професор Д.С.Каменецька [304,с.54]

Наукова робота співробітників теоретичного відділу була пов’язані з тими дослідженнями, які проводилися в ДФТІ та Дніпропетровському університеті. Так, група Б.М.Фількенштейна запропонувала, наприклад, зручні методи розрахунку нестационарних температурних полів у тілах, що пройшли загартування, термообробку. Це дозволило оцінити величину й розподіл залишкових термонапружень, які виникають у виробках, занурених у охолоджувальне середовище. Зокрема, учень Л.Д.Ландау О.С.Компанієць, який працював у Дніпропетровську близько двох років, розробив тут метод обчислення залишкових напружень у загартованому зразку на основі теорії пластичності.

Одним з учнів Б.М.Фількенштейна, випускником Дніпропетровського університету, був академік АН СРСР І.М.Халатников, який за рекомендацією свого вчителя у 1940 р. склав теоремінімум Ландау. В



подальшому І.М.Халатников тривалий час керував Інститутом теоретичної фізики ім. Л.Д.Ландау АН СРСР у Москві. На жаль, талановиті учні Б.М.Фількенштейна М.М.Чурсін та М.Юхивець загинули під час війни. Коли весною 1937 р. почалася хвиля арештів серед співробітників вузів та інститутів Дніпропетровська, було репресовано учня Б.М.Фількенштейна А.С.Джидаряна, який помер у засланні поблизу Магадана у 1939 р. [304]. Б.М.Фількенштейн як директор ДФТІ також знаходився під загрозою арешту після виходу однієї з типових для того часу статей під назвою “Професор Фінкельштейн замітає сліди”. У ній писалося: “У Фінкельштейна сім років лежить у кармані партійний квиток, але за ці роки професор на набув жодного грама партійності. Він діє не як більшовик, а як безхребетний обиватель, якщо не прямий захисник ворога” [632]. Дійсно, Б.М.Фінкельштейн захищав начальника спецлабораторії інституту і професора університету В.Д.Нескучаєва, а також репресованого у 1937 р. співробітника ДФТІ Давидовича, що приїхав з Харкова і замінив В.Д.Нескучаєва.

Високий науковий рівень робіт інституту починали визнавати і за кордоном. Так, Б.М.Фількенштейн відвідав Англію, інститут теоретичної фізики ім. А.Пуанкаре у Сорбонні, їздив у Париж до П.Ланжевена. Про визнання Дніпропетровська як нового фізичного центру свідчить також те, що Б.М.Фількенштейна як директора ДФТІ було введений Президією АН СРСР до складу групи фізики Відділення математики і природничих наук, у тому ж році він брав участь у березневій сесії АН СРСР, на якій йшлося про стан і перспективи розвитку радянської фізики. А.І.Іоффе з цього приводу писав у 1936 р.: “Виріс ФТІ у Дніпропетровську. Все це не філіали, а спеціалізовані фізичні інститути, пов’язані з місцевою промисловістю, які в галузі своєї спеціалізації є всесоюзними центрами. Такою є галузь низьких температур у Харкові... фазові перетворення у Дніпропетровську” [633].

У післявоєнні роки діяльність Б.М.Фількенштейна була пов’язана з Москвою: з 1944 р. він — начальник відділу теоретичної фізики Інституту металознавства та фізики металів (у складі ДНДІ Чормет), пізніше — професор та завідувач кафедри Московського інституту сталі і сплавів, організатор фізико-хімічного факультету цього інституту.

Слід зазначити, що наприкінці 1944 р. група вчених ДФТІ була переведена до Києва, де було організовано відділ металофізики Інституту чорної металургії АН УРСР, керований академіком НАН України Г.В.Курдюмова. У 1945 р. на базі цього відділу було створено лабораторію металофізики АН УРСР, яка з 1 березня 1955 р. перетворилася на інститут металофізики НАН України (директор — Г.В.Курдюмов). Одним з головних напрямів праць відділу фазових перетворень, керованого Г.В. Курдюмовим, були дослідження механізму й кінетики фазових перетворень при гартуванні і відпуску сплавів, насамперед фазового переходу мартенситу в аутенсит, який виявився зворотним (Г.В.Курдюмов, В.Н.Гріднєв, Е.З.Камінський, Т.І.Стеллецька, І.В.Ісайчев) [634,635].

Член-кореспондент НАН України А.Г.Лесник — один з учнів В.І.Данилова — також працював в Інституті металофізики НАН України, де керував відділом фізики плівок. Його наукові праці присвячені побудові статистичної теорії сплавів та фізиці магнітних явищ [636].

Ще один важливий науковий напрям розроблявся у організованому в 1946 р. відділі дифузії Лабораторії металофізики керованому професором С.Д.Герцрікена, який, починаючи з 1930 р., займався рентгенівськими променями, дифузією металів, виникненням та рухливістю дефектів у керованих ним відділах рентгенівських променів Інституту фізики (пізніше він називався відділом дифузії, потім — металофізики). Започаткована С.Д.Герцрікеном тематика розробляється його учнями і послідовниками (Л.Н.Лариков, В.М. Фальченко) у таких напрямках, як класичні дослідження ґратницевої (об'ємної) дифузії; дослідження параметрів дифузії на стаціонарних межах зерен; дослідження параметрів дифузії на рухомих межах зерен; вивчення параметрів поверхневої дифузії; дослідження аномального масоперенесення за нестационарних умов; дослідження параметрів дифузії у металевих сплавах з нетрадиційними (квазі-, нанокристичною тощо) структурами.

Слід зазначити праці відділу металознавства, очолюваного академіком НАН України В.М.Свечниковим, у яких вивчались фазові рівноваги дво- і трикомпонентних металевих систем з метою відшукування композицій, придатних для високотемпературної експлуатації.

Надзвичайно важливими для розвитку методів статистичної фізики стали роботи теоретичного відділу Інституту металофізики, яким від дня заснування до 1987 р. керував академік НАН України А.А.Смирнов.

А.А.Смирнов народився 16 жовтня 1908 р. у Новгороді (Росія). Після закінчення Ленінградського університету в 1932–1939 рр. працював в Уральському фізико-технічному інституті в Свердловську, в 1939–1949 — Уральському філіалі АН СРСР та вузах Свердловська (з 1944 — професор, у 1945–1947 — декан фізико-математичного факультету Уральського університету), у 1949–1950 — в Інституті фізики, з 1950 р. — очолював теоретичний відділ в Лабораторії металофізики. Водночас у 1950–1957 р. був професором та завідувачем кафедри теоретичної фізики Київського політехнічного інституту, з 1957 до 1962 — професором Київського університету. Після захисту докторської дисертації “Теорія руху електронів у кристалічній решітці сплавів, що впорядковуються” (1946), обирається членом-кореспондентом (1951) та академіком (1967) НАН України, у 1963–1966 рр. працював академіком-секретарем Відділення НАН України, у 1970–1974 — віцепрезидент АН УРСР [344,346,383,384,637].

Великий цикл наукових праць А.А.Смирнова стосується теорії твердого тіла та фазових переходів у недосконалих металічних кристалах. Він розвинув теорії руху електрона в кристалічній ґратці та електронного енергетичного спектру сплавів, що впорядковуються (1947), квантову теорію електроопору металів і сплавів, статистичну теорію впорядкування і дифузії у металах і сплавах, зокрема в сплавах впровадження. Велику увагу А.А.Смирнов та М.О.Кривоглаз приділили розвитку молекулярно-кінетичної та термодинамічної теорії металів та сплавів, вони побудували теорію діркоутворення і дифузії атомів у сплавах, що впорядковуються. [881]. Учнями А.А.Смирнова була розвинута строга статистична теорія високоенергетичних квазічастинок в багатокомпонентних неупорядкованих системах, упорядкованих сплавах та кристалах з дефектами різного типу. На цій основі передбачено нове фізичне явище екстинкції внаслідок розсіяння на викривленнях (В.Б.Молодкін, М.Є.Осиновський, С.І.Олиховський). Провадився також розвиток теорії фазових перетворень (побудовано теорію, в якій враховано взаємний вплив двох кооперативних явищ: спінового впорядкування в антиферромагнітних тілах та атомного впорядкування) (А.А.Смирнов, В.В.Гейченко), побудовано теорію електроопору сплавів, які мають різні дефекти кристалічної будови (А.А.Смирнов, М.О.Кривоглаз, З.А.Матисіна та А.І.Носарь), розроблено метод дослі-

дження форми поверхні Фермі в металах та сплавах (М.О.Кривоглаз та А.А.Смирнов). Нині метою роботи Інституту металофізики є пошук та виявлення принципово нових можливостей та шляхів створення унікальних металевих матеріалів з поліпшеним комплексом фізичних властивостей, які можна використовувати в складних спеціальних умовах, а також розробка на основі цих матеріалів принципово нових засобів сучасної техніки та докорінна перебудова існуючих технологічних процесів та підвищення рівня технологічної культури виробництва. Теоретичні основи фізики металу як конденсованого середовища розробляються в Інституті металофізики у відділі теорії твердого тіла (завідувач член-кореспондент НАН України В.Б.Молодкін), де розвивають теорії систем, що конденсують, передусім твердих тіл з дефектами будови (недосконалих металевих кристалів), кінематичну і динамічну теорії розсіяння, теорії фотонів у кристалах з дефектами, теорії фазових перетворень, структурних змін і дифузії у сплавах впровадження, заміщення і віднімання, а також теоретичні і експериментальні основи нових методів діагностики на пучках синхротронного випромінювання.

Праці відділу теорії неідеальних кристалів (доктор фізико-математичних наук, професор М.А.Іванов), присвячені розвитку теорії кристалів з дефектами, сплавів, впорядкованих систем, інтерметаллідів, аморфних речовин, теорії спектрів елементарних збуджень у реальних кристалах, теоретичних основ методів досліджень недосконалості кристалів і властивостей систем із структурним і динамічним хаосом. У відділі дифузійних процесів (доктор фізико-математичних наук, професор О.А.Шматко) тематика стосується дослідження дифузії і обумовлених нею фізичних процесів у металах і сплавах, що визначають працездатність металевих матеріалів при високих температурах і інших інтенсивних зовнішніх діях. У відділі фазових перетворень (Ю.Н.Коваль), основна увага приділяється вивченню кінематики і механізмів фазових перетворень. Протягом тривалого часу проводяться дослідження оборотної пластичної деформації в сплавах з термоупружним мартенситом; у відділі індуктивних мартенситних перетворень (В.Е. Данильченко). Тут основний науковий напрям — дослідження умов і механізму утворення та розпаду мартенситних фаз у сплавах на основі заліза. У відділі будови і властивостей твердих розчинів (А.І.Устинов) досліджуються зміни атомно-кристалічної структури при фазових перетвореннях

різного типу (старіння, мартенситне перетворення, впорядкування) і вплив їх на фізичні і механічні властивості металевих твердих розчинів, у відділі кристалізації (В.В.Маслов) вивчається атомна структура рідин і фізична природа процесів їх переходу в твердий стан. У відділі фазових рівноваг (доктор технічних наук В.Г.Іванченко), досліджуються фазові рівноваги, структура і властивості багатокомпонентних сплавів на основі титану з метою розробки нових жароміцних і конструкційних матеріалів.

З моменту організації в 1928 р. у Харківському фізико-технічному інституті Іваном Васильовичем Обреїмовим лабораторії кристалів, та криогенної лабораторії Львом Васильовичем Шубніковим і донині значне місце в тематиці Інституту займають дослідження твердого тіла та конденсованого стану речовини, які стосуються фізики низьких температур, електронних властивостей металів, фізики міцності і пластичності. Особливістю робіт цього інституту є поєднання фундаментального підходу з практичною направленістю досліджень, чому сприяє постійна взаємодія експериментаторів та теоретиків. Як зазначав тогочасний директор УФТІ академік Олександр Ілліч Лейпунський, у 1932–1933 рр. одними з основних напрямів, які сформувались у інституті, стали низькі температури, тобто вивчення надпровідності, аномалій теплоємності, магнітних властивостей, питань розділення газів при низьких температурах; фізика кристалів, зокрема питання пластичної деформації, дифузії в сплавах; теоретична фізика [638]. За роки роботи Інституту в галузі низьких температур виконано ряд теоретичних та експериментальних робіт, які значною мірою покладені в основу створення сучасних уявлень про надпровідність, електронні властивості металів, магнетизм, властивості кристалічної ґратки, рідкого гелію, водню та їх ізотопів, низькотемпературної адсорбції.

Одним з напрямів фізичної науки, де знайшли застосування положення та принципи статистичної фізики, стало вивчення основ міцності та пластичності металів і сплавів, які перебувають у різному стані та зазнають механічної, термічної та фізико-хімічної обробки. Основною метою цих досліджень було встановлення закономірностей, що дають змогу створити сплави з наперед заданими властивостями, важливі для багатьох галузей техніки — виробництва реактивних двигунів, газових турбін, ядерних реакторів.

Так, лабораторія кристалів інституту займалась вивченням пластичної деформації. Було доведено, що зсуви в досліджуваних кристалах відсутні, а існує явище двійчастості. В лабораторії В.С.Горським та І.В.Обреїмовим виконувались також роботи з вивчення дифузії у сплавах, які велись паралельно з дослідженнями Брегга в Манчестері. Інша група робіт цієї лабораторії пов'язана з іменами. Це — роботи Важливою стала робота В.С.Горського про пружну взаємодію, яка впливала з розробленої ним теорії дифузії.

Відомо, що більшість матеріалів, металів і сплавів пластично деформуються при незначних напруженнях і що їх практична міцність становить незначну частку міцності, яка відповідає силам міжмолекулярного зчеплення. Саме це розходження між теоретичною та практичною міцностями твердого тіла вказувало на можливість підвищення реальної міцності матеріалів. Тому побудова теорії пластичної деформації кристалів та дослідження процесів, що спричиняють руйнування кристалів, виявились актуальною задачею в галузі фізики твердого тіла.

Так, у 1928 р. І.В.Обреїмов показав, що умови руйнування кристалів треба характеризувати не напруженнями, які спричиняють руйнування, а роботою, що витрачається на відділення однієї частини кристалу від іншої. Розвиток цих досліджень в Українському фізико-технічному інституті у Харкові, де працював І.В.Обреїмов з 1929 до 1938 рр. (у 1929–1932 рр. — директор), допоміг з'ясувати особливості основних механізмів пластичної деформації — процесів двійчастості та утворення смуг ковзання. Вивчення пружної двійчастості вказало на роль концентрації напружень в процесі пластичної деформації і в руйнуванні кристалу, оскільки двійчасті прошарки виникають у перенапружених мікрообластях при незначних прикладених напруженнях, а потім поступово відбувається колективний процес їх поширення на весь кристал. Дослідженням смуг ковзання було встановлено, що в процесі деформації вони також поступово “проростають” через всі перерізи кристала. Проте смуги ковзання мають складну будову, всередині них утворюються тріщини і розриви.

Для розгляду процесу пластичної деформації істотним є дослідження енергії залишкових спотворень у ґратці (тобто роботи, витраченої на створення деформованих областей), яка набагато перевищує енергію залишкових пружних напружень. Слід зазначити, що в цих до-

слідженнях відіграло вирішальну роль застосування низьких температур, коли процеси відновлення кристалічної ґратки практично відсутні. Розглянуті роботи І.В.Обреїмова заклали основу нового теоретичного напрямку в галузі фізики твердого тіла та статистичної фізики — теорію кінетики дислокацій.

З нових напрямів у галузі молекулярної фізики на особливу увагу заслуговують рентгенівські текстури речовин, що характеризують зміну кристалічної будови під час деформацій і холодної обробки. Основне уявлення про рентгенограми як про результат відбиття рентгенових променів від атомних площин у кристалічних ґратках висунув незалежно від Бреґга російський фізик-кристалограф Ю.В.Вульф.

В цей період почали розвиватись ідеї, висунуті Я.І.Френкелем, серед яких особливо плідною виявилася ідея про переміщення вільних місць у заповненому середовищі. Ця ж ідея з успіхом була поширена Я.І.Френкелем на переміщення всередині кристала збуджених станів атомних електронів (екситонів) [639, с.24–37].

Виходячи з уявлень, розвинутих Я.І.Френкелем щодо дифузії і теорії в'язкої течії твердих тіл, Б.Я.Пінесом докладно вивчалася явище повзучості. Було встановлено, що в умовах повзучості уповільнюються процеси спікання та гетеродифузії завдяки тому, що швидше виділяються надлишкові вакансії, які беруть участь у здійсненні процесу дифузії. Процеси, які викликають збільшення концентрації вакансій, неминуче призводять до прискорення дифузійної повзучості (в'язкої течії). Було досліджено вплив холодного наклепу на швидкість повзучості та на довговічність під навантаженням при підвищених температурах відлитих і металокерамічних зразків Сu, Ni, Fe, Al. Закономірності дифузійної повзучості виявились подібними до закономірностей, зумовлених рухом або переповзанням дислокацій, було з'ясовано причину збільшення концентрації вакансій поблизу пор [640–645]. Так, у своїй доповіді на сесії Відділення фізико-математичних і хімічних наук АН УРСР з питань фізики 2–5 лютого 1948 р. професор Б.Я.Пінес виклав теорію утворення компонентів, що входять у сплави при затвердінні у евтектиках з шаруватою структурою, які складаються з пластинчастих утворень.

Принциповими для початку систематичних досліджень у галузі статистичної фізики виявились фундаментальні роботи керівника те-

оретичної відділу УФТІ Д.Д.Ландау, зокрема, створена ним у 1937 р. теорія шаруватого проміжного стану надпровідників у магнітному полі, яка була експериментально підтверджена у тому ж році у Харкові. Найбільш важливе дослідження в цій галузі — це теорія фазових переходів II роду, яку запропонував Л.Д.Ландау. За допомогою цієї теорії з'ясовано природу фазових переходів II роду, показано, що у випадку таких переходів симетрія тіла змінюється стрибком, встановлено критерії існування фазових переходів II роду. Теорія Ландау дозволила з єдиної точки зору розглянути різноманітні явища. Ідеї цієї теорії покладено в основу термодинамічної теорії феромагнетиків, сегнетоелектриків, феноменологічної теорії надпровідності.

Л.Д.Ландау у Харкові також написав перші дві книги свого курсу теоретичної фізики — „Механіку” і першу частину „Статистичної фізики” („Класична статистика”, 1938 р.). Детально про роботи Л.Д.Ландау в УФТІ йдеться у підрозділі 4.2.

З ім'ям учня Л.Д.Ландау, керівника одного з теоретичних відділів Харківського фізико-технічного інституту академіка НАН України І.М.Ліфшиця пов'язаний розвиток сучасної квантової теорії твердого тіла, квантової механіки та статистики (зокрема, дослідження статистичної механіки систем у стані часткової рівноваги, термодинаміки нерівноважних систем), динаміки ґратки, електронної теорії металів, проблеми енергетичного спектра неупорядкованих систем, теорії квантових кристалів та фазових переходів. Його підхід до проблеми упорядкування заснований на статистичному розгляді твердих розчинів. У цій галузі ряд результатів, одержаних І.М.Ліфшицем, пов'язаний з введенням поняття кореляційних функцій для розчину, за допомогою чого побудована статистична термодинаміка рівноважних і нерівноважних станів таких систем. Особливим випадком розчинів є розчин ізотопів, спектр нульових коливань якого було досліджено І.М.Ліфшицем. Виявилось, що при досить низьких температурах настає розшарування таких розчинів. Цей своєрідний ефект є чисто квантовим і тому відсутній в класичній теорії. Слід згадати також дослідження І.М.Ліфшиця з визначення теплових властивостей шаруватих структур. Наявність хвиль, аналогічних хвилям згину в тонких плівках, дає новий закон дисперсії в таких структурах та нову температурну залежність теплоємності їх, що не збігається з дебаївською.



Звичайна постановка задачі статистичної фізики полягає в обчисленні термодинамічних величин, виходячи з відомого енергетичного спектра системи. У Фізико-технічному інституті АН УРСР з'ясована принципова можливість розв'язання оберненої задачі: відновлення енергетичного спектра бозе-системи (зокрема, фононного спектра) за експериментальними значеннями теплоємності. Методи, розвинуті в цих роботах, мають суттєве значення для аналізу інших обернених задач, зокрема, при визначенні потенціалу за даними про розсіяння частинок.

