

УДК 53(091)

**Ю.О. ХРАМОВ**, доктор фізико-математичних наук,  
професор, завідувач відділу,  
ДУ «Інститут досліджень науково-технічного потенціалу  
та історії науки ім. Г.М. Доброва НАН України»,  
e-mail: fenixprint@ukr.net

---

## **СОЛОМОН ІСАКОВИЧ ПЕКАР І ЙОГО НАУКОВА ШКОЛА (До 100-річчя від дня народження)**

---

*Розкрито характерні риси видатного українського фізика-теоретика С.І. Пекара як ученого, людини та педагога, тобто наукового лідера, який поклав початок створенню в Києві у 50–70-х роках минулого століття великої та потужної теоретичної школи в галузі фізики твердого тіла. Показано внесок С.І. Пекара та його школи у фізику. Наведено персональний склад школи.*

**Ключові слова:**

*Інститут фізики, Інститут фізики напівпровідників, напівпровідники, полярон, автолокалізація, кристали, кристалічна ґратка, екситон, поглинання світла.*

---

Академік АН УРСР С.І. Пекар (1917—1985) увійшов у історію світової та української фізики як видатний теоретик, з ім'ям якого пов'язані значні досягнення в теорії твердого тіла, і як блискучий педагог, вихователь низки поколінь фізиків-теоретиків, засновник широко відомої в Україні та за її межами авторитетної наукової школи [1; 2]. Цьому сприяли його чудові якості вченого й просто людини. С.І. Пекара як дослідника вирізняли незвичайний талант, незалежний і неупереджений підхід до вирішення різних фізичних питань, оригінальний вибір актуальних тем для дослідження, що ґрунтувався на його глибокій інтуїції, прагнення до постановки фундаментальних задач і доведення отриманих результатів до порівняння з експериментом, тісний зв'язок із ним, наукова принциповість і сміливість, глибина і ясність робіт. Риси С.І. Пекара як дослідника образно описали його учні й колеги:

© ХРАМОВ Ю.О.,  
2017

«С.І. Пекар був наділений яскравим та оригінальним талантом, який проявлявся і у виборі тем його основних робіт, і в підході, який він знаходив для вирішення виникаючих задач. Зв'язки їх з іншими роботами того часу спочатку були незримими, уявлялися ніби ізольованими, такими, що незрозуміло, як виникли. Але проходило кілька років, і картина змінювалася. Тісний зв'язок із сучасністю ставав очевидним, явно проявлявся й вплив робіт Пекара на інших дослідників, і вже починало здаватися незрозумілим, чому необхідність в такій роботі не була ясна відразу. Соломон Ісакович мав рідкісний склад розуму, що дозволяв йому будувати свої роботи та оцінювати чужі, не порівнюючи їх з іншими роботами останнього часу, а виходячи з «перших принципів». Він шоразу логічно проходив весь хід міркувань — від «початків» до конкретної роботи. Це дозволяло йому, уникаючи дуже поширених помилок або забобонів, знаходити найбільш послідовний хід міркувань» [2, с. 10].

І далі:

«Важлива загальна риса, яка характеризує творчість Соломона Ісаковича — та, що, стежачи за розвитком сучасної фізики, він не прагнув наслідувати моді, а розробляв саме ті питання, де міг зробити новий нетривіальний і принциповий крок. Тому чимало його робіт створили нові напрями досліджень. Свої кращі роботи він зробив сам, ретельно виношуючи їх. Відповідальність, з якої він ставився до своїх робіт, була прикладом для його оточення. Соломона Ісаковича поряд із теорією хвилювали й фізичний експеримент, і навіть суто конструкторські задачі. Його риси дослідника дивним чином доповнювалися людськими, що створювало ту органічну єдність, яку прийнято визначати як надзвичайну цілісність людської вдачі. Це була глибоко порядна й принципова людина, цілеспрямована та оптимістична, надзвичайно працездатна і зосереджена, скромна, душевна, демократична. Мені як автору цієї статті не раз доводилося зустрічатися із Соломоном Ісаковичем з питань, безпосередньо не пов'язаних із наукою, і шоразу мене вражали неповторна індивідуальність, сила інтелекту, висока інтелігентність, доброзичливість, духовність цієї людини» [3, с. 162].