У дослідженнях з динамічної теорії кристалічної ґратки було розроблено метод розв'язання задач механіки кристалічної ґратки і побудовано теорія локальних збуджень, що має суттєве значення для багатьох задач теорії кристалів. За допомогою цих методів була досліджена теорія розсіяння і поглинання інфрачервоних променів у неідеальних кристалах і твердих розчинах, розглянуто питання про розсіяння коротких дебаєвських і електронних хвиль на неоднорідностях ґратки, з'ясовано вплив домішок на спектр коливань і на термодинамічні потенціали кристала. Розроблені методи, крім того, дозволили вивчити особливі поверхневі оптичні хвилі в кристалах. Ці питання розглядалися у працях, присвячених створенню мікроскопічної та макроскопічної теорій явища двійчастості.

У дослідженнях І.М.Ліфшиця з динамічної теорії реальних кристалів, виконаних у 40-ві роки, було вперше показано, що дефекти можуть призводити до перебудови спектра та зміни коливальних станів, у 1945–1952 рр. ним було створено послідовну теорію локальних збуджень реального кристала, побудовано теорію флуктуаційних рівнів. У 1969 р. І.М.Ліфшиць та С.А.Гредескул, використавши флуктуаційний підхід, незалежно від М.О.Кривоглаза (1973 р.) прийшли до уявлення про флуктуони (автолокалізовані на флуктуаціях стани електронів) та розробили їх теорію. Значущими роботами І.М.Ліфшиця та його наукової школи також є пізніші праці з електронної теорії металів.

Один з маловідомих учнів Л.Д.Ландау харківського періоду це професор Веніамін Леонтійович Герман, який з 1936 р. працював в Харківському університеті (пізніше — керівник кафедри теоретичної механіки) та Харківському фізико-технічному інституті (1945 р. — доктор фіз.-мат. наук, з 1946 — професор), з 1962 до 1964 рр. керував відділом

теоретичної фізики Інституту радіофізики та електроніки [392]. Його роботи стосувались фізики твердого тіла, теорії суцільних середовищ, квантової механіки, нелінійної фізики, кавітації, статистичної радіофізики (див. підрозділ 4.2.).

Широкий спектр досліджень зі статистичної радіофізики було проведено у 40–60 рр. ХХ ст. у Харкові, спочатку в Харківському фізико-технічному інституті, а з 1955 р. — в Інституті радіофізики та електроніки. Так, В.Л.Германом, О.Я.Усиковим та І.Х.Ваксером вперше були проведені теоретичні та експериментальні дослідження молекулярного поглинання радіохвиль міліметрового діапазону та їх розсіяння гідрометеоутвореннями (опади, туман). Ці роботи були спрямовані на визначення питомої радіолокаційної відбивної здатності опадів та її спектрального складу, а також на вивчення статистичних характеристик послаблення у гідрометеоутвореннях. Крім цього, були детально вивчені характеристики послаблення радіохвиль міліметрового діапазону у газах атмосфери у лініях поглинання та вікнах прозорості. При цьому знайдено аномальні флуктуації в околі лінії поглинання на хвилі 5 мм. Дані цих багаторічних досліджень дали змогу виробити рекомендації для розробки та експлуатації різних радіоелектронних систем [646–648].

На базі великого циклу експериментальних та теоретичних робіт Ф.Г.Басс, С.Я.Брауде, В. Л. Герман, Е. А. Канер, І.Є.Островський та інші розв'язали задачу про поширення хвиль у випадково неоднорідному середовищі при наявності поверхні розділу. Ця модель найбільш точно описувала поширення радіохвиль та світла в реальній тропосфері при відбитті від поверхні землі з урахуванням випадкових неоднорідностей коефіцієнта заломлення повітря та дозволила всебічно дослідити флуктуаційні характеристики радіосигналів.

Першим, хто звернув увагу на аналогію між рівняннями в теорії дифракції поліхроматичних хвиль, що описують частотну дисперсію, та відомим рівнянням дифузії, був П.В.Бліох, який вказав на можливість стиснення імпульсу в середовищі, яке диспергує. Його праці з дослідження поширення наддовгих радіохвиль у хвилепровідному каналі Земля-іоносфера були спрямовані на вивчення характеру та особливостей флуктуацій амплітуди та фази сигналу в пункті прийому, які обумовлені періодичною зміною па-

раметрів природного хвилепроводу. Так, П.В.Бліохом із співробітниками було передбачено виникнення аномально високих флуктуацій амплітуди та фази при прийомі наддовгохвильових сигналів в областях інтерференційних максимумів середнього поля. Питання багаторічної розробки статистичної моделі хвилепровідного каналу Земля-іоносфера та методики розрахунку статистичних характеристик сигналу було узагальнено в монографії. Особливий інтерес П.В.Бліоха у статистичній теорії дифракції хвиль з сильними фазовими флуктуаціями викликали питання конкуренції механізмів, якими обмежуються «нескінченні» геометрооптичні коефіцієнти посилення при фокусуванні. Так, ним були поставлені та розв'язані задачі про фокусування хвиль у природних “лінзових” утвореннях. За матеріалами досліджень фокусування електромагнітних хвиль гравітаційним полем масивних об'єктів в подальшому було надруковано монографію.

Строгий підхід до обчислення статистичних характеристик флуктуацій фазових фронтів поля хвилі, відбитої складною ціллю, яка є сукупністю великої кількості незалежних точкових відбивачів, було запропоновано та розроблено Є.В.Чаєвським. Цей метод дозволив поглибити розуміння фізичної природи помилок пеленгування та запропонувати ряд методів їх зменшення.

Методи розв'язування задач дифракції електромагнітних хвиль на статистично нерівній та неоднорідній поверхні узагальнені в роботах Ф.Г.Басса та І.М.Фукса. За допомогою комбінації методів збурень та методів фізичної оптики було побудовано модель розсіяння хвиль на поверхнях з широким спектром випадкових неоднорідностей, яка виявилась найбільш адекватній поверхням, які існують в реальних умовах. Внаслідок цього були одержані середні та флуктуаційні характеристики поля, розсіяного подібними поверхнями — коефіцієнти відбиття, індикатриси розсіяння, флуктуації амплітуди і фази, кореляційні функції.

Розглянутий спектр досліджень показує, наскільки широким є коло застосувань статистичної фізики, яке, в свою чергу, здійснює потужний вплив на формування основних уявлень, ідей та методів даної галузі фізичної науки.

В університетах України, зокрема, в Київському, Харківському, Львівському, Одеському, Донецькому університетах, проводились

численні дослідження властивостей конденсованого стану речовини, принципово значущих для становлення статистичної фізики в Україні.

Харківський національний університет, заснований у листопаді 1804 року за ініціативи просвітителя В.Н.Каразіна згідно з грамотою Олександра I, є одним із найстаріших університетів Східної Європи. Його відкриття відбулося 29 січня 1805 року та дало потужний імпульс перетворенню Харкова на великий науковий і культурний центр. Фізичний та фізико-технічний факультети відомі своїми дослідженнями в галузі фізики конденсованих середовищ. Фізичний факультет є одним з найстаріших підрозділів Харківського університету. Тут працювали такі видатні вчені, як лауреат Нобелівської премії Л.Д.Ландау, академіки НАН України І.М.Ліфшиць, М.О.Барабашов, Б.І.Веркін, В.Г.Хоткевич, Е.А.Канер, А.М.Косевич, професори Є.С.Боровик, Б.Я.Пінес, І.М.Шклярєвський, Я.О.Гегузіт. Студентам викладають такі дисципліни спеціалізованого циклу підготовки, як фізика конденсованого стану, теорія твердого тіла, фізика магнітних явищ, надпровідність та квантові рідини.

Фізико-технічний факультет було організовано у 1962 році на базі ядерного відділення фізико-математичного факультету для підготовки спеціалістів у галузі ядерної фізики. Випускники факультету брали активну участь у розробці водневої бомби, атомних електростанцій, пристроїв для термоядерного синтезу. Тут працювали чи працюють академіки НАН України С.В.Пелетмінський та В.Г.Бар'яхтар, членкореспонденти НАН України К.М.Степанов, В.В.Сльозов, В.Т.Толок, І.І.Залюбовський. Читаються курси квантової теорії твердого тіла, фізики плазми. Питаннями фізики конденсованих середовищ займаються перш за все на кафедрі теоретичної ядерної фізики під керуванням академіка С.В.Пелетмінського. Фундаментальні результати було одержано на керованій академіком НАН України І.М.Ліфшицем кафедрі статистичної фізики в напрямі побудови теорії магнітних властивостей металів при низьких температурах, який розроблявся ним та А.М.Косевичем. Було досліджено магнітні властивості тонких металевих плівок при низьких температурах, а також магнітні властивості електронного газу при довільних законах дисперсії. З ім'ям І.М.Ліфшиця пов'язаний також розвиток сучасної квантової теорії твердого тіла, квантової механіки та статистики, зокрема, дослідження статистичної механіки систем у

стані часткової рівноваги, термодинаміки нерівноважних систем.

Слід відзначити дослідження, проведені у Київському університеті. У довоєнний час тут було одержано значущі результати в галузі застосування статистичного підходу до задач фізичної електроніки. Під керуванням професора М.Д.Моргуліса проводилося дослідження катодного розпорошення, що має принципове значення для іонних приладів. Вивчались поріг та адсорбційна рівновага активних моноатомних пльок, присутність яких обумовлює високу електронну емісію і визначає можливість практичного використання катодів у різних приладах. Значну увагу було приділено питанню статистичної теорії явища катодного розпорошення в області великих швидкостей іонів. Дослідження створеної моделі дало можливість М.Д.Моргулісу одержати дані щодо деталей статистичного характеру явища катодного розпорошення та побудови його теорії. На цьому шляху було досліджено питання про поріг розпорошення оксидних катодів, про явища при підвищених швидкостях розпорошуючих іонів в умовах височастотного розряду у водні. Досліди підтвердили наявність розпорошення катоду включно до малих енергій розпорошуючих іонів.

На кафедрі металофізики університету професором С.Д.Герцріке-ном були започатковані дослідження з вивчення рухомості атомів і явищ дифузії у металах і сплавах, впливу різних легуючих домішок на об'ємну, поверхневу та межову дифузію. Було показано, що поведінка металів і сплавів при підвищених температурах значною мірою обумовлена властивостями меж зерен, розроблено метод абсолютного визначення коефіцієнта дифузії за межами і шириною межі.

На кафедрі теоретичної фізики Київського університету розвиток досліджень, значущих для розуміння конденсованого стану речовини, пов'язаний з іменами академіків НАН України С.І.Пекара, О.С.Давидова, А.А.Смирнова, члена-кореспондента НАН України К.Б.Толпиго, професора А.М.Федорченка. У післявоєнний час С.І.Пекаром, який з 1953 до 1960 рр. завідував кафедрою, були закладені основи теорії поляронів, побудовано теорію  $F$ -центрів та інших локальних електронних центрів у іонних і гомеополярних кристалах, теорію домішкового поглинання світла і люмінесценції у цих кристалах (С.І.Пекар, К.Б.Толпиго, О.Ф.Томасевич). Під його керівництвом була також створена теорія додаткових світлових хвиль в області екситонно-

го поглинання, К.Б.Толпиго з учнями розвинув теорію коливань кристалічних ґраток з урахуванням деформації іонів. О.С.Давидовим, який керував кафедрою у 1951–1953 рр., була розвинута квантова теорія екситонів в молекулярних кристалах та передбачено мультиплетне розщеплення молекулярних термів, яке пізніше дістало назву “давидівського розщеплення”.

Необхідність проведення досліджень у галузі рідкого стану, найменш вивченого з трьох агрегатних станів, привела до створення кафедри молекулярної фізики в Київському університеті у 1952 р. Відтоді роботи з фізики рідкого стану є традиційними для Київського університету. Організатором великого колективу вчених, які працювали в галузі фізики рідкого стану речовини, критичних явищ і фазових перетворень, був один з перших учні академіка В.І.Данилова О.З.Голик, який починав працювати в цьому напрямі у Дніпропетровській філії УФТІ [347–349, 386–388]. Дослідження О.З.Голика характеризувались новим підходом до вивчення рідкого стану, що ґрунтується на з’ясуванні властивостей рідин у зв’язку з розглядом їх структури та пошуком закономірностей усередині груп рідин, однорідних за своєї структурою. Всі роботи кафедри молекулярної фізики були тісно пов’язані з проблемами промисловості, об’єктами дослідження виступали органічні рідини та їх розчини, рідкі метали і металеві розчини, розчини електролітів.

Олександр Захарович Голик з 1951 до 1956 рік був ректором Київського університету, у 1952 р. створив та протягом двадцяти п’яти років очолював кафедру молекулярної фізики, у 1958–1962 рр. був деканом фізичного факультету. Вчений народився у селі Мерефа Харківської області. У 1930 р. закінчив Дніпропетровський інститут народної освіти (Університет), де і працював доцентом до 1937 р. Водночас у 1932–1942 рр. був старшим науковим співробітником Дніпропетровського Фізико-технічного інституту НАН України (філіал Харківського фізико—технічного інституту НАН України) та у 1937–1941 рр. керував створеною ним кафедрою фізики Дніпропетровського інституту інженерів залізничного транспорту. Виконані О.З.Голиком у цей період наукові роботи, присвячені в’язкості розчинів електролітів, стали основою його кандидатської дисертації, захищеної у 1937 р. У роки Великої Вітчизняної війни О.З.Голик брав активну участь у евакуації підприємств Дніпропетровська до Магнітогорська, з 1942 до 1946 р. воював

на південно-західному фронті, пройшовши з військами від Донбасу до Будапешта. У повоєнні роки з 1946 по 1951 рр. він — заступник директора Інституту фізичної хімії НАН України, вчений секретар Президії НАН України. В цей час у створеній О.З.Голиком та керованій ним лабораторії молекулярної фізики були виконані дослідження зв'язку в'язкості зі структурою індивідуальних рідин та розчинів, на основі яких у 1950 р. він захистив дисертацію на здобуття вченого ступеня доктора фізико-математичних наук.

З перших днів роботи кафедри молекулярної фізики під керівництвом О.З.Голика було розпочато великий цикл досліджень рівноважних кінетичних властивостей рідин, з 60-х рр. XX ст. — механічних та теплофізичних властивостей полімерів. Наукові праці учнів О.З.Голика (Ю.І.Шиманського, О.В.Чалого, Т.П.Рощиної, І.І.Адаменка, А.Ф.Скришевського, Сисоева В.М., Кузовкова Ю.Г.) стосуються пружних та в'язких властивостей молекулярних рідин та розчинів, теплового руху молекул, критичних явищ в індивідуальних рідинах та розчинах, зокрема, в електролітах, фазових перетворень рідина—пара, структури та реологічних властивостей полімерних матеріалів і аеродисперсних систем [649–656]. Разом з І.І.Адаменком, О.В.Тарасенком та С.Ф.Соколовською О.З.Голик вивчав структуру в'язкості, пружності, електропровідності індивідуальних рідин та розчинів, зокрема, електролітів та полімерів (з П.П.Чолпаном, А.Ф.Скришевським та А.К.Дорошем) Разом із Ю.Ф.Забаштою, М.А.Геніною, А.Я.Фрідман та А.Ф.Скришевським дослідив релаксаційні властивості полімерів, що кристалізуються та створюють волокна. (Працям О.З.Голика присвячено пункт 5.2.7.). У подальшому на кафедрі молекулярної фізики спільно з Об'єднаним інститутом ядерних досліджень (Дубна, Росія) та з інститутом ядерних досліджень НАН України створено новий науковий напрям — нейтронна спектроскопія конденсованих середовищ, у рамках якого досліджено критичні явища в системах полімер—розчинник. Роботи О.З.Голика мали наукове значення для контролю технологічних процесів та продуктів у ряді виробничих циклів, зокрема, сприяли створенню мастильних матеріалів з наперед заданими властивостями.

Слід зазначити, що інтенсивно займаючись науковою роботою, О.З.Голик був також талановитим педагогом і лідером великої наукової школи в галузі фізики рідин, організатором і керівником наукових

колективів. Під його керівництвом було підготовлено та захищено близько 40 кандидатських та докторських дисертацій, У Київському університеті, крім кафедри молекулярної фізики, ним створено наукові лабораторії з дослідження аеродисперсних систем та вивчення механічних властивостей полімерів.

О.З.Голик читав загальні курси фізики на фізичному, хімічному та філософському факультетах. Йому було притаманно в процесі викладання матеріалу робити акцент на методологічних питаннях фізики та її сучасному стані. У період з 1953 до 1979 р. під його керівництвом підготовлено та проведено десять всесоюзних конференцій з фізики рідин, тривалий час вчений керував комісією з координації наукових досліджень рідкого стану речовини при Міністерстві вищих учбових закладів СРСР та був членом науково-технічної ради при цьому міністерстві. Багато часу приділяв науково-видавничій діяльності, працював заступником відповідального редактора “Українського фізичного журналу”, заснував міжвідомчий збірник з фізики рідкого стану і десять років очолював його редколегію.

Учні та колеги завжди характеризували О.З.Голика як сумлінного трудівника, надзвичайно чуйну та щедру людину. За суттєвий внесок у розвиток фізико-математичних наук, а також у підготовку кадрів він одержав у 1966 р. звання Заслуженого діяча науки України. Започаткований вченим науковий напрям розробляли його учні. Так, процеси зародження центрів кристалізації у переохолоджених рідинах вивчав Д.Є.Овсієнко, будову рідин — А.С.Лошко та А.В.Романова, рідкі розчини — А.Ф.Скришевський. І.В.Радченко досліджував розчини, метали та сплави, розвивав модельні дослідження структури рідини. О.В.Чалим були знайдені узагальнені частотні спектри рідин, визначені критичні явища в обмежених системах.

Розглянутий внесок школи В.І.Данилова та генетично пов'язаної з нею дочірньої школи О.З.Голика у науку становить важливу сторінку історії фізики в Україні. Під керівництвом О.З.Голика було сформовано такі наукові напрями, як рентгенографічне дослідження структури рідин та рідких розчинів, вивчення теплофізичних та кінетичних властивостей рідин і рідких розчинів, дослідження фазових перетворень рідина–пара (критичні явища, випаровування, конденсація). Науковий авторитет започаткованого напрямку підтверджує той факт, що для об-



говорення одержаних результатів та планів подальших досліджень кафедру молекулярної фізики Київського університету у 1953, 1955 та 1957 рр. у Києві скликалися всесоюзні наради з фізики рідкого стану. Зокрема, завдяки результатам школи О.З.Голика вивчення задач молекулярної фізики стало традиційним для фізичного факультету Київського університету, і продовжується нині наступними поколіннями вчених. Так, з 1978 до 1988 р. кафедру молекулярної фізики очолював учень О.З.Голика, професор Ю.І.Шиманський, який дослідив густину і рефракцію чистих рідин і розчинів в околі критичної точки, виміряв гравітаційний ефект у сумішах, вивчив кінетику випаровування одиночних крапель води та водних розчинів солей у квазістаціонарних умовах при термостатуванні поверхні розділу рідина–пара, кінетику фазових перетворень аеродисперсних систем, властивості дисперсних композиційних матеріалів, де матрицею є полімер, а диспергованою фазою — високотемпературний надпровідник; реагенти для ліквідації вибухових ситуацій у вугледобувних шихтах та нові органічні льодоутворювальні речовини.

З 1989 р. керівником кафедри і досліджень у галузі фізики рідин і фазових перетворень у них є академік НАН України Л.А.Булавін. Під його керівництвом проводяться оптичні та нейтронні дослідження фазових переходів і критичних явищ у рідинах, розчинах і гетерогенних сполуках, акустична спектроскопія рідких гомогенних та гетерогенних систем у широкому діапазоні термодинамічних параметрів, дослідження рівнянь стану широкого класу рідких систем . рівноважних і кінетичних властивостей біологічних систем, структурно-динамічних властивостей характерних об'єктів рідинного середовища людини методами акустичної та оптичної спектроскопії, термодинамічними методами, властивостей рідин у малих об'ємах, фізичних властивостей композитних полімерів, встановлення природи процесів дифузії іонів у рідких діелектриках, флуктуаційної природи просторових неоднорідностей речовини у гравітаційному полі поблизу критичних точок рідина–пара, рідина–рідина, подвійної критичної точки, встановлення механізмів, що лімітують швидкість випаровування крапель рідини при наявності хімічних реакцій у газовій фазі, побудова моделі хемоконденсації [657,658].

Дослідження зі статистичної фізики у Львівському університеті є традиційними, вони почалися з праць М.Смолуховського з теорії броунівського руху в 1906 р. [220]; надалі вони продовжувалися на кафедрі теоретичної фізики університету, на якій з 1948 до 1959 р. працював професор А.Ю.Глауберман, чії праці стосувалися теорії твердого тіла і статистичної теорії конденсованих систем. З 1959 р. кафедру очолив академік НАН України І.Р.Юхновський, який започаткував дослідження в галузі статистичної теорії систем взаємодіючих частинок. Серед результатів І.Р.Юхновського та його учнів — метод колективних змінних у класичному і квантовому випадках для одночасного коректного врахування коротко- і далекосяжних внесків у термодинамічні та структурні властивості багаточастинкових систем, статистична теорія фазових переходів другого роду, мікроскопічна теорія розчинів електролітів.

Саме успіхи науковців Львівського університету в галузі статистичної фізики під керівництвом І.Р.Юхновського привели до організації у 1969 р. за його ініціативою Львівського відділу статистичної теорії конденсованих станів Інституту теоретичної фізики АН України, який очолив І.Р.Юхновський. Відділ став основою організованого у 1980 р. Львівського відділення Інституту теоретичної фізики НАН України, яким вчений керував до 1990 р., коли став директором створеного на базі даного відділення Інституту фізики конденсованих систем НАН України.

Важливе місце в розвитку молекулярної та статистичної фізики, теорії рідин традиційно займає Одеський (Новоросійський Університет) [222]. У ньому розпочав свою діяльність П.Павлов, який теоретично і експериментально вивчав зв'язки між термодинамічними властивостями дисперсійних систем і ступенем їх дисперсійності, встановив залежність температури топлення від поверхневої енергії твердого тіла, вивчав термодинамічні потенціали хімічних елементів та їх сполук, рівновагу між кристалічною та рідинною фазами, сформулював загальне правило фаз конденсованих систем, досліджував адсорбція і поверхневий натяг на межі позділу двох фаз.

Фізичний факультету Одеського університету було організовано з моменту створення університету у 1865 р. у складі кафедри фізики та фізичної географії і кафедри астрономії. У 1920 р. після реформи вищої школи на базі фізичного і математичного факультетів було

створено фізико-математичний інститут, який у 1921 р. приєднано до Інституту народної освіти. На базі цього інституту організовано фізико-хіміко-математичний інститут, але з 1930 р. після відновлення статусу університету знову організовано фізичний факультет з кафедрами експериментальної фізики, рентгенофізики і теоретичної фізики. У 1936 р. фізичний і математичний факультети були об'єднані у фізико-математичний факультет, з 1960 р. фізичний факультет знову існує самостійно.

Першими викладачами на кафедрі фізики були призначені професор В.І.Лапшин та Ф.Н.Шведов, який пізніше став деканом фізико-математичного факультету, ректором університету. Надзвичайно цікавими є роботи Ф.Н.Шведова з розгляду такої колективної властивості, як пружно-в'язка течія тіл. Він вперше знайшов пружність форми та аномалію в'язкості колоїдних розчинів, яка полягала у тому, що в околі границі плинності ефективна в'язкість різко спадає при зростанні напруження зсуву. Тому Ф.Н.Шведов вважається основоположником фізико-хімічної реології дисперсних систем та високомолекулярних сполук.

22 листопада 1871 р. за пропозицією Ф.Н.Шведова на посаду доцента університету було обрано відомого фізика-теоретика М.О.Умова, який працював в університеті протягом 22 років. Ним було введено поняття про швидкість та направлення руху енергії, про густину енергії в даній точці середовища, про потік енергії та вектор густини цього потоку. М.О.Умов виконав експериментальні дослідження дифузії водних розчинів та розчинності деяких солей, оптичної поляризації у каламутних середовищах, розробив нові прилади — дифузіометр, дифузійний циліндр, дифузійний ареометр.

Виключно важливими є термодинамічні дослідження М.О.Умова. Одержаний ним у 1889 р. загальний вираз термодинамічного потенціалу є яскравою ілюстрацією плідності методу Гіббса у дослідженні властивостей розчинів. М.О.Умов підтримував наукові контакти з європейським вченими, листувався та був особисто знайомий з Г.Кірхгофом, Г.Гельмгольцем, В.Томсоном, В.Віном, М.Планком. Після переїзду М.О.Умова до Москви у 1894 р. його замінив професор Харківського університету М.Д.Пильчиков, який під впливом термодинамічних досліджень М.О.Умова виконав велику працю по застосуванню методів

Гіббса та Дюгема до аналізу питань електрохімії та інших термодинамічних питань.

Теоретичною фізикою в Одеському університеті почали займатись у 1935 р., коли в Одесу на відносно короткий строк приїхав з Німеччини Г.Бек, який здобув освіту та навички наукових досліджень в університетах Німеччини, Австрії та Швейцарії, протягом п'яти років працював першим асистентом В.Гейзенберга в Лейпцизькому університеті. З 1935 до початку 1937 року Г. Бек прочитав в Одеському університеті всі розділи курсу теоретичної фізики. Його лекції занотував Ю.Г.Векштейн, який у подальшому більше ніж сорок років був доцентом кафедри теоретичної фізики. Ці оригінальні конспекти довго були основою викладання теоретичної фізики в Одесі. Г.Бек зумів заохотити до професійної дослідницької роботи в галузі теорії ядра та елементарних частинок декількох із своїх Одеських слухачів і студентів, за цей період його учні встигли підготувати шість робіт з теоретичної фізики, які були опубліковані у наукових виданнях того часу. Серед них були такі відомі науковці, як професори А.Ю.Глауберман, М.М.Альперін, В.В.Маляров, Г.В.Скроцький.

Науковий рівень викладання і досліджень з теоретичної фізики, встановлений Г.Беком, до певної міри зберігався, незважаючи на труднощі воєнних років. На семінарі, який започаткував А.І.Костарев, регулярно реферувалися статті з останніх наукових журналів. Постійним учасником цих семінарів був Ю.А.Цвірко, який працював на кафедрі теоретичної фізики з 1959 до 1962 р. після закінчення аспірантури в Київському університеті під керівництвом професора С.І.Пекара — лідера київської школи фізики твердого тіла. Завдяки цьому на кафедрі сформувався напрям досліджень з теорії твердого тіла, який існує і сьогодні.

Слід також зазначити, що професори А.І.Костарев та В.В.Маляров започаткували у 1961 році всесоюзні одеські симпозиуми з теоретичної фізики, які відтоді проводились кафедрою теоретичної фізики разом з інститутом теоретичної фізики ім. Л.Д.Ландау майже кожні два роки до 1989 року.

Подією, яка мала значний вплив на розвиток теоретичної фізики в Одеському університеті, став перехід до університету восени 1963 року професора Йосипа Залмановича Фішера, якого було обрано на посаду завідуючого кафедрою теоретичної фізики. До цього він пра-

цював професором кафедри ядерної фізики у Мінському університеті. Цікаві спогади про навчання в той період у професора Й.З.Фішера академіка РАН, директора Інституту філософії РАН В.С.Стьопіна: "На другому курсі філософського факультету був обов'язковий предмет — природознавство, який включав основи математики, фізики та біології. І нам пощастило, що фізику філософам читала чудова людина — доцент Й.З.Фішер. Він прекрасно знав теоретичну фізику, але нам читав загальну фізику — доступно і ясно... Для мене те, що стосувалось філософії науки, було особливо цікавим. Взагалі я зрозумів, що, крім філософії, треба вивчати ще й природознавство. І почав вивчати фізику. Мій ентузіазм посилювався після екзамену, на якому Йосип Залманович Фішер не тільки похвалив мене за відповіді, а й порадив перейти на фізфак. Я залишився на філософському, але спитав Й.З.Фішера, чи можна мені ходити на його лекції. Він дозволив. Оформивши у деканаті право на відвідування лекцій та навчання на фізфаку, я почав осягати основи сучасної фізики" [659].

Головні роботи вченого, присвячені теорії класичних та квантових рідин, а саме застосуванню методу кореляційних функцій до вивчення рівноважних властивостей простих рідин, було узагальнено в 1961 р. у монографії "Статистична теорія рідин" [128], яка була видана англійською мовою в 1964 р. у США та Індії. У Одеському університеті Й.З.Фішер проводив дослідження з різних проблем критичного стану речовини, таких як флуктуації, кінетичні та дифузійні процеси, гідростатичний ефект, в'язкість, швидкість звуку. Протягом відносно короткого часу Й.З.Фішер зміг суттєво підвищити рівень наукових досліджень кафедри. Ті, хто працював з Й.З. Фішером, вважали його взірцем творчого ставлення до викладацької професії. Особистий приклад вченого сприяв значному зростанню кваліфікації викладачів кафедри. Й.З.Фішер ініціював численні сучасні навчальні курси в галузі теоретичної фізики, а також систематично діючий семінар, до роботи якого залучались науковці та аспіранти. Підтримувались партнерські стосунки з лабораторіями та дослідницькими центрами різних країнах світу.

Проблеми статистичної теорії рівноважних рідин завжди залишались у центрі уваги професора Й.З.Фішера. Серія його робіт присвячена структурі рідин. Так, було показано, що поведінка структурного фактору рідини суттєво відрізняється від того, щоб вважати його не-

аналітичною функцією. Слід згадати також його роботи щодо поведінки багаточастинкових функцій розподілу в околі критичної точки. Й.З.Фішер вказував, що їх аналіз є важливим, оскільки багато термодинамічних похідних виражаються в термінах даних функцій.

Протягом багатьох років вчений вивчав рівноважні та кінетичні властивості води та водних іонних розчинів. Не менш важливими є його праці в галузі статистичної термодинаміки не повністю визначених систем, з модельним потенціалом, залежним від густини та температури. Ним було показано, що у розбавлених розчинах при низьких температурах, коли існує надплинний стан, можуть виникнути квантові вихрі, він одним з перших звернув увагу на комп'ютерні "експерименти" як потужний засіб дослідження невпорядкованих систем. Завдяки створеній Й.З.Фішером творчій атмосфері кафедри теоретичної фізики його відхід від керівництва у 1978 році внаслідок тяжкої хвороби не позначився на її роботі. Ідеї, побудови і наближення теорії простих рідин, які були відправною точкою і об'єктом удосконалення у багатьох роботах Й.З.Фішера, при застосуванні до них прийомів і методів теорії твердого тіла та квантової статистичної теорії кулонівських систем, привели до створення теорії рівноважних та кінетичних властивостей рідких металів (професор Ю.П.Красний); до розробки методів рахування багаточастинкових взаємодій у кулонівських системах та визначення їх внесків у термодинамічні характеристики рідких металів (професор М.П.Коваленко) з подальшим використанням цих результатів в теорії металевих стекел. Загальні методи теорії систем багатьох частинок разом з теорією гідродинамічних флуктуацій дали змогу розробити ефективні методи дослідження оптичних характеристик та діагностики неідеальної плазми (професор В.М.Адамян, професор І.М.Ткаченко).

Сьогодні на кафедрі, якою керує професор В.М.Адамян, вивчаються такі ключові напрями статистичної фізики та фізики конденсованого стану речовини, як фізика низькотемпературної плазми, критичні явища та фазові переходи, фізика рідин та макромолекул. Наукова тематика кафедри продовжує традиційно концентруватися навколо теорії конденсованих середовищ, зокрема, теорії переохолоджених та сильно в'язких рідин, теорії систем із сильними водневими зв'язками, теорії кулонівських рідин та неідеальної плазми, теорії колективних збуджень в емульсіях та розчинах макромолекул.

Поглибленню досліджень з теоретичної фізики в Одеському університеті у період з 1966 до 1974 р. значно сприяло повернення до Одеси професора Аби Юхимовича Глаубермана, якого ректор А.І.Юрженко запросив очолити науково-дослідницький інститут фізики університету. За короткий час А.Ю.Глауберман розробив переконливе теоретичне обґрунтування результатів традиційних досліджень інституту з електронних процесів в іонних кристалах та з питань наукової фотографії.

Дослідницька робота з фізики проводилась також у Науково-дослідному інституті фізики Одеського університету — першому інституті фізичного профілю в системі освіти України, який був створений 1 червня 1926 р. Зараз інститут є відомим центром у галузі запису оптичної інформації, який представляє Україну в Міжнародному комітеті з науковій фотографії (директор — професор О.В.Тюрін).

З дня заснування інститут разом з кафедрами експериментальної та молекулярної фізики працює над двома проблемами: електронні процеси в кристалах напівпровідників та діелектриків і кристалізація переохолоджених рідин. З середини 40—х рр. ХХ ст. виник третій напрям — дослідження утворення та випадання туманів і вивчення елементарних процесів, які відбуваються при цьому.

Початок вивчення кристалізації переохолоджених рідин було покладено дослідями В.В.Кондогурі 1926 р. з вивчення впливу електричного та магнітного полів на кристалізацію піперину і салолу. Подальша робота в галузі кристалізації переохолоджених рідин проводилась на кафедрі загальної фізики під керівництвом Г.Л.Міхневича. Ця робота була важлива для практики виробництва хімічно чистих речовин, а також для інтенсифікації виробництва цукру та харчових кислот. Так, було встановлено, що в постійному електричному полі температурна крива зміщується у бік значних переохолоджень, відкрито існування другого максимуму на цій кривій. У той же період виконано ряд робіт, присвячених вивченню впливу поверхні скла на кристалізацію в пристінному шарі. Так, у працях Г.Л.Міхневича, Ф.К.Горського, І.Ф.Бровко та Є.М.Овчинникової було проведено мікроскопічне дослідження температурної залежності розподілу центрів в тонкому шарі розплаву на різних віддалях від поверхні скла та впливу на цей розподіл електричного та магнітного полів.

Слід зазначити досліді Г.Л.Міхневича й П.І.Домбровського з впливу механічних коливань на кількість центрів кристалізації в бетолі. Вплив ультразвукових та високочастотних електричних коливань на швидкість зростання центрів вивчали р.Я.Берлага і К.К.Демидов. О.К.Чернюком і пізніше П.І.Домбровським вивчався вплив різних фізичних агентів на в'язкість рідин, зокрема О.К.Чернюк розробив точний диференціальний спосіб вимірювання в'язкості за допомогою аналітичних терезів і вивчив вплив електричного поля.

У післявоєнні роки почалась розробка теорії кристалізації переохолоджених рідин, для чого необхідно було детально вивчити кінетику досліджуваного процесу. Працюючи над цим, Г.Л.Міхневич та його співробітники В.П.Єфімова і В.Г.Заремба відкрили явище релаксації, яке полягає в тому, що під час різкого охолодження на певній стадії процесу і нагрівання після цього до попередньої температури виникає затримка в утворенні центрів кристалізації, що обумовлено, як показали автори, впливом поверхні скла. Аналогічне явище було відкрито для діелектричної проникності (Б.І.Солдатов). Крім того, було встановлено, що для багатьох органічних речовин кількість центрів кристалізації згодом досягає граничного значення, хоча значна частина розплаву ще залишається рідкою. Цей факт показує, що кристалізація відбувається лише на частинках домішок.

Серед теоретичних робіт цього періоду слід зазначити працю Г.Л.Міхневича, в якій він розвинув теорію кінетики утворення центрів кристалізації органічних переохолоджених рідин на частинках твердих домішок, згідно з якою кінетика кристалізації розглядається як перетворення частинок домішок, вкритих кристалічним шаром, у центри кристалізації. Механізм перетворення залежить від розподілу цих частинок за розмірами і від величини критичного розміру, який визначається флуктуаційною теорією, тобто залежить від температури перетворення. Таке уявлення про механізм кристалізації дало змогу розрахувати міжфазну енергію на поверхні розділу кристал-рідина за допомогою невеликої ділянки температурної кривої. Дані теоретичні результати було підтверджено експериментально.

За результатами цих досліджень Г.Л.Міхневич захистив у 1941 р. докторську дисертацію “Експериментальне дослідження кристалізації рідин у тонких шарах”, однак у воєнний час документи було загублено.



Роботу було продовжено після звільнення Одеси, коли Г.Л.Міхневич очолив кафедру загальної фізики та керував нею до 1961 р. У березні 1961 р. він захистив нову докторську дисертацію “Кінетика кристалізації переохолоджених органічних речовин та пересичених розчинів”.

На фізичному факультеті у післявоєнні роки сформувався ще один напрям досліджень під керівництвом професора В.О.Федосєєва, який працював науковим керівником Проблемної науково-дослідної лабораторії аеродисперсних систем, а також у 1963 р. організував кафедру теплофізики. Це напрям: фізика аеродисперсних систем, випаровування крапель, диспергування рідин. Дана тематика була започаткована дослідями В.О.Федосєєва 1934 р., які довели можливість осадження хмари у вигляді дощу при ланцюговому процесі злиття крапель. Надалі проводились дослідження в галузі високо- і низькотемпературних процесів тепломасообміну, конденсації, випаровування та хімічних реакцій в аеродисперсних системах (В.А.Федосєєв, Є.В.Гернет, В.А.Шустов, Г.А.Мохов, К.В.Романов, В.І.Глухов, І.Н.Григоренко, С.М.Контущ, А.І.Полянський). У працях В.О.Федосєєва, Б.О.Манакіна, Б.Б.Кажинського і З.М.Доментіанової з осадження водяного туману було доведено, що впуск у камеру розпиленого розчину хлористого кальцію прискорює седиментацію туману внаслідок коагуляції крапель води і крапель розчину. При цьому виявилось, що умовою взаємної коагуляції є різниця тиску пари над краплями, причому дослідження були проведені для ряду речовин. Встановлено, що поверхнево-інактивні і нелетучі речовини викликають прискорення седиментації туману, при чому це прискорення тим більше, чим вище їх концентрація в розчині і чим більше розчину розпилено в камері. При цьому розпорошення поверхнево-активних речовин не впливає на швидкість седиментації.

Завдяки працям Я.Ю.Корпуна, Б.О.Манакіна і В.О.Федосєєва було одержано рівняння седиментації водяних туманів в обмеженому об'ємі. Б.О.Манакін, В.П.Гречановський і М.З.Доментіанова досліджували осадження пари води з повітря за допомогою штучних ядер конденсації. Вони розробили спосіб осадження вологи з атмосфери за допомогою гігроскопічних ядер конденсації, які утворювались при взаємодії пари соляною кислоти з розпорошеними порошками металів, їх оксидів і карбонатів. В.О.Федосєєв та Л.П.Латоніна досліджували залежність

стійкості аерозолю від його часткової концентрації та встановили, що для аерозолю хлористого алюмінію існує оптимальна концентрація, вище якої число частинок починає зменшуватись внаслідок коагуляції, яка відбувається досить бурхливо.

Водночас В.О.Федосеєв, Д.І.Поліщук і А.І.Полянський вивчали елементарні процеси в аерозолях, зокрема, закономірності випаровування крапель і явища, що їх супроводжують. Ними було встановлено, що при взаємодії крапель, які випаровуються, виникають відштовхувальні сили, значення яких виміряне за допомогою крутильних терезів. Даний результат було використано для створення нового способу розпилювання рідини шляхом розбризкування перегрітої рідини. Такі ж досліди проводились з бензином, толуолом, ксилолом, етиловим спиртом. Виявилось, що характер залежності швидкості випаровування від температури і швидкості потоку такий же, як і для крапель води. Проте у випадку багатофракційних рідин закон Срезневського, не виконується. При підвищенні температури повітря залежність квадрата діаметра краплі від часу наближається до лінійної. До такого ж висновку приводить вивчення випаровування крапель при горінні. Викладені дослідження знайшли практичне застосування. Зокрема, було розроблено новий економічний вигідний метод боротьби із шкідниками сільськогосподарського виробництва завдяки використанню туманів, одержаних при розбризкуванні перегрітої рідини, для обприскування рослин, при якому змочуються обидві сторони листа.