Значення людських якостей С.І. Пекара описують знов-таки його учні:

«Соломону Ісаковичу завжди були властиві надзвичайна цілісність, незалежність суджень, глибока принциповість, відсутність суєти, духовна чистота. Ці якості створювали особливу наукову й моральну атмосферу навколо нього, особливо у відділі теоретичної фізики. Він завжди уникав дрібних адміністративних конфліктів, але був непримирений у питаннях принципових: при оцінці рівня та якості наукових праць, виборі наукової тематики, вирішенні долі молодих учених. Завдяки саме цим якостям С.І. Пекара відкрився шлях у науку для багатьох молодих теоретиків, визначився їх науковий стиль і моральне обличчя. Під час обговорення наукових проблем він був вимогливий і справедливий, прагнув розкрити слабкі місця обговорюваних робіт і відразу надати максимальну допомогу для подолання виникаючих труднощів. Особливо вимогливим Соломон Ісакович був до власних робіт, у яких ретельно продумував усі деталі. Будучи людиною контактною, легко й швидко встановлював прості відносини з малознайомими людьми, водночас був дуже доброзичливий і внутрішньо демократичний. Ці чудові людські якості Соломона Ісаковича повною мірою розкривалися перед тими, хто мав щастя близько знати його» [1, с. 13].

Оцінку С.І. Пекара як ученого, вчителя й людини дав також його колега по Інституту фізики напівпровідників НАН України акад. НАН України М.П. Лисиця.

«Соломон Ісакович Пекар у всіх стосунках особистість неабияка, — зазначав він. — Але насамперед він був відданий науці. В галузі фізики твердого тіла Соломон Ісакович

став класиком, ще будучи молодиком. Створивши теорію поляронів, він пояснив цільний комплекс явищ, що протікають у твердих тілах з переважаючим іонним хімічним зв'язком. Ця теорія набула подальшого розвитку не тільки в його власних дослідженнях, а й у роботах його численних учнів, а також представників інших шкіл, вітчизняних і закордонних. Без теорії поляронів неможливо уявити собі сучасну фізику твердого тіла. Полярон — не єдина квазічастинка, народжена в уяві Соломона Ісаковича. Його світлоекситон, інакше поляритон, пронизує всю спектроскопію кристалів, що відображає їх енергетичну структуру. Будучи різностороннім фізиком-теоретиком, Соломон Ісакович зробив істотний внесок і в розвиток квантової електроніки, створивши теорію хімічних лазерів нового типу. Мені пощастило слухати лекції Соломона Ісаковича, які він протягом багатьох років читав у Київському університеті. Всі студенти без винятку дуже високо цінували педагогічний талант Соломона Ісаковича і його людяність на іспитах. Доброта, принциповість, твердість у відстоюванні власної наукової позиції, чесність, вміння раціонально використовувати кожну хвилину — характерні риси академіка С.І. Пекара»<sup>1</sup>.

Позицію С.І. Пекара в окремих життєвих епізодах, що розкривають його високі якості людини та вченого, описує також К.Б. Толпиго:

«Прикладом високої самокритичності С.І. Пекара може бути епізод, коли на початку 50-х років він почав розраховувати ефективну масу полярона з квантowo-механічним розглядом його поступального руху. Розрахунок дав величину, вдвічі меншу за отриману в класичному розгляді. С.І. Пекар був переконаний, що тут якась помилка, й витратив понад рік на її пошуки. Було розроблено новий підхід, оснований на адіабатичному наближенні, що дав правильний результат, який збігся з класичним. Але залишалося відкритим питання, в чому причина розбіжності у двох підходах? Цікаво, що приблизно в цей самий час С.В. Тябліков незалежно, трохи іншими методами, виконав подібні розрахунки та отримав два різні результати. Він опублікував дві статті, не намагаючись їх зіставити. Але С.І. Пекар повністю розібрав парадокс. Виявилось, що в першому розрахунку не можна обмежуватися першим порядком теорії збурень. Врахування ж членів другого порядку повністю ліквідувало непорозуміння...