Сьогодні роботи в напрямі вивчення високотемпературних аерозолів та фізики аеродисперсних систем продовжуються в університеті у проблемній науково-дослідній лабораторії фізики аеродисперсних систем (завідувач — професор М.Х.Копит); в напрямі теоретичного дослідження мікронеоднорідних явищ, дуже в'язких рідин з водневими зв'язками розчинів — у науково-дослідній лабораторії теоретичної і молекулярної фізики (завідувач — В.М.Махлайчук); у напрямі вивчення процесів коагуляції і росту конденсованої фази в полум'ях — у науково-дослідній лабораторії фізики і хімії низькотемпературної плазми (завідувач — С.Г.Орловська), у напрямі вивчення поверхневих явищ на міжфазних межах тверде тіло–рідина на кафедрі фізики твердого тіла та твердотільної електроніки (завідувач – В.І.Солошенко), а також в учбово-виробничому центрі (директор — М.А.Гауберман). У цих ко-

лективах досліджуються можливості одержання аерозолів з розчинів електролітів в умовах нерівноважної деформації рідини; транспортування дисперсних систем вихровими кільцями в умовах вільної атмосфери, кінетичні фактори в процесах фазових перетворень; динаміка тепломасопереносу при фазових переходах тверда фаза–рідина–пара при лазерній обробці металів, рівноважні та кінетичні процеси у невпорядкованих гетерогенних рідинних іонізованих системах методами статистичного моделювання, фізика процесів міжфазної взаємодії у плазмі продуктів згоряння, яка містить у собі конденсовану фазу та домішку у газовому середовищі, що легко іонізується. Ці дослідження поширено на область високих температур, що дало можливість досліджувати процеси горіння чистих та твердих палив. Продуктивними виявилися ідеї В.Г.Шевчука про зв'язок параметрів дисперсної системи та різних режимів поширення полум'я — ламінарного, вібраційного, турбулентного. Розвитком цього традиційного для кафедри напряму, але на новому експериментальному та теоретичному рівнях, стали дослідження процесів конденсованої фази при горінні металів (А.В.Флорко), а також роботи з вивчення динаміки систем, які хімічно реагують, поблизу критичних точок. Ці питання є особливо актуальними у зв'язку із чернобильською тематикою, та тісно пов'язані з проблемами теорії катастроф, синергетики, екології, медицини, біології, гео- та астрофізики (Є.Н.Кондратьєв, А.В.Коробко, В.Н.Корнілов).

## ПІСЛЯМОВА

Статистична фізика виникла в середині XIX ст. завдяки перш за все працям з молекулярної фізики, а також спробам вчених пояснити на основі механіки закони термодинаміки (насамперед другий закон). Підґрунтям для розуміння необхідності запровадження ймовірнісних уявлень при формулюванні законів природи стала ідея про те, що макроскопічні властивості, які спостерігаються в реальному досліді, обумовлені мікроскопічними процесами, що розвиваються на атомно-молекулярному рівні.

Результатом синтезу молекулярно-кінетичних та термодинамічних уявлень в середині XIX— на початку XX ст. в працях Дж.Максвелла, Л.Больцмана та Дж.Гіббса, де було встановлено зв'язок між тепловою та механічною формами руху матерії, стало виникнення статистичної фізики як самостійного розділу науки. Для розгляду процесу еволюції статистичної фізики нами запропонована та обґрунтована періодизаційна схема розвитку статистичної фізики.

Поступ світової науки та усвідомлення нових ідей вплинули на процес наукових досліджень в Україні. Проте природничі науки тут почали розвиватися дещо пізніше, ніж в європейських країнах, а саме, у XIX ст. Тому і передісторію статистичної фізики в Україні слід датувати хронологічними межами XIX– початок 30-х років XX ст. Вперше питання пояснення будови матерії в Україні розглядалось в XVII–XVIII ст. викладачами Києво-Могилянської академії, але тільки у XIX ст. систематичні експериментальні роботи з термодинаміки М.Д.Пильчикова та О.П.Грузинцева, з дифузії М.О.Умова, з молекулярної фізики та критичного стану речовини М.П.Авенаріуса, а також перші теоретичні узагальнення ймовірнісних уявлень М.М.Пирогова, М.М.Шиллера, М.Смолуховського та Т.О.Афанасьєвої-Еренфест сприяли осмисленню статистичного підходу та усвідомленню сфери його застосування і започаткували побудову статистичної фізики в Україні.

На початок систематичних досліджень з фізики твердого тіла, статистичної фізиці, ядерної фізики, фізики плазми, магнетизму в Україні значно вплинули в 30-ті рр. ХХ ст. наукова творчість та педагогічна діяльність у Харківському фізико-технічному інституті та в Харківському університеті видатного фізика, засновника теоретичної школи Л.Д.Ландау, особливо його роботи з теорії фазових переходів II роду, теорії плазми, теорії фермі-рідини та статистичної теорії ядра.

Початок історії нерівноважної термодинаміки можна датувати 1931 р., коли вийшли дві праці норвезького фізико-хіміка Л.Онсагера, у яких він намітив єдиний підхід до розгляду нерівноважних процесів. Однак залишалась необхідність розробити загальну точку зору щодо таких процесів, це обумовило низку праць, зокрема, М.М.Боголюбова, М.Борна, Г.Гріна, Дж.Кірквуда, Ж.Івона.

Статистична фізика стала одним із найважливіших розділів сучасної теоретичної фізики значною мірою завдяки результатам М.М.Боголюбова з нерівноважної статистичної механіки класичних систем, особливо його монографії «Проблеми динамічної теорії в статистичній фізиці» 1946 р. Запропонована вченим ідея про ієрархію часів релаксації та ланцюжок рівнянь для функцій розподілу і нині є підґрунтям багатьох сучасних методів статистичної фізики. Фундаментальним внеском у квантову статистичну фізику стали роботи М.М.Боголюбова з теорії конденсації неідеального бозе-газу. Завдяки квазічастинковому тлумаченню явища надплинності, даному теорією Боголюбова 1947 р, було побудовано ясну фізичну картину надплинного стану, систему гідродинамічних рівнянь у всьому діапазоні температур, послідовно описано енергетичний спектр надплинної системи та пояснено співвідношення між надплинними та нормальними станами. Одержані результати виходили за межі розглянутої моделі і стали основою для введення такого важливого поняття, як стійкість взаємодій. Таким чином, теоретичні праці Л.Д.Ландау та М.М.Боголюбова з теорії надплинності разом з експериментальними роботами П.Л.Капіци започаткували фізику квантових рідин.

Важливим напрямом для формування уявлень про конденсований стан матерії є вивчення речовини в рідкому стані. Академік НАН України В.І.Данилов був одним з фундаторів фізики рідкого стану в Україні, він створив велику наукову школу в цій галузі (Дніпропетровський

університеті, Дніпропетровський фізико-технічний інститут, Інституті металофізики НАН України). Його праці з дослідження процесів будови та кристалізації рідин стали теоретичним підґрунтям основного напрямку розвитку фізичного матеріалознавства в Україні — термічної обробки сплавів, зокрема сталі.

Розглянутий спектр досліджень показує, наскільки широким є коло застосувань статистичної фізики, яке, в свою чергу, здійснює потужний вплив на формування основних уявлень, ідей та методів даної галузі фізичної науки.

У подальшому методи статистичної фізики та її застосування в Україні розроблялись передусім у Харкові, Дніпропетровську, Києві, Львові та Одесі, а саме у Харківському та Дніпропетровському фізико-технічних інститутах, Інституті математики, Інституті фізики, Інституті теоретичної фізики, Інституті металофізики, Інституті фізики конденсованих систем, Фізико-технічному інституті низьких температур, Харківському, Київському, Одеському та Львівському університетах, а також у наукових школах академіків НАН України Л.Д.Ландау, В.І.Данилова, М.М.Боголюбова, О.І.Ахієзера, І.М.Ліфшиця, В.Г.Бар'яхтара, О.Г.Ситенка, І.Р.Юхновського, С.В.Пелетмінського, професора О.З.Голика.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гельфер Я.М. История и методология термодинамики и статистической физики. — М.: Высшая школа, 1981. — 536 с.
2. Гельфер Я.М. Законы сохранения. — М.: Наука, 1967. — 263 с.
3. Brush S.G. Kinetic theory. 1. The nature of gases and heat. — N.Y.: Pergamon press, 1965. — 181 p.
4. Brush S.G. Kinetic theory. 2. Irreversible processes. — N.Y.: Pergamon press, 1966. — 243 p.
5. Brush S.G. Kinetic theory: The Chapman-Enskog solution for moderately dense gases. — 1972. — Oxford: Pergamon press. — Vol.3. — 283 p.
6. Brush S.G. The kind of motion we call heat: a history of gases in the XIX century. — Book 1: Physics and the atomists. — Amst. Etc.: North—Holland, 1986. — XIX. — 299 p.
7. Физика XIX—XX вв. в общенаучном и социокультурном контекстах. Физика XIX века. — М.: Наука, 1995. — 280 с.
8. Кузнецова О.В. История обоснования статистической механики. — М.: Наука, 1988. — 184 с.
9. Кузнецова О.В. Атомистические концепции строения вещества в XIX веке. — М.: Наука, 1983. — 160 с.
10. Вдовиченко Н.В. Развитие фундаментальных принципов статистической физики в первой половине XX века. — М.: Наука, 1986. — 159 с.
11. История отечественной математики. В 4-х т. — К. Наук. думка, 1970.
12. Монролл Э. К 100-летию статистической механики // Успехи физ. наук. — 1965. — Т.87. — С.341—347.
13. Базаров И.П. Методологические проблемы статистической физики и термодинамики. — М., 1979. — 87 с.
14. Мякишев Г.Я. От динамики к статистике. — М., 1983. — 64 с.
15. Гухман А.А. Об основаниях термодинамики. — М.: Мир, 1964. — 456 с.
16. Каратеодори К. Об основах термодинамики // В кн.: Развитие современной физики. — М.: Наука, 1964
17. Лавенда Б. Статистическая физика. Вероятностный подход. — М.: Мир, 1999. — 432 с.
18. Климонтович Ю.А. Динамический и статистический методы в теории неравновесных процессов // Труды МИАН СССР. — 1989. — 191. — С.151—161.
19. Бриллюэн Л. Термодинамика, статистика и информация // Успехи физ. наук. — 1962. — 77. — С.338.
20. А.С.Ястржембский. Термодинамика и история ее развития. — М.;Л.: Энергия, 1966. — 667 с.
21. А.О.Маковельский. Древнегреческие атомисты. — Баку, Изд-во АН Азерб.ССР. — 401 с.
22. Рожанский И.Д. История естествознания в эпоху эллинизма и Римской империи. — М.: Наука, 1988. — 448 с.
23. Зубов В.П. Развитие атомистических представлений до начала XIX в. — М.: Наука, 1965. — 371 с.
24. Кузнецов О.В. Атомистическая концепция строения вещества в XIX веке. — М.: Наука, 1983. — 160 с.
25. Кузнецов Б.Г. Очерки физической атомистики XX века. — М.: Наука, 1966. — 192 с.
26. Кедров Б.М. Три аспекта атомистики. — В 3-х кн. — М.: Наука, 1969
27. Трифионов Д.Н. Возникновение и развитие современной атомистики. Физика XX века: Развитие и перспективы. — М.Наука, 1984. — С.93—135.

28. Ахиезер А.И., Степановский Ю.П.. От квантов света до цветных кварков. — К.: Наук. думка, 1993. — 121 с.
29. Ахиезер А.И., Рекало М.П. Элементарные частицы. — М.Наука, 1986. — 256 с.
30. Рабинович А.В., Гапонов-Грехов М.И. Нелинейная физика. Стохастичность и структуры. — Физика XX века: Развитие и перспективы. — М.Наука, 1984. — С.219—280.
31. Лакур П., Апфель Я. Историческая физика. В2—х т. — М.; Л.: ГИЗ, 1929
32. Розенбергер Ф. История физики. В.3—х т. — М.; Л.: ГТТИ, 1934
33. Дорфман Я.Г. Всемирная история физики (с древнейших времен до конца XVIII в.). — М.: Наука, 1974. — 352 с.
34. Дорфман Я.Г. Всемирная история физики (с начала XIX ст. до середины XX века). — М.: Наука, 1979. — 317 с.
35. Кудрявцев П.С. Курс истории физики. — М.: Просвещение, 1982. — 448 с.
36. Спасский Б.И. История физики. В.2—х ч. — М.: Высшая школа, 1977
37. Льюис М. История физики. — М.: Мир, 1970. — 464 с.
38. Лауэ М. История физики. — М.: Гостехиздат, 1956. — 229 с.
39. Таннери П. Исторический очерк развития естествознания в Европе. 1300—1900. — М.; Л.: Гос. Техн.-теор. изд-во, 1934. — 235 с.
40. Тредер Г.Ю. Эволюция основных физических идей. — К.: Наук. думка, 1988. — 368 с.
41. Эйнштейн А., Инфельд Л. Эволюция физики. — Собрание научных трудов. — М.: Наука, 1965—1967. — Т.4. — С.357—543.
42. Кузнецов Б.Г. Развитие физических идей от Галилея до Эйнштейна в свете современной науки. — М.Наука, 1966. — 519 с.
43. Кордун Г.Г. История физики. Короткий курс. — Київ: Вища школа, 1974. — 221 с.
44. Шманько І.І., Золотун А.І. Нариси з історії фізики з елементами краєзнавства. — Ужгород: Мистецька лінія, 2001. — 135 с.
45. Дягилев Ф.М. Из истории физики и жизни ее творцов. — М.: Просвещение, 1986. — 254 с.
46. Ансельм А.И. Очерки развития физической теории в первой трети XX века. — М.: Наука, 1986. — 244 с.
47. Храмов Ю.А. История физики. — К.: Феникс, 2006. — 1176 с.
48. Агабатов Х.А. История физики. — М.: Учпедгиз, 1960. — 208 с.
49. Андриевский К.Н., Шипатов Э.Г. История и методология физики. Ч.1. — Ульяновск, 2000. — 204 с.
50. Акоста В., Кован К., Грэм Б.. Основы современной физики. — М.: Просвещение, 1981. — 495 с.
51. Ахієзер О.І. Еволюція фізичної картини світу. — Київ: Наук. думка, 1973. — 90 с.
52. Ахиезер А.И. Развивающаяся физическая картина мира. — Харьков: ННЦ ХФТИ, 1998. — 338 с.
53. Кузнецов И.В. Избранные труды по методологии физики. — М.Наука, 1975. — 296 с.
54. Артюх А.Т. Категориальный синтез теории. — К.: Наук. думка, 1967. — 154 с.
55. Храмова В.Л. Категориальный синтез теоретического знания. — К.: Наук. думка, 1984. — 295 с.
56. Кузнецов В.И. Проблема универсалий в физическом познании. — К.: Наук. думка, 1987. — 171 с.
57. Гудков Н.А. Идея «великого синтеза» в физике. — К.: Наук. думка, 1990. — 212 с.
58. Физика сегодня и завтра. — Л.: Наука, 1973. — 329 с.
59. Физика XX века: Развитие и перспективы. — М.Наука, 1984. — 331 с.
60. Пікашова Т.Д., Шашкова А.О. — К.: ІЗМН, 1997. — 399 с.
61. Бесов А.М. Історія науки і техніки. — Харків: НТУ «ХПІ», 2005. — 376 с.
62. Философская энциклопедия. — М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1960—1970. — Т.1—5.
63. Философский энциклопедический словарь. — М.: Изд-во «Советская энциклопедия», 1989. — 815 с.
64. Філософський енциклопедичний словник. — К.: Абрис, 2002. — 742 с.
65. Бернал Дж.. Наука в истории общества. — М.: Изд-во иностр. лит., 1956. — 735 с.



66. Поппер К. Логика и рост научного знания. — М.: Прогресс, 1983
67. Лакатос И. Доказательства и опровержения. — М.: Наука, 1967
68. Лакатос И. Фальсификация и методология научно-исследовательских программ. — М.: Медиум, 1995
69. Лакатос И. История науки и ее рациональные конструкции. — Структура и развитие науки. — М.: Прогресс, 1978
70. Фейерабенд П. Ответ на критику. — Структура и развитие науки. — М.: Прогресс, 1978
71. Фейерабенд П. Избранные труды по методологии науки. — М.: Эдиториал УРСС, 1999
72. Койре А. Очерки истории философской мысли. О влиянии философских концепций на развитие теорий. — М., 1985
73. Койре А. От замкнутого мира к бесконечной Вселенной. — М.: Логос, 2001
74. Кун Т. Структура научных революций. — М.: Прогресс, 1975
75. Кун Т. Вторичные размышления о парадигме. — Научные теории: структура и развитие. — М.: Прогресс, 1975
76. Тлумин С. Концептуальные революции в науке. — Структура и развитие науки. — М.: Прогресс, 1978
77. Тлумин С. Человеческое понимание. — М.: Прогресс, 1984
78. Пуанкаре А. О науке. — М.: Наука, 1990. — 736 с.
79. Кузнецов Б.Г. Идеалы современной науки. — М.: Наука, 1983. — 255 с.
80. Александров А.Д. Проблемы науки и позиция ученого. — А.: Наука, 1988. — 510 с.
81. Кирилин В.А. Страницы истории науки и техники. — М.: Наука, 1986. — 511 с.
82. Павленко Ю.В. Цивілізаційні трансформації та фундаментальні зрушення в розвитку природознавства // Наука та наукознавство. — 2004. — №2. — С.80—94.
83. Горохов В.Г. Концепции современного естествознания. — М.: Инфра-М, 2003. — 409 с.
84. Воронов В.К. и др. Основы современного естествознания. — М.: Высш. шк, 1999. — 248 с.
85. Горелов А.А. Концепции современного естествознания. — М.: Центр, 1997. — 208 с.
86. Грушевицкая Т.Г., Садохин А.П. Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ, 2003. — 670 с.
87. Дубнищева Т.Я. Концепции современного естествознания. — Новосибирск: ЮКЭА, 1999. — 832 с.
88. Жигалов Ю.И. Концепции современного естествознания. — М.: Гелиос АРВ, 2002. — 272 с.
89. Канке В.А. Концепции современного естествознания. — М.: Логос, 2003. — 367 с.
90. Карпенков С.Х. Концепции современного естествознания. — М.: Академический проспект, 2003. — 693 с.
91. Лавриненко В.Н. и др. Концепции современного естествознания. — М.: ЮНИТИ—ДАНА, 2003. — 303 с.
92. Басаков М.И. и др. Концепции современного естествознания. — Ростов-н/Д: Феникс, 1997. — 448 с.
93. Найдыш В.М. Концепции современного естествознания. — М.: Гардарики, 2003. — 475 с.
94. Грядовой Д.И. Концепции современного естествознания. — М.: Единство, 2003. — 237 с.
95. Кузнецов В.И., Идлис Г.М., Гутина В.Н. Естествознание. — М.: АГАР, 1996. — 384 с.
96. Павленко Ю.В., Руда С.П., Хорошева С.А., Храмов Ю.О. Природознавство в Україні до початку ХХ ст. в історичному, культурному та освітньому контекстах. — К.: Видавничий дім "Академпериодика", 2001. — 420 с.
97. З історії української науки і техніки: Хрестоматія-посібник. — Київ: Сектор історії освіти, науки і техніки АН Вищої школи України, 1999. — 172 с.
98. Храмов Ю.О. Наукова робота з фізики на Україні до Великої Жовтневої соціалістичної революції // Нариси з історії природознавства і техніки. — 1977. — Вип.23. — С.55—69.
99. Храмов Ю.А. Краткая история развития физики на Украине // Очерки истории естествознания и техники. — 1991. — Вып.39. — С.11—19.
100. Храмов Ю.А. Развитие исследований по физике на Украине в институтах (1926—1976). Ч.1. — Киев, 1978. — (Препринт Ин-та теор. физики)

101. Храмов Ю.А. Развитие исследований по физике на Украине в физических институтах (1926—1976). Ч.2. — Киев, 1978. — (Препринт Ин-та теор. физики)
102. Развитие физики в СССР. — М.: Наука, 1967. — В 2—х кн.
103. Научное сообщество физиков СССР. 1950—1960—гг.: документы, воспоминания, исследования. — СПб.:Изд.—во русской христианской гуманитарной академии, 2005—719 с.
104. Наука і техніка СРСР. 1917—1987. — М.:Наука, 1987. — 759 с.
105. Блохинцев Д.И. Пути развития теоретической физики в СССР // Успехи физических наук. — 1947. — 33. — С.285—293.
106. Йоффе А.Ф. Розвиток радянської фізики. — Досягнення радянських фізиків. Хрестоматія. — К.: Рад.школа, 1950. — С.24—37.
107. Вернадский В.И. О научной работе в Крыму в 1917—1921 гг. // Наука и ее работники. — СПб, 1921. — №1. — С.3—12.
108. Френкель Я.И. Теоретическая физика в СССР за 30 лет // Успехи физических наук. — 1947. — 33. — С.294—317.
109. Пасічник М.В. Розвиток фізики на Україні за 40 років Радянської влади // Укр. фіз. журн. — 1957. — 2. — № 3. — С.197—210.
110. Вальтер А.К., Лазарев Б.Г., Синельников К.Д. Досягнення в галузі фізики на Україні за 40 років Радянської влади // У кн.: Розвиток науки в Українській РСР за 40 років. — К.: Вид.—во АН УРСР, 1957. — С.127—148.
111. Савчук В.С. У истоков Украинской ассоциации физиков (из переписки А.Г.Гольдмана и Г.Г.Де Метца) // Очерки истории естествознания и техники. — 1991. — Вып.39. — С.72—77.
112. Фок В.А. Квантовая физика и философские проблемы // Вопросы философии. — 1971. — № 3
113. Бояринцев В.И. Проблема причинности в физике // Тр. Донецк. Политехн. Ин-та. — 1960. — 57, вып.1. — С.21—39.
114. Нуссенцвейг Х.М. Причинность и дисперсионные соотношения. — М.: Мир, 1976. — 462 с.
115. Спасский Б.И. К истории теоремы Карно // Успехи. физ. наук. — 1969. — 99, вып.2. — С.121.
116. Беллони Л. Заметки о пути, приведшем Э.Ферми к статистике Ферми-Дирака // Успехи физ. наук. — 1982. — 136. — С.167—173.
117. Онсагер Л. и др. Термодинамика необратимых процессов. — М.: ИЛ, 1962
118. Пригожин И. Неравновесная статистическая механика. — М.: Мир, 1964. — 314 с.
119. Смирнов Г.В. Под знаком необратимости. — М., 1977
120. Хайтун С.Д. Механика и необратимость. — М.: Янус, 1996. — 448 с.
121. Зубарев Д.Н. Научное творчество Дж.Гиббса // В кн. Гиббс Дж. Термодинамика, Статистическая механика. — М.:Наука, 1982. — 584 с.
122. Кипнис А.Я. К истории термодинамического учения Гиббса // Вопросы истории естествознания и техники. — 1959, вып.8. — С.127—131.
123. Хайтун С.Д. История парадокса Гиббса. — М., 1986. — 164 с.
124. Гольдберг М.М. Термодинамика Гиббса и генезис ее развития. — М., 1972
125. Гельфер Я.М. и др. Парадокс Гиббса и тождественность частиц в квантовой механике. — М.: Наука, 1975. — 272 с.
126. Базаров И.П. О дополнительности в квантовой механике и статистической физике // История и методология естественных наук. — М.: Изд-во МГУ, 1981. — Вып. XXVI. — С.44—46.
127. Базаров И.П., Толмачов В.В. Ошибки и заблуждения в термодинамике // История и методология естественных наук. — М.: Изд-во МГУ, 1981. — Вып. XXVI. — С.34—43
128. Фишер И.З. Статистическая теория жидкостей. — М.: Физматгиз, 1961. — 280 с.
129. Чандрасекар С. Стохастические проблемы в физике и астрономии. — М.: Изд-во иностр. лит-ры, 1947. — 168 с.
130. Синай Я.Г. Теория фазовых переходов. Строгие результаты. — М.:Наука, 1980. — 207 с.

131. Стенли Г. Фазовые переходы и критические явления. — М.: Мир, 1973. — 424 с.
132. Фльори П. Фазовые переходы // Успехи физ. наук. — 1982. — **138**. — С.129—150.
133. Гуров К.П. Основания кинетической теории. Метод Н.Н.Боголюбова. — М.: Наука, 1966. — 351 с.
134. Ковров В.П., Курбатов А.М. Концепция квазисредних Н.Н.Боголюбова в теории неупорядоченных систем // Тр. МИАН СССР. — 1989. — **191**. — С.89—100.
135. Холево А.С. Вероятностный и статистический аспект квантовой теории. — Ижевск: Ин-т комп. иссл., 2003. — 410 с.
136. Хинчин А.Я. Математические основания статистической механики. — М.; Л.: Гостехтеоретиздат, 1943. — 128 с.
137. Афанасьева-Эренфест Т.А. Итоги кинетической теории // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1931. — **1**. — С.305—313.
138. Компанец А.С. Законы физической статистики. Ударные волны. Сверхплотное вещество. — М.: Наука, 1976. — 140 с.
139. Рабинович М.И. Стохастические автоколебания и турбулентность // Успехи физ. наук. — 1978. — **125**, вып.1. — С.123—168.
140. Мухин Р.Р. К истории развития нелинейной динамики. — В кн.: Научное сообщество физиков СССР. — 1950—1960 гг.: документы, воспоминания, исследования. — СПб: РХГА, 2005. — С.433—470.
141. Шустер Г. Детерминированный хаос. — М.: Мир, 1988. — 240 с.
142. Косевич А.М., Ковалев А.С. Введение в нелинейную физическую механику. — К.: Наук. думка, 1989. — 304 с.
143. Пригожин И. Неравновесная статистическая механика. — М.: Мир, 1964. — 314 с.
144. Пригожин И. От существующего к возникающему. — М.: Наука, 1985. — 327 с.
145. Николис Г., Пригожин И. Самоорганизация в неравновесных системах. — М.: Мир, 1979
146. Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика от тепловых двигателей до диссипативных структур. — М.: Мир, 2002. — 461 с.
147. Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. — М.: Прогресс, 1986. — 462 с.
148. Пригожин И. Конец определенности. Время, хаос и новые законы Природы. — М.: Ижевск: РХД, 2000
149. Глендсдорф П., Пригожин И. Термодинамическая теория структуры, устойчивости и флуктуаций. — М.: Мир, 1973. — 207 с.
150. Пригожин И. Новое открытие времени // Вопросы истории естествознания и техники. — 1989. — №1. — С.3—16.
151. Пригожин И. Постигание реальности // Природа. — 1997. — №4. — С.4—11.
152. Кернер Б.С., Осипов В.В. Самоорганизация в активных распределенных средах // Успехи физ. наук. — 1990. — **160**, вып.9. — С.1—73.
153. Буданов В. Синергетичні стратегії в освіті // Вища освіта України. — 2003. — №2. — С.46—52.
154. Пуанкаре А. О науке. — М.: Наука, 1990. — 736 с.
155. Лоренц Г.А. Статистические идеи в термодинамике. — М.: ГТТИ, 1935. — 192 с.
156. Лоренц Г. Старые и новые проблемы физики. — М.: Наука, 1970. — 372 с.
157. Герц. Из первых лет квантовой физики // Успехи физ. наук. — 1977. — **122**. — С.497—511.
158. Планк М. Единство физической картины мира. — М.: Наука, 1966. — 286 с.
159. Бор Н. Атомная физика и человеческое познание. — М.: Изд-во иностр. лит., 1952. — С.95—114.
160. Борн М. Физика в жизни моего поколения. — М.: Изд-во иностр. лит., 1963. — 535 с.
161. Шредингер Э. Новые пути в физике: Статьи и речи. — М.: Наука, 1971. — 427 с.
162. Дирак П. Эволюция физической картины мира. — В кн. Элементарные частицы. — М.: Наука, 1965. — С.123—139.
163. Дирак П. Воспоминания о необычайной эпохе. — М.: Наука, 1979. — 317 с.
164. Гейзенберг В. Философские проблемы атомной физики. — М.: Изд-во иностр. лит.-ры., 1953. — 117 с.

165. Ланжевен П. Физика за последние 20 лет. — Л.: ВСНХ, 1938. — 261 с.
166. Ланжевен П. Физика прерывности. — Избр. произведения. — М.: ИЛ, 1949. — С.256—257.
167. Вайскопф В. Статистическая теория ядерных реакций. — М.: Изд-во Иностран. лит-ры, 1952
168. Вайскопф В. Физика в XX столетии. — М.: Атомиздат, 1977. — 269 с.
169. Вайскопф В. Как мы выросли вместе с теорией поля // Успехи физ. наук. — 1982. — **138**. — С.455—475.
170. Зоммерфельд А. Пути познания в физике. — М.: Наука, 1973. — 318 с.
171. Де Бройль Л. Революция в физике. — М.: Атомиздат, 1965. — 227 с.
172. Кац М. Вероятность и смежные вопросы в физике. — М.: Мир, 1965. — 407 с.
173. Ахизер А.И., Пелетминский С.В. Методы статистической физики. — М.: Наука, 1977. — 367 с.
174. Каганов М.И., Френкель В.Я. Вехи истории физики твердого тела. — М.: Знание, 1981. — 64 с.
175. Френкель Я.И. На заре новой физики. — Л.: Наука, 1970. — 384 с.
176. Каганов М.И. Микро... и макро... — М.: Знание, 1986. — 64 с.
177. П.А.Капіца. Про надтекучість рідкого гелію—II. Доповідь на загальних зборах Академії наук СРСР у Москві 27 вересня 1943 р. У кн. Досягнення радянських фізиків. Хрестоматія. — К.: Рад. школа, 1950. — 322 с.
178. Гольдман О.Г. Физика на Україні у 10—ту річницю радянської України // Вісник природознавства. — 1927р. — №5—6 (листопад—грудень). — с.257—272.
179. Гольдман О.Г. Наукові праці з фізики радянської України // Укр. фізичні записки — 1928. — **1**. — Зш.3. — С.59—65.
180. Гольдман О.Г. Теми, що розробляються у фізичних лабораторіях України // Укр. фізичні записки. — 1928. — **2**. — Зш.1. — С.67—68.
181. Обзор физики в современном ее состоянии. Вступительная лекция, прочитанная 6—го сентября 1893 г. проф. Голицына Б.Б. // Оттиск из учебных записок Имп.Юрьевского Университета. — 1893. — №3. — 30с.
182. Гольдгаммер Д. Столетие физики. — Санкт-Петербург, 1902. — 16 с.
183. Осиповский Т.Ф. Рассуждения о пользе наук. О пространстве и времени. — Речи, говоренные в торжественном собрании Харьковского университета. Харьков, 1807. — Русские просветители. М., 1966
184. Вальтер А.К., Лазарев Б.Г., Синельников К.Д. Досягнення в галузі фізики на Україні за 40 років радянської влади. — В кн.: Розвиток науки в Українській РСР за 40 років. — К.: Вид—во АН УРСР. — С.127—147.
185. Павленко А.М. Передова роль учених нашої країни в розвитку молекулярної фізики // Вісник АН УРСР. — 1948. — №10(146). — С.73—87
186. Коновалов В.М., Кордун Г.Г. Основні етапи розвитку термодинаміки та вклад вітчизняної науки // Наукові записки КДПІ. — 1956. — Фізико-математична серія. — С.129—154.
187. Коновалов В.М., Кордун Г.Г. Историчний нарис розвитку термодинаміки. — В.кн.: Нариси з історії техніки. — Вип 7. — К.: Вид—во АН УРСР. — 1961. — С.27—43.
188. Хижняк З.І. Києво—Могилянська академія. Историчний нарис. — Київ, Видавничий дім «КМ Академія», 2001. — 20 с.
189. Хижняк З.І., Маньківський В.К. Історія Києво—Могилянської академії. — Київ: Видавничий дім «КМ Академія». 2003. — 184 с.
190. Матеріали до історії Острозької академії (1576—1636). — Археологічна комісія АН УРСР, 1990. — 216 с.
191. Київський політехнічний інститут. Нарис історії (КПІ—100 років). — Київ: Київський політехнічний інститут, 1995. — 320 с.
192. 50 лет харьковскому физико-техническому институту. — К.: Наук. думка, 1978. — 320 с.
193. Харьковский физико—технический институт. — К.: Наук. думка, 1978. — 143 с.

194. Институт металлофизики. — К.: Наук. думка, 1985. — 36 с.
195. Институт полупроводников. — К.: Наук. думка, 1985. — 152 с.
196. Институт проблем материаловедения АН УССР. — К.: Наук. думка, 1985. — 32 с.
197. 40 years of M.M.Bogolyubov institute for theoretical physics of the national academy of science of Ukraine // *Ukrainian Journal of Physics*. — 2006. — **51**. — №1. — P.103—108.
198. Институт радиофизики и электроники им. А.Я.Усикова НАН Украины. 50 лет. — Харьков, ИРЭ НАНУ, 2005. — 612 с.
199. Институт теоретической физики АН УССР. — Киев: Наук. думка, 1986. — 104 с.
200. Загородний. А.Г. 40 лет институту теоретической физики им. Н.Н.Боголюбова Национальной академии наук Украины // *Укр. физ. журн.* — 2006. — **51**. — №1. — С.103—108.
201. Тяньшина А.В. Институт теоретической физики имени А.И.Ахиезера (исторический очерк). — Харьков: Квант, 2006. — 112 с.
202. Объединенный институт ядерных исследований. Дубна, 1956—1981. — Дубна: Объединенный институт ядерных исследований, 1981. — 227 с.
203. Багалеї Д.И., Сумцов М.Ф., Бузескул В.П. Краткий очерк истории Харьковского университета за первые сто лет его существования (1805—1905). — Харьков: Типография Адольфа Дарре, 1906. — 339 с.
204. Харьковский государственный университет им. А.М.Горького за 150 лет. — Харьков, изд-во Харьковского университета, 1955. — 386 с.
205. Физико-математический факультет Харьковского университета за первые 100 лет его существования (1805—1905). — Харьков, 1906
206. Розвиток науки в Київському університеті за 100 років. — Київ, 1935
207. Киевский университет. 1834—1984. — К.: Изд-во Киев. Ун-та, 1984. — 203 с.
208. Історія Київського університету. — К.: Наукова думка, 1959. — 630 с.
209. Наука в Київському національному університеті ім. Тараса Шевченка на зламі тисячоліть. — К.Київ. ун-т, 2002. — 330 с.
210. Нариси історії Київського університету. — К.: Наша культура і наука, 2004. — 439 с.
211. Улітко А.Т. Розвиток математики і механіки на механіко-математичному факультеті Київського університету за 150 років // *Вісник Київ. ун-ту*. — 1983. — Сер.25. — С.3—26.
212. Граціанська Л.М. Математики Київського університету. — К., 1967. — 47 с.
213. До 100—річчя кафедри теоретичної фізики. // *Вісник Київ. ун-ту. Серія Фізика*. — 1976. — №17. — С.122
214. Поляков М.В., Савчук В.С. Класичний університет: еволюція, сучасний стан, перспективи. — К.: Генеза, 2004. — 416 с.
215. Жмудський О.З. Наукові дослідження з фізики у вузах України // *Укр. фіз. журн.* — 1963. — **8**. — №4. — С.405—417.
216. Про розвиток наукових досліджень з фізики в університетах УРСР // *Доповіді АН УРСР*. — 1965. — №5. — С.677—678.
217. Дмитренко Г.В.. Дослідження в галузі фізичних наук в Київському державному університеті за 40 років // *Наук. записки Київ. ун-ту*. — 1959. — **18**, вип 3. — Збірник фізичного факультету. — №10. — С.5—17.
218. Полякова Н.Л. Физика в Харьковском университете от его основания до великой октябрьской социалистической революции // *Труды физического отделения физико-математического факультета Харьковского государственного университета*. — 1955. — **5**. — С.5—50.
219. Физика в Харьковском университете с 1917 по 1930 год // *Труды физического отделения физико-математического факультета Харьковского государственного университета*. — 1955. — **5**. — С.57—62.
220. Сеньків М.Т. Наукові дослідження на фізичному факультеті Львівського університету // *Вісник Льв. ун-ту*. — сер.фіз., хім. і мех—мат. — 1968. — С.3—7.

221. Климишин І.А. Про розвиток фізики у Львівському університеті (до 300—річчя його заснування) // Вісник Льв.ун-ту ім.Івана Франка. Серія фізична. — 1962. — Вип 1 (8). — с.3—9.
222. Кирилов Є.А., Поліщук Д.І., Сюра Т.Я. Фізика в Одеському університеті ім. І.І.Мечнікова // Укрфіз. журн. — 1958. — 3. — №1. — С.3—9.
223. Штрум Л.Я. Теоретична фізика в Київському державному університеті. — В кн.: Розвиток науки в Київському університеті за 100 років. — К.: Вид—во Київ. ун—ту. — 1935. — С.22—33.
224. О.П.Маркевич. Наука і наукові працівники в Київському державному університеті за 112 років його існування. 1834—1946 // Наук. записки Київ. ун—ту. — 1946. — 5, вип.1. — С.9—64.
225. Храмов Ю.О., С.Руда, Ю.Павленко, В.Кучмаренко. Рання історія академії наук України (1918—1921). — Київ: «Манускрипт», 1993. — 248 с.
226. Кульчицький С.В., Павленко Ю.В., Руда С.П., Храмов Ю.О. Історія Національної Академії наук України в суспільно—політичному контексті. 1918—1998. — Київ: «Фенікс», 2000. — 527 с.
227. Історія Академії наук України (1918—1923). Документи і матеріали. — Київ: Наук. Думка, 1993. — 376 с.
228. Баряхтар В.Г., Храмов Ю.А. Исследования по физике в Академии наук Украинской ССР за годы советской власти. 2 // Укр. Физ. журн. — 1987. — 32. — №12. — С.1765—1781.
229. Радовский М. Сессия отделения физико-математических и химических наук Академии наук УССР по вопросам физики // Успехи физ. наук. — 1948. — 25, вып.2. — С.284—291.
230. Науковий щорічник Київ. ун—ту за 1959 р. — К., 1960. — 328 с.
231. Науковий щорічник Київ. ун—ту за 1960 р. — К., 1961. — 263 с.
232. Науковий щорічник Київ. ун—ту за 1957 р. — К., 1958. — 551 с.
233. Науковий щорічник Київ. ун—ту за 1958 р. — К., 1959. — 415 с.
234. Науковий щорічник Київ. ун—ту за 1961 р. — К., 1962. — 248 с.
235. А.Лейпунский. Отчет о работе украинского физико-технического института // Известия Академии наук СССР. — 1937. — № 3. — С.363—377
236. Павленко Ю.В., Ранюк Ю.Н., Храмов Ю.А. Дело «УФТИ». 1935—1938. — Київ: «Фенікс», 1998. — 324 с.
237. Школы в науке. — М.: Наука, 1977. — 523 с.
238. Ланге К.А. Организация управления научными исследованиями. — Л., 1971.
239. Храмов Ю.А. Школы в науке // Вопросы истории естествознания и техники. — 1982. — N3. — С.54—67.
240. Храмов Ю.А. Научный лидер и его характерные черты // Наукоеведение и информатика // 1986. — Вып.27. — С.81—91.
241. Храмов Ю.А. Научные школы в структуре потенциала науки // Научно-технический потенциал: структура, динамика, эффективность. — Киев: Наук. думка, 1987. — 348 с.
242. Храмов Ю.А. Научные школы в физике. — Киев: Наук. думка, 1987. — 400 с.
243. Храмов Ю.А. История формирования и развития физических школ на Украине. — К.: Фенікс, 1991. — 216 с.
244. Френкель Я.И. Кинетическая теория жидкостей. — М.: Изд—во АН СССР, 1945. 592 с.
245. Боголюбов М.М. Лекції з квантової статистики. — К.: Рад.школа, 1949. — 227 с.
246. Боголюбов Н.Н., О некоторых статистических методах в математической физике. — К.: Изд—во АН УССР, 1945 г. — 137 с.
247. Боголюбов Н.Н. Проблемы динамической теории в статистической физике. — М. — Л: Гос. Техн. — Теоретич. изд., 1946. — 119 с.
248. Н.Н.Боголюбов, В.В.Толмачов, Д.В.Ширков. Новый метод в теории сверхпроводимости. — М.: Из-во АН СССР. — 1958. — 128 с.
249. Бардин Дж., Шриффер Дж. Новое в изучении сверхпроводимости. — М.: Физматгиз, 1962. — 171 с.
250. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. М.: Наука, 1964. — 568 с.