Про високу наукову й ділову чесність С.І. Пекара свідчить також інший епізод. В 1945 р. один із перших аспірантів С.І. (Є.Д. Майборода) почав роботу над дисертацією, тема якої (теорія центрів забарвлення) раптом перетнулася з докторською дисертацією Е.Й. Адировича, який, не знаючи про це, розповів С.І. про свою роботу, і С.І. відразу побачив помилку й зрозумів, як необхідно змінити підхід. Сказати про це Адировичу — означає «підвести» власного аспіранта, який поки йшов попереду, дотримуючись вказівки свого керівника. Як бути? Тут, як кажуть, «совість змусила» С.І. і критикувати роботу, і підказати правильний хід міркувань авторові. Так виникла відома в ті роки (1948—1950) модель подвійного шару Адировича, що дозволила просто описати взаємодію електрона F-центра з коливаннями ґратки кристала. Є.Д. Майборода, перебуваючи все-таки попереду, мав повну можливість активізувати свою роботу і раніше її завершити, проте, на жаль, не зумів це зробити. Щось подібне відбулося через кілька років і з М.О. Кривоглазом, коли той міг позбутися пріоритету в роботі з теорії безвипромінювальних переходів, через те, що С.І. «з чесності» послався на його результати раніше, ніж вони були опубліковані. Тоді конкурент М.О. Кривоглаза поспішив виправитися та опублікуватися»<sup>2</sup>.

---

<sup>1</sup> Особисте повідомлення автору.

<sup>2</sup> Особисте повідомлення автору.

Соломон Ісакович Пекар народився 16 березня 1917 р. у Києві. В 1933 р. вступив до Київського університету, де слухав лекції відомих закордонних фізиків-теоретиків Г. Бека і Н. Розена, які працювали тоді в Україні. Вже в студентські роки у С.І. Пекара з'явилось прагнення до самостійної наукової праці. В 1938 р. він виконав дослідження «Розподіл швидкостей електронів у плазмі розряду» [2, с. 12—23], про яке повідомив на сесії Відділення фізики АН СРСР, чим викликав дискусію. Воно вже свідчило про становлення С.І. Пекара як оригінального теоретика. Закінчивши того ж року університет, він почав працювати науковим співробітником в Інституті фізики АН УРСР, одночасно ставши аспірантом університету при кафедрі теоретичної фізики, керівником його був І.Є. Тамм — видатний радянський фізик, завідувач теоретичним відділом Фізичного інституту АН СРСР.

Необхідно зазначити, що в передвоєнні роки в Інституті фізики АН УРСР інтенсивно велися експериментальні дослідження з фізики напівпровідників, очолювані спочатку О.Г. Гольдманом, а з 1939 р. — В.Є. Лашкарьовим, які зробили Київ одним із провідних центрів СРСР у цьому напрямі. Однак теоретичні розробки практично були відсутні, хоч питання випрямлення в світовому співтоваристві активно вивчалися (А. Вільсон, Я.І. Френкель, Л. Нордгейм, Н. Мотт, Б.І. Давидов, Д.І. Блохінцев та інші). Тому вибір теми дисертації не був випадковим, а відповідав завданням інституту. У руслі дисертаційної роботи С.І. Пекар в 1939—1941 рр. побудував загальну нелінійну монополярну теорію випрямлення на контакті «напівпровідник — метал» [2, с. 24—38]. Роботу було докладено на московському семінарі Ландау, де вона отримала високу оцінку. Деякі фізики в своїх історичних екскурсах наводять відомий афоризм Ландау, який він озвучив після обговорення роботи Пекара — «в Києві відбулося самозародження теоретичної фізики» [36, с. 80]. В результаті при захисті дисертації в травні 1941 р. С.І. Пекару, за пропозицією В.Є. Лашкарьова, І.Є. Тамма та Я.І. Френкеля, було присуджено відразу ступінь доктора фізико-математичних наук, що трапляється нечасто.

В цей період у С.І. Пекара встановилися тісні наукові зв'язки з Я.І. Френкелем, І.Є. Таммом і Л.Д. Ландау, а потім із М.М. Боголюбовим, які в подальшому зміцнювалися, він завжди прагнув обговорити з ними проблеми, що його хвилювали, та отримані результати. Тому вплив на нього перших трьох був значним і сприяв його швидкому становленню як теоретика високого класу. С.І. Пекар належав до теоретичної школи І.Є. Тамма, однак другим своїм учителем вважав Л.Д. Ландау.

У роки війни з гітлерівською Німеччиною С.І. Пекар працював в Уфі, куди переїхав Інститут фізики АН УРСР, в галузі напівпровідникових приладів, де розкрилися його нові якості — інженера й конструктора. В 1941—1946 рр. і 1949—1960 рр. він завідував відділом теоретичної фізики Інституту фізики АН УРСР, а в 1944—1951 рр. і 1953—1966 рр. — також кафедрою теоретичної фізики в Київському університеті, де в 1948 р. створив

спеціалізацію з теоретичної фізики. Курси лекцій, які читав С.І. Пекар, вирізнялися глибиною та ясністю, часто стаючи подіями для слухачів, на них було виховано не одне покоління українських теоретиків. Це був найбільш плідний в науковому плані період у творчості С.І. Пекара. Саме в цей період він запровадив (1946) поняття поляронів і розробив (1946—1949) їх теорію, яка містила велику кількість нових ідей та уявлень і відкрила новий напрям у фізиці твердого тіла, вплинувши на багато її розділів. Тоді ж було передбачено (1957) додаткові світлові хвилі в кристалах (світлоекситони) та істотно доповнено й узагальнено (1957—1960) кристалооптику.

Поряд із глибокими теоретичними роботами в теорії твердого тіла, очолюваними С.І. Пекарем, у цей самий час в Інституті фізики АН УРСР під керівництвом В.Є. Лашкарьова велися широкі комплексні експериментальні дослідження з фізики напівпровідників. Теоретиками та експериментаторами інституту було зроблено значний внесок у становлення і розвиток фізики і техніки напівпровідників. Тому в 1960 р. було вирішено на базі відділів теоретичної фізики та фізики напівпровідників Інституту фізики АН УРСР створити Інститут напівпровідників АН УРСР (нині Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України), в якому С.І. Пекар до самої своєї кончини 8 липня 1985 р. очолював теоретичний відділ. Одночасно він був професором (1961—1976) кафедри теоретичної фізики Київського університету. Варто зазначити, що при становленні нового інституту значну роль відіграли чудові якості С.І. Пекара, які вплинули на інститутську атмосферу взагалі. З ініціативи й під керівництвом С.І. Пекара протягом 30 років (1955—1985) проводилися всесоюзні наради з теорії напівпровідників, які мали величезний вплив на розвиток досліджень у цій галузі та на виховання молодих теоретиків. Становленню їх сприяли також семінари, що регулярно проводилися С.І. Пекарем.

Активна й плідна наукова, науково-організаційна й педагогічна діяльність С.І. Пекара, його особисті якості, науковий авторитет привели до того, що він постійно був оточений молодими творчими співробітниками, аспірантами, студентами й допоміг багатьом із них стати фізиками-теоретиками. До Соломона Ісаковича часто зверталися за науковими порадами, прагнули доповісти роботу на його семінарі. Для всіх, хто звертався до нього «по науці», Соломон Ісакович був уважним, доброзичливим і вдумливим критиком, завжди прагнув надати реальну допомогу слушною порадою. Його думка була неупередженою і незалежною. Своєю підтримкою він допоміг прийти в науку багатьом молодим теоретикам. Вони й склали його розгалужену теоретичну школу, представники якої працюють нині, крім Києва, в багатьох містах, зокрема в Кишиневі, Донецьку, Чорноголовці. Формуватися вона почала наприкінці 40-х — початку 50-х років на базі теоретичного відділу Інституту фізики АН УРСР та кафедри Київського університету, в подальшому її успішний розвиток проходив в Інституті напівпровідників АН УРСР.

Про це коротко написав учень С.І. Пекара, його наступник у теоретичному відділі Інституту фізики напівпровідників НАН України В.О. Кочелап:

«Значення діяльності С.І. Пекара визначається не тільки його науковими результатами. Він був блискучим педагогом і багато уваги приділяв вихованню молодих учених. Цей бік його діяльності привів до створення першої школи фізиків-теоретиків у Києві. В 1944 р. С.І. Пекар відродив кафедру теоретичної фізики в Київському університеті, а в 1998 р. при цій кафедрі вперше було створено спеціалізацію з підготовки фізиків-теоретиків. Курси лекцій із теоретичної фізики, які читав Соломон Ісакович, справили значний вплив на кілька поколінь студентів фізичного факультету КДУ, залучивши їх до основ сучасної науки. Його лекції вирізнялися незвичайною ясністю й глибиною і часто ставали подією для слухачів» [36, с. 92].