251. Данилов В.И. Структура и кристаллизация жидкостей. — К.:Изд-во АН УССР, 1956. — 568 с.
252. Фишер И.З. Статистическая теория жидкостей. — М.: Физматгиз, 1961. — 280 с.
253. Кривоглаз М.А., Смирнов А.А. Теория упорядочивающихся сплавов. — М.: Физматгиз, 1958. — 388 с.
254. Ситенко А.Г. Электромагнитные флуктуации в плазме. — Харьков: Изд-во Харьк. ун-та, 1965. — 184 с.
255. Зоммерфельд А. Термодинамика и статистическая физика. — М.: Изд-во иностран. лит. — 1955. — 479 с.
256. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика. — М.: Наука, 1982. — 608 с.
257. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. Ч.1. (Серия Теоретическая физика, т.5). — М.:Наука, 1976. — 584 с.
258. Куни Ф. Статистическая физика и термодинамика. — М.:Наука, 1981. — 352 с.
259. Балеску р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. — В 2—х т. — М.:Мир, 1978.
260. Хилл Т. Статистическая механика. — М.:ИЛ,1960. — 485 с.
261. Исихара А.. Статистическая физика. — М.:Мир,1973. — 471с.
262. Хуанг К. Статистическая механика. — М.: Мир, 1971. — 520с.
263. Хир К. Статистическая механика, кинетическая теория и стохастические процессы. — М.:Мир, 1976. — 600 с.
264. Радужевич Л.В. Курс статистической физики. — М.: Просвещение, 1966. — 420 с.
265. Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика. — М.: Наука, 1983. — 416 с.
266. Френкель Я.И. Статистическая физика. — М. — Л., Изд-во АН СССР, 1948. — 760 с.
267. Терлецкий Я.П. Статистическая физика. — М.: Высшая школа, 1973. — 280 с.
268. Левич В.Г. Введение в статистическую физику. —М.: ГИТТЛ, 1954. — 528 с.
269. Уленбек Дж., Форд Дж. Лекции по статистической механике. — М.: Мир, 1965. — 307 с.
270. Физический энциклопедический словарь. — М.:Советская энциклопедия, 1966
271. Физический энциклопедический словарь. — М.:Советская энциклопедия, 1983
272. Физическая энциклопедия. — В 5 т. — М., 1994.
273. The encyclopedia of physics, edited by Robert M. Bescanson: New York, 1985
274. 25 years of non—equilibrium statistical mechanics: proceeding of the XIII Sitges Conference, held in Sitges, Barcelona, Spain. — 13-17 June 1994. — Springer—Verlag Berlin—Heidelberg,1995—387 p. — (Lecture notes in Physics, vol.445)
275. Chaos: the interplay between stochastic and deterministic behavior; proceedings of the XXXI Winter School of Theoretical Physics (Karpacz, Poland/ 13—24 February 1995/—Springer, 1995. — 571 p.). — (Lecture notes in Physics, vol.457)
276. Розвиток фізичної науки в Україні 1917—1967. Бібліографічний покажчик. У 3-х частинах. — К.:Наук.думка,1969—1970.
277. Видання Академії наук УРСР (1919—1967). Фізико-технічні та математичні науки. — Київ,1970. — 782 с.
278. История естествознания. Литература, опубликованная в СССР (1948—1975). Библиографический указатель. — М.: Изд-во АН СССР. — 1972—1984.
279. Институт истории естествознания и техники (краткий обзор). — М.: Наука, 1981. — 131 с.
280. Николай Николаевич Боголюбов. — Москва: Изд-во АН СССР, 1959. — 50 с.
281. Борис Иеремиевич Веркин. — К.: Наук.думка, 1989. — 80 с.
282. Александр Сергеевич Давыдов. — К.Наук. думка, 1982. — 55 с.
283. Олексій Григорович Ситенко. — К.Наук.думка, 1997. — 92 с.
284. Ігор Рафаїлович Юхновський . — К. : Наукова думка, 1995. — 84 с.
285. Полак Л.С. Людвиг Больцман. — М.:Наука, 1987
286. Франкфурт У.И., Френк А.М. Джозайя Уиллард Гиббс.1839—1903—М.: Наука, 1964. — 279 с.
287. Хайтун С.Д. Парадокс Гиббса. — М.,Наука, 1983
288. Франкфурт У.И., Лебединский А.В.и др. Гельмгольц. 1821—1894. — М.: Наука, 1966. — 319 с.
289. Бородянский В.М. Сади Карно. — М.:Наука, 1993. — 160 с.
290. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. — М.: Наука, 1989. — 560 с.

291. Быков Г.В. Амедео Авогадро. — М.: 1970. — 184 с.
292. Плагинда А.П. Микола Дмитрович Пильчиков (1857—1908). — Киев, 1983
293. Мороз О.П. Жажда истины (книга о П.Эренфесте). — М.: Знание, 1984. — 1984. — 200 с.
294. Френкель В.Я. Пауль Эренфест. — (1880—1933). — М.: Атомиздат, 1971. — 144 с.
295. Martin J. Klein. The Making of a Theor. Physicist. — North-Holland Physics Publishing. — 330 с.
296. Богдан Верес. Сонячна теорема. (Документальна повість про М.М.Боголюбова). — К.: Дніпро, 1975. — 183 с.
297. Боголюбов А.Н. Н.Н.Боголюбов. Жизнь. Творчество. — Дубна, 1996. — 182 с.
298. Ливанова А.М. Л. Д.Ландау. — М.: Знание, 1978. — 192 с.
299. Ландау-Дробанцева К.Т. Академик Ландау. Как мы жили. — М.: Захаров, 2003. — 284 с.
300. Бессараб М. Я. Ландау. Страницы жизни. — М.: Моск. рабочий, 1978. — 232 с.
301. Каганов М.И. Школа Ландау: что я о ней думаю. — Троицк: Троянт. — 1998. — 368 с.
302. Усиков А.Я. Мгновения жизни. — Киев: Мистецтво, 1990
303. Розвиток науки в західних областях Української РСР за роки радянської влади. 1939—1989. — К.:Наук.дкмка, 1990. — 304 с.
304. Савчук В.С. Нариси з історії фізичних досліджень на Дніпропетровщині (1917—1945): Навч. посібник. — Дніпропетровськ: ДДУ, 1997. — 68 с.
305. Ейнштейн А. Мариан Смолюховский // Собрание научных трудов. — М.:Наука, 1967. — Т.4. — С.36—38, 190—192.
306. Боголюбов Н.Н., Саночник Ю.В. Людвиг Больцман // Успехи физ. наук. — 1957. — **61**, вып.1. — С.7—15.
307. Гольдман А.Г. Михаил Петрович Авенариус и киевская школа экспериментальной физики // Успехи физ. Наук. — 1951. — т.XLIV, вып.4. — С.586—609.
308. Планк М. Дж. Максвелл. — В кн. Дж. Максвелл. Статьи и речи. — М.: Наука, 1968—422 с.
309. Франкфурт У.И. Роль Максвелла в развитии кинетической теории газов. — В кн. Дж. Максвелл. Статьи и речи. — М.: Наука, 1968. — С.369—371.
310. Шушурин С.Ф. Максвелл и статистический метод в физике. — Максвелл и развитие физики XIX—XX веков. — М: Наука, 1985. — С.166—177.
311. Кузнецова О.В. Развитие молекулярно-кинетических идей Максвелла русскими физиками конца XIX—начала XX в. — Максвелл и развитие физики XIX—XX веков. — М: Наука, 1985. — 245 с.
312. Кузнецова О.В. Максвелл и границы применимости II начала термодинамики. — Максвелл и развитие физики XIX—XX веков. — М: Наука, 1985. — С.158—166.
313. Кравец И.Н. Т.Ф.Осиповский—выдающийся русский философ-материалист и естествоиспытатель // Вопросы философии. — 1951. — №5. — С.111—120.
314. Мигулин В.В. А.И.Мандельштам и становление советской физики (к 100—летию со дня рождения) // Природа. — 1979. — №5. — С.44—54.
315. Горелик Г.Е. Эренфест и проблема физического пространства // Исследования по истории механики. — 1983. — С.245—260.
316. Кирпичев М.В. Роль отечественных ученых в развитии учения о подобии // Труды по истории техники. — 1954, вып.7. — М.: Изд-во АН СССР. — С.12—19.
317. Свиридонов М.Н. Развитие понятия энтропии в работах Т.А.Афанасьевой—Эренфест // История и методология естественных наук. — 1971, вып.10. — С.112—129.
318. Косоногов Й.Й. Николай Николаевич Шиллер // Журнал Рус. физ.-хим. об—ва, ч. Физ. — 1911. — **43**. — № 9. — С.445.
319. Габович О. Першовідкривач теплового руху атомів і молекул (до 130—річчя М.Смолюховського) // Вісник НАН України. — 2002. — №5. — С.60—67.
320. Де Метц Г.Г. Памяти Ф.Н. Шведова // В кн.: Физическое обозрение. К., 1906
321. Савчук В.С. Андрей Эдуардович Малиновский // Очерки истории естествознания и техники. — 1989. — Вып.36. — С.124—128.



322. К 80-летию со дня рождения академика Н.Н.Боголюбова // Укр. мат. журн. — 1989. — **41**. — №9. — С.1155
323. Владимиров В.С., Логунов А.А., Новиков С.П. Николай Николаевич Боголюбов. К 80-летию со дня рождения // Успехи. мат. наук. — 1989. — **44**, вып.5. — С.5—12.
324. Амбарцумян В.А., Басов Н.Г., Логунов А.А. Николай Николаевич Боголюбов. К 70-летию со дня рождения // Успехи физ. наук. — 1979. — **128**, вып.4. — С.733—737.
325. Николай Николаевич Боголюбов. К 60-летию со дня рождения // Атомная энергия. — 1969— **27**, вып.2. — С.89—90.
326. Николай Николаевич Боголюбов. К 50—летию со дня рождения // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1959— **37**, вып.2. — С.333—335.
327. Давыдов А.С., Парасюк О.С., Петрина Д.Я. Николай Николаевич Боголюбов. К 70-летию со дня рождения // Укр. физ. журн. — 1979. — **24**—№8. — С.1073—1075.
328. К 80-летию со дня рождения Н.Н.Боголюбова // Теорет. и мат. физика. — 1979— **40**, №2. — С.147—154.
329. Логунов А.А., Владимиров В.С. Николай Николаевич Боголюбов. К 70 -летию со дня рождения // Успехи физ. наук. — 1979. — **128**, вып.4. — С.732—737.
330. Митропольський Ю.А., Бар'яхтар В.Г., Петрина Д.Я.. Творчий вклад академіка М.М.Боголюбова у розвиток математики, нелінійної механіки та теоретичної фізики // Вісник АН УРСР, 1985. — №11. — С.9—21.
331. Покровский А. Дубна: адреса сотрудничества. Беседа с дважды героем Соц. Труда, директором Объединенного института ядерных исследований, академиком Н.Н.Боголюбовым // Правда, 1981. — 24 марта.
332. Секрет академика Н.Н.Боголюбова // Знания та праця. — 1979. — №8. — С.10—11.
333. Кулешов С., Сисакян А. Одной лишь думы власть... (К 70-летию академика Н.Н.Боголюбова) // Комсомольская правда. — 1979. — 21 августа.
334. Лебеденко М. Ученый // Культура и жизнь. — 1967. — №10. — С.34—35.
335. Логунов А.А. Философия нелинейности // Советская Россия. — 1989. — 20 августа.
336. Радунская И. Вблизи абсолютного нуля // Огонек. — 1958. — №19. — С.13.
337. Боголюбов Н.Н. (мл.), Санкович Д.П. Николай Николаевич Боголюбов. Очерк научной деятельности // Физика элементарных частиц и атомного ядра. — 1993. — **24**, вып.5. — С.1224—1293.
338. 60-річчя академіка І.Р.Юхновського // Вісник АН УРСР. — 1985. — №8. — С.110.
339. 70-річчя академіка І.Р.Юхновського // Укр. фіз. журн. — 1985. — **30**. — №8. — С.1273—1274.
340. Сергей Владимирович Пелетминский (к 70-летию со дня рождения) // Электромагнитные явления. — 2001. — **2**—№1(5). — С.149—150.
341. Данилов В.И. Некролог // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1954. — **27**, вып.6. — С.657—659.
342. Данилов В.И. 1902—1954. Некролог // Проблемы металлоредения и физики металлов. — 1955. — Сб.4. — С.7—12.
343. Відкриття меморіальної дошки на честь академіка НАН України В.І.Данилова // Вісник АН УРСР. — 1983. — №6. — С.97
344. 75-летие академика АН УССР А.А.Смирнова // Металлофізика. — 1983. — **5**. — №6. — С.115.
345. 70-річчя академіка АН УРСР А.А.Смирнова. — Вісник АН УРСР. — 1978. — №12. — С.90.
346. Пам'яті А.А.Смирнова // Вісник АН України. — 1993. — №3. — С.110.
347. Голик А.З. К 70-летию со дня рождения // Физика жидкого состояния. — 1976, вып.4. — С.142—144.
348. Голик А.З. К 60-летию со дня рождения // Укр. физ. журн. — 1966. — **11**. — С.349—350.
349. Голик А.З. К 60-летию со дня рождения // Акустический журнал. — 1966. — **12**, вып.4. — С.494—495.
350. Bulavin L.A. Malomuzh N.P. Professor I.Z.Fisherpr's scientific legacy // Journal of Molecular Liquids. — 2001. — **93**. — p.1—3.
351. Воспоминания о Н.Н.Боголюбова. — М.:ОИИЯ, 1994. — 215 с.
353. Воспоминания о А.Д.Ландау. — М.: Наука, 1988. — 352 с.

352. Ахиезер А.И. Очерки и воспоминания. — Харьков: «Факт», 2003. — 431 с.
354. Воспоминания об Олександре Сергеевиче Давыдове (Ответственный редактор В.М.Локтев). — Ин-т теорет. физики НАН України, 2002. — 289 с.
355. Формули життя і творчості академіка Юхновського. Есе, інтерв'ю, хроніка. — Львів, 2000. — 160 с.
356. Спогади про П.Еренфеста // В кн. П.Еренфест. Относительность, кванты, статистика. Сб. статей. — М.:Наука, 1972. — 359 с.
357. Юленбек Г.Е. Воспоминания о профессоре П.Эренфесте // Успехи физ.наук. — 1957. — **LXII**, вып.3. — С.365. — 370.
358. Иоффе А.Ф. Дополнения к «Воспоминаниям о профессоре П.Эренфесте Г.Е.Юленбека» // Усп. физич. — наук. — 1957. — **LXII**, вып.3. — С.371—372.
359. Ахиезер А.И. Воспоминания о Якове Иальиче Френкеле // Физика низких температур. — 1994. — **20**. — №2. — С.194—197.
360. Юхновський І.Р. Вибрані праці. Фізика (передмова І.Мриглод, М.Головко, О.Іванків, М.Козловський, І. Стасюк, М.Токарчук). — Вид-во університету „Львівська політехніка”, 2005. — 858 с.
361. Національна академія наук України. Персональний склад. — 1918—2003. — К.: “Фенікс”, 2003. — 300 с.
362. Храмов Ю.А. Физики. Биографический справочник. — Киев: Наук. думка, 1977. — 509 с.
363. Gray H.J & Alan Isaacs. A New Dictionary of Physics. — Longman Group Limited, 1975. — 619 с.
364. Millar D.&others. Dictionary of Scientists. — Cambridge University Press, 1996. — 378 с.
365. Lewis Pyenson. Notable 20th Century Scientists. — Detroit:MI, 1995
366. Twentieth Century Physics. — Bristol,1995
367. Dictionary of scientific biography. — Scriber, 1970
368. Хто є хто. Довідник. Професори Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут”. — К.: Освіта, 1998. — 155 с.
369. Зайцев Б.П., Кадеєв В.І., Куделко С.М., Мигаль Б.К., Полякова Ю.Б., Посохов С.І. Вихованці Харківського університету. Біобіографічний довідник. — Харків: “Авто—Енергія”, 2004. — 250 с.
370. Почесні члени і доктори Університету Св. Володимира. — К.: Либідь, 2005. — 327 с
371. Биографический словарь деятелей естествознания и техники. — В. 2—х т. — М., 1958—1959.
372. Венгеров С.А. Критико-биографический словарь русских писателей и ученых от начала русской образованности до наших дней. В 2-х т. — М., 1915—1918.
373. Голин Г.М., Фионович С.Р. Классики физической науки (с древнейших времен до начала XX в. ) — М.: Высшая школа, 1989. — 576 с.
374. Соколовская З.К. 400 биографий ученых. — М.: Наука, 1988. — 458 с.
375. Основатели кинетической теории материи. — М. - Л. — ОНТИ, 1937. — 220 с.
376. Второе начало термодинамики. Сб. — М. — Л., 1934
377. Проблемы теоретической физики. Сборник (посвящ. Н.Н.Боголюбову в связи с его 60-летием). — М.: Наука, 1969. — 380 с.
378. Проблемы современной статистической физики. — Сб. науч. тр. — К.: Наук. думка, 1985. — 288 с.
379. Методы Монте-Карло в статистической физике. — Сб. статей. — М.: Мир, 1982. — 400 с.
380. Лагарьков А.Н., Сергеев В.М. Метод молекулярной динамики в статистической физике // Успехи физ. наук. — 1978. — **125**, вып.3. — С.410—448.
381. Н.Н.Боголюбов (мл.), Б.И.Садовников, А.С.Шумовский. Математические методы статистической механики модельных систем. — М.: Наука, 1989. — 295 с.
382. Особова справа академіка НАН України В.І.Данилова // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№2. — Од.зб. — №256.
383. Особова справа академіка НАН України А.А.Смирнова // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№622. — Од.зб. — №34.
384. Особова справа професора А.А.Смирнова // Архів НТУУ “КПІ”. — Ф.Р—308. — Оп.№14. — Од.зб. — №174.

385. Особова справа академіка НАН України О.Г.Ситенка // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№632—А. — Од.зб. — №18.
386. Особова справа академіка НАН України І.М.Лифшиця // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№609—Б. — Од.зб. — №9.
387. Особова справа члена—кореспондента НАН України А.Г.Лесника // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.№631. — Од.зб. — №30.
388. Особова справа професора О.З.Голика // Архів Київського університету. — Спр.№.1978—11.
389. Особова справа професора А.М.Федорченка // Архів Київського університету. — Спр.№.1961—109.
390. Особова справа професора С.Д.Герцікієна // Архів Київського університету. — Спр.№.1994—132.
391. Особова справа професора Ю.І.Шиманського // Архів Київського університету. — Спр.№.1998—135.
392. Особова справа доктора фізико—математичних наук В.А.Германа за 1962—1964 рр. // Архів Інституту радіофізики та електроніки НАН України. — Ф.1—Оп.№2—Л. — Од.зб.№114.
393. Звіт Інституту фізики АН УРСР про роботу за 1947 р. // Архів Президії НАН України. — Ф.251Р. — Оп.2—Од.зб. — № 38.
394. Інститут рукопису ЦНБ НАН України. — Архів Д.А.Граве. — XX. — 137.
395. Архів Президії НАН України // Ф.251Р. — Оп.№2. — Од.зб.№67. — Л. 139—141
396. Архів Президії НАН України // Ф.251Р. — Оп.№12. — Од.зб.№10. — Л.3—4
397. Архів Президії НАН України // Ф.251Р. — Оп.№6. — Од.зб.№7. — Л.138—140
398. Газета «Новое время». — СПб, 1897. — 6 січня // Газетний відділ ЦНБ НАН України
399. Форостяна Нінель Петрівна. Історичні аспекти у вивченні молекулярної фізики в середніх загальноосвітніх навчальних закладах України: Дис... канд. пед. наук: 13.00.02 / Національний педагогічний ун—т ім. М.П.Драгоманова. — К., 2002. — 225 с.
400. Садовий Микола Ілліч. Теоретичні і методичні основи становлення і розвитку фундаментальних ідей дискретності та неперервності в курсі фізики загальноосвітньої школи: Дис... д—ра пед. наук: 13.00.02 / Національний педагогічний ун—т ім. М.П.Драгоманова. — К., 2001. — 516 с.
401. Свиридонов М.Н. Эволюция понятия причинности в физике: Автор. дис. на соиск. уч. степ. канд. физ—мат. наук. — М.: 1974. — 24 с. — В надзаг.: МГУ физ. фак.
402. Эренфест Пауль и Иоффе Абрам Федорович. Научная переписка. 1907—1933г. — Л.,Наука, 1973. — 309 с.
403. R.Balescu. Statistical mechanics // The encyclopedia of physics, edited by Robert M. Bescanson: New York, 1985
404. Физический энциклопедический словарь. — Т.1—5. — М.: Сов. энциклопедия, 1960—1966.
405. Физическая энциклопедия. — Т.1—5. — М. Сов. энциклопедия, 1988 —1999.
406. Климонтович Ю.А. Статистическая физика. — М.: Наука, 1982. — 608 с.
407. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. — Ч.1. (Сер. Теорет. физика. —Т.5). — М.:Наука, 1976. — 584 с.
408. Куни Ф. Статистическая физика и термодинамика. — М.:Наука, 1981. — 351 с.
409. Балеску р. Равновесная и неравновесная статистическая механика. — В 2—х т. — М.:Мир, 1978.
410. Хилл Т. Статистическая механика. — М.:Изд-во иностр. лит.,1960. — 485 с.
411. Исихара А. Статистическая физика. — М.:Мир,1973. — 471 с.
412. Хуанг К. Статистическая механика. — М.: Мир, 1966. — 520с.
413. Хир К. Статистическая механика, кинетическая теория и стохастические процессы. — М.:Мир, 1976. — 600 с.
414. Украинская советская энциклопедия. — Т.10.
415. Радущкевич Л.В. Курс статистической физики. — М.: Просвещение, 1966. — 420 с.
416. Леонтович М.А. Введение в термодинамику. Статистическая физика. — М.:Наука, 1983. — 416 с.
417. Френкель Я.И. Статистическая физика. — М.;Л.: Изд—во АН СССР, 1948. — 760 с.
418. Терлецкий Я.П. Статистическая физика. — М.: Вышш. школа, 1973. — 278 с.

419. Румер Ю.Б., Рывкин М.Ш. Термодинамика. Статистическая физика и кинетика. — М.: Наука, 1972. — 400 с.
420. Левич В.Г. Введение в статистическую физику. — М.: ГИТТЛ, 1954. — 528 с.
421. Уленбек Дж., Форд Дж. Лекции по статистической механике. — М.: Мир, 1965. — 307 с.
422. Дж. Гиббс. Основные принципы статистической механики. — М. — Л., Гостехиздат, 1946. — 203 с.
423. Киттель Ч. Элементарная статистическая физика. — М.: ИЛ, 1960. — 278 с.
424. Лаплас П.С. Изложение системы мира. — Л.: Наука, 1982. — 376 с.
425. Винер Н. Кибернетика и общество. — М.: Изд-во иностр. лит., 1958
426. Боголюбов Н.Н. (мл.), Садовников Б.И., Шумовский А.С. Математические методы статистической механики модельных систем. — М.: Наука, 1989. — 295 с.
427. Краткая философская энциклопедия. — М.: Прогресс, 1994. — 576 с.
428. Новейший философский словарь. — Минск, 1999. — 896 с.
429. Философский словарь. — М.: Республика, 2001. — 719 с.
430. Эйнштейн А. Собрание научных трудов. — Т. I—IV. — М.: Наука, 1965—1967.
431. Пригожин И., Стенгерс И. Время, хаос, квант. М: УРСС, 2003. — 240 с.
432. Гельфер Я.М. Законы сохранения. — М.: Наука, 1967. — 264 с.
433. Минченко А.С. Физика Эйлера // Тр. Ин-та истории естествознания и техники АН СССР. — 1957. — 19. — 221—270.
434. Ломоносов М.В. Полное собрание сочинений. — Т. 1—10. — М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950—1959.
435. Дальтон Д. Сборник работ по атомистике. — М.; Л.: ГНТИХЛ, 1940. — 244 с.
436. Файерштейн М.Г. О роли Авогадро в истории развития учения о молекуле // Тр. Ин-та истории естествознания и техники АН СССР. — 1960. — 31. — С. 3—14.
437. Meger O. Kinetische Theorie der Gase. — Breslau, 1877. — 28 S.
438. Amontn G. // Mém. De l'Acad. Royale des Sciences. — 1702. — P. 155.
439. Gay—Lussac J. // Ann. Chim. Phys. — 1802. — 43. — P. 137—175.
440. Gay—Lussac J. // Ostwald's Klassiker. — Leipzig. — 1902. — № 44.
441. Деларош Ф., Берап Ж. // Ann. Chim. Phys. — 1813. — 85. — P. 72.
442. Philosophical Transactions (4). — 1788. — 78. — P. 43.
443. Biot J. Traité de physique expérimentale et mathématique. — V. 1—4. — Paris, 1816.
444. Gay-Lussac J. Premier Essai pour determiner les variations de temperature queprouvent les gas en changeant de densite, et considérations sur leur capacite pour le chlorique. — Mach E. Die Prinzipien der Wärmelehre. — Leipzig, 1900. — 508 с.
445. Poisson S. // J. l'Ecole Polytechnique. — 1808. — 14. — P. 360.
446. Laplas P. // Ann. Chim. Phys. — 1816. — 3. — P. 238—241.
447. Desormes et Clément // J. Phys., Chim., D'Hist. Nat. Et des Arts. — 1829. — 89. — 321.
448. Дюлонг П. // Ann. Chim. Phys. — 1829. — 12. — P. 113.
449. Дюлонг П., Пти А. // Ann. Chim. Phys. — 1819. — 10. — P. 395.
450. Krönig A. Grundzüge einer Theorie der Gase // Pogg. Annalen. — 1856. — 99. — S. 318.
451. Krönig A. // Ann. Phys. Chem. — 1856. — 99. — S. 315.
452. Maxwell J. Illustrations of the Dynamical Theory of Gases // Phil. Mag. — 1860. — 4. — Ser. 19. — № 124. — P. 19—32; (Рус.перев. Д.К. Максвелл. Пояснения к динамической теории газов // Основатели кинетической теории материи. Под ред. А.К. Тимирязева. — М.; Л.: ГОНТИ, 1937. — С. 183—220.)
453. Maxwell J. On the theory of heat. — London.: Longmans, Green, 1871. — P. 54.
454. Maxwell J. On the dynamical theory of gases // Phil. Mag. — 1866. — 4. — Ser. 32. — № 217. — P. 390—393.
455. Boltzmann L. Ueber die Beziehung zwischen dem zweiten hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie und Wahrscheinlichkeitsrechnung // Wien. Ber. — 1877. — 76. — S. 373

456. Гиббс Дж. У. Основные принципы статистической механики. — М.;Л.:Гостехтеориздат, 1946. — 203 с.
457. Gibbs J. Collected Works. In 2 volumes. — New York: Longmans, Green, 1928
458. Gibbs J. On the fundamental formula of statistical mechanics, with applications to astronomy and thermodynamics // Proc. Amer. Acad. Arts Sci., 1884. — **33**. — P.57—58.
459. Darwin Ch., Fowler R. On the partition of energy // Phil. Mag. — 1922. — **44**. — P.450—479; 823—842.
460. Darwin Ch., Fowler R. // Proc. Cambridge Phil. Soc. — 1922. — **21**. — P.262—273.
461. Фаулер Р., Гуттенгейм Э. Статистическая термодинамика. — М.:Изд-во иностр. лит., 1949. — 612 с.
462. Planck M. // Verhandl. Dtsch. Phys. Ges. — 1900. — **2**. — P.237—245 (// Ann. Phys. — 1901. — **4**. — P.553.)
463. Einstein A. Ueber die von der molekular—kynetischen Theorie der Wärme geordnete Bewegung von in ruhenden Flügigkeiten suspendierten Teilchen // Ann. Phys. — Ser.4. — 1905. — **17**. — S.549.
464. Perrin J. // Comptes Rendus Acad. Sci. Paris. — 1908. — **147**. — P.697—970.
465. Svedberg Th. // Z. Elektrochem. — 1906. — **12**. — S.853—860.
466. Smoluchovski M. von. Zur Kinetischen Theorie der Brownschen Molecularbewegung und der Suspensionen // Ann.Phys. — 1906. — **21**. — S.756—780. (Рус. перевод. К кинетической теории броуновского молекулярного движения и суспензий // Брауновское движение /Под ред.Б.И.Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.133—165).
467. Bose S.N. Plancks Gesetz und Lichtquantenhypothes // Z.Phys. — 1924. — **26**. — P.178 — 181.
468. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. — М.: Наука, 1989. — 567 с.
469. Dirac P.A.M. // Proc. Roy. Soc. (London). A. — 1926. — **112**. — P.661.
470. ĕFermi E. // end. Acc. Lincei. — 1926. — **3(6)**. — P.145—149.
471. Беллони Л. Заметки о пути, приведенном Э.Ферми к статистике Ферми—Дирака // Успехи физ. наук. — 1982. — **136**, вып.1. — С.167—175.
472. Fermi E. // Rend. Accad. Lincei. — 1923. — **32**. — № 2. — p.395—398.
473. Bardeen J, Cooper L., Shriffer J. Microscopic theory of superconductivity // Phys.Rev. — 1957. — **106**. — P.162.
474. Боголюбов Н.Н. О новом методе в теории сверхпроводимости. I. Препринт ОИЯИ ЛТФ Р—94. — Дубна, 1957, октябрь. — 16 с. (То же: //Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1958. — **34**, вып.1 — С.58—73.
475. Feynman R.P. Application of Quantum Mechanics to Liquid Helium // Progress in Low Temperature Physics. — V.1. — Amsterdam: North—Holland, 1955. — P.17—53.
476. Осиповский Т.Ф. О пространстве и времени. — Речи, говоренные в торжественном собрании Харьковского университета 30 августа 1807 года. — Харьков: Типография ун—та, 1807. — С.7
477. Осиповский Т.Ф. Рассуждения о динамической системе Канта. — Речи, говоренные в торжественном собрании Харьковского университета 30 августа 1813 года. — Харьков: Типография ун—та, 1807. — С.3.
478. Кравец И.Н. Т.Ф.Осиповский—выдающийся русский философ—материалист и естествоиспытатель // Вопросы философии. — 1951. — №5. — С.110—120.
479. Сочинения Н.И.Пирогова. — Т.1—2. — Киев: Изд—во Пироговского товарищества, 1916.
480. Столетов А.Г. Собрание сочинений. — Т.1—3. — М.;Л.:Гостехиздат, 1939—1947.
481. Надеждин А.И. Этюды по сравнительной физике. — (Передисловие М.П.Авенариуса) . — Киев, 1886.
482. Авенариус М.П. Об электрических разностях металлов при различных температурах. — С. — Пб, 1866.
483. Авенариус М.П. Об электровозбудительной силе термоэлектрических элементов с точки зрения механической теории тепла // Изв. Киев. ун—та. — 1870. — С.1—5.

484. Avenarius M. Ueber innere latente Wärme // *Ann. Phys.* — 1874. — **227(2)**. — P.303—316.
485. Авенариус М.П. Критическое состояние тел // *Журн. элемент. математики.* — 1884. — **1**. — №5. — С.14.
486. Гольдман А.Г. Михаил Петрович Авенариус и киевская школа экспериментальной физики // *Успехи физ. наук.* — 1951. — **44**, вып.4. — С.586—609.
487. Avenarius M. Volumveränderung einer Flüssigkeit durch Temperatur und Druck // *Bulletin de l'Acad. Imp. des sc. de St. Petersburg.* — **24**. — 1877. — С. 525 — 533.
488. ӘАвенариус М.П. Расширение жидкости. — Киев, 1877. — 11 с.
489. Зайончевский В.И. Определение упругости паров некоторых жидкостей при высоких температурах // *Изв. Киев. ун-та.* — **3**. — 1878. — №4. — С.21—49; №8. — С.29.
490. Малков М.П, Павлов К.Ф. Справочник по глубокому охлаждению. — М.:Гостехиздат, 1947. — 411 с.
491. Кей Д., Лэби Т. Справочник физика—экспериментатора. — Москва, 1949. — 299 с.
492. Страус О.Е. О критической температуре и критическом давлении воды // *Журн. Рус. физ.- хим. Об-ва. Ч. Физ.* — 1882. — **14**. — С.510—517.
493. Nadéjdine A. La détermination de la température critique dans les tubes opaques // *Bulletin de l'Acad. Imp. des sc. de St. Petersburg.* — 1886. — **30**. — №5. — P.327—330.
494. Надеждин А.И. К вопросу о температуре абсолютного кипения // *Журн. Рус. физ. — хим. об—ва. Ч. Физ.* — 1883. — **14**. — С.157—162.
495. Надеждин А.И. К вопросу о критической температуре изомеров и гомологических рядов // *Журн. Рус. физ.-хим. об-ва. ч. физ.* — 1883. — **15**. — С.25—30.
496. Надеждин А.И. Несколько слов по поводу статьи г. Павлевского “Ueber die kritischen Temperaturen einiger Flüssigkeiten” // *Журн. Рус. физ. — хим. об—ва. Ч.Физ.* — 1884. — **16**. — С.74—75.
497. Надеждин А.И. О теплоемкости жидкостей // *Журн. Рус. физ.- хим. об-ва. Ч. Физ.* — 1884. — **16**. — С.222—237.
498. Листування О.Г.Столетова // *Архів бібліотеки ім.О.Г.Столетова Фізичного інституту Московського університету*
499. Надеждин А.И. Физические исследования. — Киев, 1887
500. Авенариус М.П. // *Журн. Рус. физ. - хим. об-ва. Ч. Физ.* — 1884. — **16**. — С.402—403.
501. Де Метц Г.Г. Памяти Ф.Н.Шведова. — Физическое обозрение. — Киев, 1906
502. Умов Н.А. Избранные сочинения. — М.;А.: Гостехиздат, 1950. — 553 с.
503. Умов Н.А. Диффузия водного раствора поваренной соли // *Записки Новороссийского общества естествоиспытателей.* — 1888. — **14**, вып.1. — С.1
504. Грузинцев А.П. О двойном лучепреломлении в связи со светорассеянием // *Сообщ. Харьк. мат. об—ва. Сер.2.* — 1882, вып.1. — Приложения. — С.3—82.
505. Физико-математический факультет Харьковского университета за первые сто лет существования (1805—1905) / Под ред. И.П. Осипова, Д.И. Багалия. — Харьков: Изд. Харьков. ун—та, 1908 — 248 с.
506. Глебова А.М. Наукова та педагогічна діяльність О.П.Грузинцева // *Нариси з історії природознавства і техніки.* — 2005. — Вип.45. — С.20—38.
507. Измайлов Н.А. Академик Н.Н.Бекетов—основоположник физической химии // *Успехи химии.* — 1952. — **21**, вып.8. — С.996—1011.
508. Андреасов Л.М. Жизнь и деятельность профессора И.П.Осипова // *Тр. науч. - исслед. Ин-та химии и химич. фак-та Харьк. ун—та.* — 1954. — **11**. — С.261—265.
509. Смолуховский М. Средний путь газовых молекул и его связь с теорией диффузии // Брауновское движение / Под ред.Б.И.Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.117—132. (M.Smoluchovski // *Bull. intern. de l'Ac.de Scienc. de Cracovie.* — 1906. — P.202)
510. Смолуховский М. К кинетической теории броуновского молекулярного движения и суспензий // Брауновское движение/Под ред.Б.И.Давыдова. — Л.:ОНТИ, 1936. — С.133—165 (M.v.Smoluchovski // *Ann.d.Phys.* — 1906. — Bd.21. — S.756—780)

511. Смолуховский М. (биография) // Брауновское движение / Под ред. Б.И. Давыдова. — Л.: ОНТИ, 1936. — С. 417—418.
512. R. Brown // Pogg. Ann. — 1828. — **14**. — S. 294
513. Эйнштейн А. О движении взвешенных в покоящейся жидкости частиц, требуемом молекулярно—кинетической теорией теплоты. — Собрание научных трудов. — Т. 3. — М.: Наука, 1966. — С. 108—117. (A. Einstein // Ann. Phys. — 1905. — **17**. — S. 549—560.)
514. Эйнштейн А. К теории броуновского движения // Собрание научных трудов. — Т. 3. — М.: Наука, 1966. — С. 118—127. (A. Einstein // Ann. Phys. — 1906. — **19**. — S. 371—381.)
513. Смолуховский М. Доступные наблюдению молекулярные явления, противоречащие обычной термодинамике (доклад на съезде в Мюнстере в 1912 г.) // Брауновское движение / Под ред. Б.И. Давыдова. — Л.: ОНТИ, 1936. — С. 166—198. (M. Smoluchowski // Z. Phys. — 1912. — **13**. — S. 1069—1079.)
516. Смолуховский М. Три доклада о диффузии, броуновском молекулярном движении и коагуляции коллоидных частиц (доклады сделаны в Геттингене 20—22 июня 1916 г.) // Брауновское движение / Под ред. Б.И. Давыдова. — Л.: ОНТИ, 1936. — С. 332—416. (M. Smoluchowski // Z. Phys. — 1916. — **17**. — S. 557—571, 585—599.)
517. Смолуховский М. Границы применимости второго начала теории теплоты (доклад в Геттингене в 1913 г.) // Брауновское движение / Под ред. Б.И. Давыдова. — Л.: ОНТИ, 1936. — С. 199—204. (M. Smoluchowski // Z. Phys. — 1913. — **14**. — S. 261—262.)
518. Смолуховский М. Молекулярная статистика эмульсий и ее связь с броуновским движением // Брауновское движение / Под ред. Б.И. Давыдова. — Л.: ОНТИ, 1936. — С. 226—255. (M. Smoluchowski // Sitz. — Ber. Ak. d. Wissensch. Wien (II a). — 1914. — **123**. — S. 2381—2405.)
519. Смолуховский М. Несколько примеров броуновского молекулярного движения под действием внешних сил // Брауновское движение / Под ред. Б.И. Давыдова. — Л.: ОНТИ, 1936. — С. 205—225. (M. Smoluchowski // Bull. intern. de l'Ac. de Scienc. de Cracovie (A). — 1913. — P. 418—434.)
520. Смолуховский М. Броуновское молекулярное движение под действием внешних сил и его связь с обобщенным уравнением диффузии // Брауновское движение / Под ред. Б.И. Давыдова. — Л.: ОНТИ, 1936. — С. 319—331. (M. Smoluchowski // Ann. Phys. — 1915. — **48**. — S. 1103—1112.)
521. Косоногов И.И. Николай Николаевич Шиллер (биографический очерк) // Журн. Рус. физ. — хим. об—ва. Ч. физ. — 1911. — **43**, вып. 9
522. Шиллер Н.Н. О втором законе термодинамики и об одной его новой формулировке // Отчеты и протоколы физ. — мат. об—ва при ун-те Св. Владимира. — 1897. — С. 1
523. Шиллер Н.Н. Основные законы термодинамики. — Обзоры заседаний секции физики на XI съезде русских естествоиспытателей и врачей. — Киев, 1903. — С. 195.
524. Шиллер Н.Н. Конспект по термодинамике. Литографированное издание. — Харьков, 1905
525. Шиллер Н.Н. Замечания о втором законе термодинамики. — М., 1910. — Отд. оттиск.
526. Шиллер Н.Н. Отчеты и протоколы физ.-мат. об—ва при ун-те Св. Владимира. — 1899. — с. 8.
527. P. Ehrenfest, T. Afanassjeva—Ehrenfest. Begriffliche Grundlagen der statistischen Auffassung in der Mechanik // Encyklopadie der mathematischen Wissenschaften. — **4**. — P. 32. — Leipzig, 1911. — S. 3—90.
528. Афанасьева—Эренфест Т.А. // Журн. Рус. физ. — хим. об—ва. Ч. физ. — 1908. — **40**, вып. 8. — С. 277.
529. Афанасьева—Эренфест Т.А. Необратимость, односторонность и II начало термодинамики // Журн. прикл. физики. — 1928. — **5**, вып. 3—4. — С. 3—30.
530. Пирогов Н.Н. Применимость II начала термодинамики к системам, на которые действуют внешние силы // Журн. Рус. физ. — хим. об—ва. Ч. физ. — 1887. — **19**, вып. 4. — С. 100—120.
531. Пирогов Н.Н. // Журн. Рус. физ.-хим. об—ва. Ч. физ. — 1887. — **19**, вып. 5. — С. 157—176.
532. Пирогов Н.Н. О законе Больцмана // Журн. Рус. физ.-хим. об—ва. Ч. физ. — 1890. — **22**. — С. 44.

533. Пирогов Н.Н. Основание термодинамики // Журн. Рус. физ. — хим. об—ва. Ч. Физ. — 1890. — 22, вып.5. — С.173
534. Ursell H.D. // Proc.Combridge Phil. Soc. — 1928. —23. — P.685.
535. Mayer J.E. // Journ.Chem.Phis. — 1937. — 5. — P.67.
536. Yvon J. La Theorie Statistique des Fluides et l'Equation d'Etat // Adualites scientifiques et industrielles. — NO.203. — Paris,1935.
537. Yvon J. Fluctuations en Densite. — Paris,1937.
538. Born M., Green H.S. // Proc. Roy. Soc.(London). — 1946. — A188. — P.19; 1947. — A189. — P.103; 1947. — A190. — P.445; 1947. — A191. — P.168, // 1948. — A192. — P.166.
539. Born M.,Green H.S. A General Kinetic Theory of Liques. — Cambridge,1949.
540. Kirkwood J.G. The statistical mechanical theory of transport processes // Journ. Chem. Phys. — 1941. — 9. — P.514; Journ. Chem. Phys. — 1942. — 10. — P.394; Journ. Chem. Phys. — 1946. — 14. — P.180—201.; Journ. Chem. Phys. — 1947. — 15. — P.71—91.
541. Боголюбов Н.Н. Проблемы динамической теории в статистической физике. — М. - Л.: Гос. Техн. — теоретич. изд-во, 1946. — 119 с.
542. Mayer J.G. // Journ.Chem.Phis. — 1947. —15. — P.187.
543. Крылов Н.С. Работы по обоснованию статистической физики. — М. - Л.Изд—во АН СССР, 1950. — 208 с.
544. Onsager L. // Phys.Rev. — 1931. — 37. — №4. — P.405; 1931. — 38. — №12. — P.2265.
545. Casimir H.B.G. // Rev. Mod. Phys. — 1945. — 17. — P.343
546. Casimir H.B.G. // Philips Res. Rep. — 1945. — 1. — P.185
547. Meixner J. // Ann. Phys. — 1941. — 39. — P.333; 1942. — 41. — P.409; 1943. — 43. — P.244.
548. Meixner J. // Z. Phys.Chem. — 1943. — B53. — S.235.
549. Prigogine I. Etude thermodynamique des phénomènes irréversibles. — Liég: Desoer, 1947. — 148 с.
550. Ахиезер А.И. Учитель и друг // Воспоминания о Л.Д. Ландау. — М.:Наука, 1988. — 352 с.
551. Гинзбург В.Л. Замечательный физик // Воспоминания о Л.Д. Ландау. — М.: Наука, 1988. — 352 с.
552. Ахиезер А.И. Харьковская школа теоретической физики // Укр. физ. журн. — 1985. — 30. — №5. — С.645—661
553. Ландау Л.Д. Собрание трудов. — М:Наука, 1969. — 2 т.
554. Ландау Л.Д. К теории фазовых переходов. II // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1937. — 7. — С.627
555. Ландау Л.Д. К теории аномалий теплоемкости // Z. Phys. Sow. — 1935. —8. — S.113
556. Ландау Л.Д. Кинетическое уравнение в случае кулоновского взаимодействия // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1937. — 7. — С.203.
557. Ландау Л.Д. О колебаниях электронной плазмы // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1946. — 16. — С.574—586.
558. Власов А.А. О вибрационных свойствах электронного газа // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1938. — 8. — С.291—318.
559. Ахиезер А.И., Файнберг Я.Б. О взаимодействии пучка зряженных частиц с электронной плазмой // Докл. АН СССР. — 1949. — 69. — С.555—556.
560. Ландау Л.Д. К статистической теории ядер // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1937. — 7. — С.819
561. Лифшиц Е.М. Лев Давидович Ландау // Воспоминания о Л.Д. Ландау. — М.: Наука, 1988. — 352 с.
562. Халагтников И.М. Как создавалась школа Ландау // Воспоминания о Л.Д. Ландау. — М.: Наука, 1988. — 352 с.
563. Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Статистическая физика. — М., 1964. — 568 с.
564. Особова справа доктора фізико-математичних наук В.Л.Германа за 1962—1964 рр. // Архів Ін-ту радіофізики та електроніки НАН України. — Ф.1. — Оп.№2. — Од.зб.№114.



565. Герман В.А. О поляризации и интенсивности света, рассеянного вблизи квадрупольной линии // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1939. — №9, вып.12. — С.1415
566. Герман В.А. Поляризация света, рассеянного возбужденными атомами // Докл. АН СССР. — 1944. — 42. — №4. — С.168
567. Герман В.А. Об интеркомбинационных переходах в спектрах сложных молекул // Докл. АН СССР. — 1945. — 48. — С.260
568. Герман В.А. Некоторые теоремы об анизотропных средах // Докл. АН СССР. — 1945. — 48. — С.95
569. Герман В.А. О возможном объяснении эффекта Бриджмена — повышения прочности всесторонним равномерным давлением // Докл. АН СССР. — 1946. — 51. — №9. — С.671
570. Герман В.А. та інші. До гідродинаміки кавітаційної рідини // Доп. АН УРСР. — 1954. — №2. — С.115
571. Герман В.А. и др. К гидро- и газодинамической теории смазки // Записки мат. отд. физ. - мат.ф-та ХГУ и Харьк. мат. об-ва. — 1957. — 25. — С.101
572. Герман В.А. и др. Исследования рассеяния, поглощения и распространения волн в осадках // Укр. физ. журн. — 1961. — №6
573. Боголюбов Н.Н. Sur l'approximation des fonctions par les sommes trigonometriques // Докл. АН СССР. А. — 1930. — №6. — С.147—152.
574. Боголюбов Н.Н. Sur l'approximation trigonometrique des fonctions dans l'intervalle infini // Изв. АН СССР. — 1931. — №1/2. — С.23—54; 149—160.
575. Крилов М.М., Боголюбов М.М. Загальна теорія міри в нелінійній механіці // Зб. праць з нелінійної механіки. — К.: Вид-во АН УРСР, 1937. — С.55—122.
576. Боголюбов М.М. Про деякі ергодичні властивості суцільних груп перетворень // Наук. зап. Київ. держ. ун-ту. — 1939. — 4, вип. 5. — С.45—52.
577. Боголюбов М.М., Крилов М.М. Про рівняння Фоккера-Планка, що виводяться в теорії пертурбацій методом, оснований на спектральних властивостях пертурбаційного гамільтоніана // Зап. кафедри мат. фізики Ін-ту буд. механіки АН УРСР. — 1939. — 4. — С.5—80.
578. Крилов М.М., Боголюбов М.М. Наслідки дії статистичної зміни параметрів на рух динамічних консервативних систем протягом досить тривалих періодів часу // Зб. праць з нелінійної механіки. — К.: Вид-во АН УРСР, 1937. — С. 119—135.
579. Крилов М.М., Боголюбов М.М. Про деякі проблеми ергодичної теорії стохастичних систем // Зап. кафедри мат. фізики Ін-ту буд. механіки АН УРСР. — Київ: АН УРСР. — 1939. — С.243—287.
580. Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н. Инвариантные и транзитивные меры в нелинейной механике // Мат. сборник. — 1936. — С.707—711.
581. Крылов Н.М., Боголюбов Н.Н. La theorie generale de la mesure dans son application a letude des systems de la mecanique non linearic // Ann. Math. — 1937. — 38. — P.65.
582. Боголюбов Н.Н. О некоторых статистических методах в математической физике. — Киев: АН УССР, 1945
583. Боголюбов М.М., Крилов М.М. Про рівняння Фоккера-Планка, що виводяться в теорії пертурбацій методом, оснований на спектральних властивостях пертурбаційного гамільтоніана // Зап. кафедри мат. фізики Ін-ту буд. механіки АН УРСР. — 1939. — 4. — С.5—80.
584. Пригожин И. Неравновесная статистическая механика. — М.: Мир, 1964. — 314 с.
585. Van Hove L. // Physica. — 1955. — 21. — P.512.
586. Боголюбов Н.Н., Хацет Б.И. О некоторых математических вопросах теории статистического равновесия // Докл. АН СССР. — 1949. — 66. — №3. — С. 321—324.
587. Боголюбов Н.Н., Петрина Д.Я., Хацет Б.И. Математическое описание равновсного состояния классических систем, основанное на каноничесом формализме // Теорет. и мат. физика. — 1969. — 1. — №2. — С.251—274.

588. Боголюбов Н.Н., Гуров К.П. Кинетические уравнения в квантовой механике // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1947. — 17, вып.7. — С.614—628.
589. Гуров К.П. Основания кинетической теории. Метод М.М.Боголюбова. — М.:Наука, 1966. — 351 с.
590. Толмачев В.В., Тябликов С.В. О новом методе в теории сверхпроводимости. 2. // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1958. — 34. — 1. — С.66—72.
591. М.М.Боголюбов, Д.Н.Зубарев. Волновая функция системы взаимодействующих бозе-частиц // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1958. — 28. — №28. — С.129—139.
592. Боголюбов Н.Н. К теории сверхтекучести // Изв. АН СССР. Сер. Физика. — 1947. — 11. — №1. — С.77—90.
593. Боголюбов Н.Н. Энергетические уровни неидеального бозе—эйнштейновского газа // Вестн. Моск. ун-та. — 1947. — 7. — С.43—56.
594. Капица П.А. Вязкость жидкого гелия ниже  $\lambda$ —точки // Докл.АН СССР. — 1938. — 18. — С.21.
595. Kapitza p. Viscosity of Liquid Helium below the  $\lambda$ —point // Nature. — 1938. — 141. —P.74.
596. Allen J.F, Missener A.D. Flow of Liquid Helium II // Nature. — 1938. — 141. — P.75.
597. Капица П.А. Проблемы жидкого гелия. (Докл. на общем собрании АН СССР 28 декабря 1940 г.) // Эксперимент, теория, практика. — М.: Наука, 1974. — 288 с.
598. Tisza J.W // Nature. — 1938. — 141. — P.913.
599. London H. // Proc. Roy.Soc. A. — 1939. — 171. — P.484.
600. Ландау Л.Д. Теория сверхтекучести гелия II // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1941. — 11, вып.6. — С.592—614.
601. Feynman R.P. Application of Quantum Mechanics to Liquid Helium // Progress in Low Temperature Physics (ed. C.J.Gorter). — 1. — Amsterdam: North—Holland, 1955. — P.17—53.
602. Фейнман р. Статистическая механика. — М.: Мир, 1975. — 412 с.
603. Боголюбов Н.Н. Кинетические уравнения в теории сверхтекучести // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1948. — 18, вып. 7. — С.622—630.
604. Боголюбов Н.Н. К вопросу о гидродинамике сверхтекучей жидкости. — Дубна,1963. — Препринт ОИЯИ Р—1395.
605. Боголюбов Н.Н., Гуров К.П. Кинетические уравнения в квантовой механике // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1947. — 17, вып.7. — С.614—628.
606. Боголюбов Н.Н., Тябликов С.В. Метод теории возмущений вырожденного уровня в полярной модели металла // Вестн. Моск. ун-та. — 1949. — №3. — С.35—48.
607. Боголюбов Н.Н., Тябликов С.В. Об одном применении теории возмущений к полярной модели металла // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1949. — 19, вып.3. — С.251—255.
608. Боголюбов Н.Н., Тябликов С.В. Приближенный метод нахождения низших энергетических уровней электронов в металлах // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1949. — 19, вып.3. — С.256—258.
609. Боголюбов Н.Н. Лекции по квантовой статистике. Вопросы статистической механики квантовых систем. — К.: Рад.,1949. — 228 с.
610. Бонч-Бруевич В.А., Тябликов С.В. Метод функций Грина в статистической механике. — М.Физматгиз, 1961. — 312 с.
611. М.М.Боголюбов, Д.Н.Зубарев, Ю.А.Церковников. Асимптотически точное решение для модельного гамильтониана теории сверхпроводимости // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1960. — 39, вып.1(7) . — С.120—129.
612. Беляев С.Т. Энергетический спектр неидеального бозе-газа // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1958. — 34. — С.417.
613. Особова справа академіка НАН України Данилова Віталія Івановича // Архів Президії НАН України. — Ф.251. — Оп.2. — Спр.№ 256.
614. В.И.Данилов (1902—1954). Некролог // Проблемы металловедения и физики металлов. — 1955. — Сб.4. — С.7—12

615. В.И.Данилов (Некролог) // Сб. науч. тр. Лаборатории металлофизики АН УССР. — 1954. — №5. — С.3—9.
616. Відкриття меморіальної дошки на честь академіка НАН України В.І.Данилова // Вісник АН УРСР. — 1983. — №6. — С.97
617. В.С.Савчук. Нариси з історії фізичних досліджень на Дніпропетровщині 1917—1945): Навч.посібник. — Дніпропетровськ: ДДУ, 1997. — 68 с.
618. Центральний державний архів виконавчих органів вищої влади та управління України. — Ф.806. — Оп.1., т.1. — Спр.1512
619. Радченко И.В. О В.И. Данилове и начале физических исследований в Днепропетровске // Архив Музею історії Дніпропетровського національного університету
620. Данилов В.И. Применение рентгеновских лучей к исследованию жидкого состояния // Рентгенография в применении к исследованию материалов. — М.;Л.: ОНТИ, 1936. — С.82. — 102.
621. Данилов В.И., Неймарк В.Е. О структуре жидкой ртути вблизи точки кристаллизации // Журн. Экспер. и Теор. Физики. — 1935. — 5, вып.8. — С.724—728.
622. Данилов В.И., Плужник Е.Е., Теверовский В.М. Кристаллизация пиперина в ультразвуковом поле // Журн. exper и теорет. физики. — 1939. — 9., вып.1. — С.66—67.
623. Данилов В.И. Рассеяние рентгеновских лучей в жидкостях. — М.;Л.: ОНТИ, 1935. — 140 с.
624. Данилов В.И., Радченко И.В. О структуре жидких металлов вблизи точки кристаллизации // Журн. exper и теор. физики. — 1937. — 7, вып.9/10. — С.1153—1157.
625. Данилов В.И., Радченко И.В. Рассеяние рентгеновских лучей в жидких эквентических сплавах // Журн. exper и теор. физики. — 1937. — 7, вып.9/10. — С.1158—1160.
626. Спогади канд. фіз.-мат. наук В.Є.Неймарка // Архив Музею історії Дніпропетровського національного університету.
627. Спогади докт. фіз. - мат. наук, професорки Д.С.Каменецької // Архив Музею історії Дніпропетровського національного університету.
628. Институт физики. — К.:Наук. думка, 1979. — 118 с.
629. Пекар С.И. Автолокализация электрона в диэлектрической инверсионно оляризующей среде // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1946. — 16, вып.4. — С.335—340.
630. Давыдов А.С. Теория поглощения света молекулярными кристаллами // Изв. АН СССР. — Сер. Физ. — 1948. — 12. — №5. — С.608—610.
631. Финкельштейн Б.Н. Мои встречи с физиками // Сталь. — 1962. — №31
632. Професор Фінкельштейн замітає сліди // Зоря. — 1937. — №150 (3 липня).
633. Иоффе А.Ф. Советская физика за 20 лет // Журн. эксперим. и теорет. физики. — 1937. — 7. — №1. — С.1189—1193.
634. Курдюмов Г.В., Малиновский А.Э. Днепропетровский физико-технический институт // Науч. - исслед. Ин-ты тяжелой пром. — ОНТИ НКТП. — 1936.
635. Курдюмов Г.В.Фазовые превращения в сплавах // Рентгенография в применении к исследованию материалов. — М.;Л.:ОНТИ НКТП, 1936
636. Лесник А.Г. Модели межатомного взаимодействия в статистической теории сплавов. — М.: Физматгиз, 1962. — 87 с.
637. Особова справа проф.Смирнова А.А. Архив Київського університету. — ФР—308. — Оп.№14. — Спр.№174.
638. Лейпунский А.И. Отчет о работе украинского физико-технического института // Известия Академии наук СССР. — 1937. — №3. — с.363—377.
639. Йоффе А.Ф. Розвиток радянської фізики // Електричтво. — 1948. — №1. То же: Досягнення радянських фізиків. Хрестоматія. — К.: Рад.школа, 1950. — 322 с.
640. Пинес Б.Я. // Успехи физ. наук. — 1962. — Т.26. — №3.
641. Пинес Б.Я., Иванов И.Г. // Физика твердого тела. — 1960—Т.2. — С.959.

642. Пинес Б.Я., Сиренко А.Ф. // Физика металлов и металловедение. — 1959. — 7. — С.766.
643. Пинес Б.Я., Сиренко А.Ф. // Физика металлов и металловедение. — 1960. — Т.10. — С.382
644. Пинес Б.Я., Сиренко А.Ф. // Изв. вузов, черная металлургия. — 1960. — №2. — С.81
645. Пинес Б.Я., Сиренко А.Ф. // Изв. вузов, черная металлургия. — 1960. — №5. — С.121
646. Усиков А.Я., Герман В.Л., Ваксер И.Х. Экспериментальное и теоретическое исследование поглощения и рассеяния миллиметровых волн в осадках // Тр. отд. радиофизики ФТИ АН УССР. — 1954. — № 2. — С.3—39.
647. Ваксер И.Х., Усиков А.Я. Влияние затухания и рассеяния радиоволн миллиметрового диапазона в дожде на радиолокационную наблюдаемость // Тр. ИРЭ АН УССР. — 1955. — № 3. — С.36—61.
648. Усиков О.Я., Герман Л.В., Ваксер И.Х. Дослідження вбирання та розсіювання міліметрових хвиль в опадах // Український фізичний журнал. — 1961. — 6, № 5. — С.618—641.
649. Голик А.З. Строение и свойства вещества в жидком состоянии // Тр. Ин-та физики АН УССР. — 1955, вып.6. — С.70—82
650. Голик А.З. // В сб. Термодинамика и строение растворов. — М.: Изд-во АН СССР, 1959
651. Теплофизические свойства жидкостей. — М.: Наука, 1976. — 159 с.
652. Голик А.З. Уравнение состояния реальных газов. — Киев: Изд-во Киев.ун-та, 1961. — 45 с.
653. Голик О.З., І.Ф.Классен // Укр. физ. журн. — 1959. — 4. — №4
654. Голик О.З., Казанський В.М. // Укр. физ. журн. — 1959. — 4. — №5
655. Голик О.З., Шиманський Ю.І., Кобійчук Н.М. // Укр. физ. журн. — 1958. — Т.3. — №4. — С.537.
656. Голик О.З., Шиманська О.Т. // Укр. физ. журн. — 4. — №6
657. Булавін Л.А. Критичні явища в рідинах. — К.: РВЦ „Київський університет”, 1997.
658. Булавін Л.А., Забашта Ю.Ф. Фізична механіка полімерів. — К.: РВЦ „Київський університет”, 1999.
659. Степин В.С. // Вопросы философии. — 2004. — №9. — С.16—71.

Наукове видання

**ЛИТВИНКО Алла Степанівна**

**СТАНОВЛЕННЯ  
СТАТИСТИЧНОЇ ФІЗИКИ В УКРАЇНІ  
(30–40 рр. ХХ ст.)**

Редактор М.К. Пуніна  
Комп'ютерна верстка Д.В. Іванов

Підп. до друку 12.01.09. Формат 60×84/16  
Папір офс. Друк офс.  
Ум. др. арк. 12,787. Обл.–вид. арк. 10,95  
Наклад 300 прим. Зам. 9-055

Відадруковано в друкарні “Видавництво “Фенікс”  
Св-во суб'єкта видавничої справи  
ДК №271 від 07.12.2000 р.  
03680, м. Київ, вул. Шутова, 13Б