Основний напрям С.І. Пекара та його школи — теорія неметалічних кристалів. Інтенсивні дослідження в ній він розпочав наприкінці 30-х років. В 1938 р. побудував кількісну теорію випрямлячів із запірними шарами, у 1940—1941 рр. — теорію контакту напівпровідників з металом у випадку сильних струмів [2, с. 24—38]. У середині 40-х років С.І. Пекар почав вивчення проблеми сильної взаємодії електрона з кристалічною ґраткою. Відштовхуючись від ідеї Л.Д. Ландау про можливість захоплення електрона ґраткою кристала (його автолокалізації) в умовах досить сильної взаємодії в результаті деформації ґратки полем самого електрона (1933) і використовуючи для описання автолокалізації макроскопічний підхід, він запропонував нові методи розгляду електронів провідності й локалізованих електронів, які дозволили істотно поліпшити електронну теорію кристалів і з єдиної точки зору інтерпретувати широке коло явищ, які не мали задовільного пояснення в рамках зонної теорії. Побудована ним (1946) витончена модель процесу взаємодії електрона з ґраткою, що враховувала діелектричну поляризацію іонного кристала електричним полем електрона провідності, запровадила в розгляд стан кристала з поляризаційною потенціальною ямою, в якій локалізовано електрони, названі ним поляронами [4]. Потенціальна яма полярона разом із осцилюючим у ній електроном може переміщуватися по кристалу як своєрідна поляризаційна хвиля, інакше кажучи, полярон рухається в кристалі подібно до частинки із зарядом електрона та деякою ефективною інертною масою, відмінною від електронної. Полярон як нова квазічастинка міцно увійшов у фізичну лексику. На основі концепції поляронів як основних носіїв струму в іонних кристалах С.І. Пекар побудував (1946—1950) теорію поляронів у границі сильного зв'язку, фундаментом якої стало рівняння для визначення енергетичного спектра полярона (рівняння Пекара) і формула для ефективної маси полярона (формула Пекара — Ландау) [5]. Теорія поляронів істотно змінила уявлення про носіїв струму в іонних кристалах і стала новим напрямом у сучасній теорії твердого тіла.

У процесі створення поляронної теорії було розвинено низку підходів, що мали загальне значення для теорії твердого тіла, зокрема запропоновано метод ефективної маси електрона в кристалічній ґратці, адіабатичне наближення для електрона провідності, який взаємодіє із сильно зв'язаними

електронами, досліджено особливості поляризації ґратки. Задача про полярон як одна з простих і реальних моделей сприяла розвитку загальних методів теорії поля. В розвиток поляронної теорії (1951) С.І. Пекар з І.М. Дикманом побудував теорію автолокалізації екситонів Ванье — Мотта [2, с. 156—167], а з М.Ф. Дейгеном — теорію автолокалізації екситонів у неполярних кристалах [2, с. 39—44], в якій незалежно від Дж. Бардіна й У. Шоклі (1950) було запропоновано метод деформаційного потенціалу. С.І. Пекарем і його учнями розвинено теорію поляронів і при довільній силі зв'язку, досліджено можливість утворення самоузгоджених електронних станів у гомеополарних кристалах (конденсонів), кондесонний ефект уведено ними в теорію поляронів і локальних електронних центрів. Разом зі співробітниками й учнями С.І. Пекар поширив теорію поляронів на випадок проміжного зв'язку, а також на екситони й конденсони. Так, 1957 р. він разом із В.М. Буймістровим і М.О. Кривоглазом розробив ефективні методи проміжного зв'язку [2, с. 192—220, 225—237; 6].

В 1953 р. С.І. Пекар і І.М. Дикман показали, що екситони в іонних кристалах подібно до електронів можуть перебувати в поляронних станах, і розвинули теорію поляризуючих екситонів при сильному й проміжному зв'язках [2, с. 156—167]. В наступні роки (1968—1975) він та В.І. Шека узагальнили теорію поляронів на багатодолиніні напівпровідники та анізотропні енергетичні зони [7; 8].

З дослідженнями в галузі теорії поляронів тісно межують роботи С.І. Пекара і його учнів з теорії домішкових центрів, що взаємодіють з кристалічною ґраткою. На основі методу ефективної маси С.І. Пекар з М.Ф. Дейгеном і К.Б. Толпиго розвинув (1947—1953) теорію домішкових електронних центрів. Він розглянув розсіяння поляронів оптичними коливаннями іонів кристала, а Ю.Е. Перлін розрахував розсіяння поляронів акустичними коливаннями іонів і відповідні рухливості (1951).

В 1949—1953 рр. С.І. Пекар і його учні виконали цикл досліджень із теорії домішкового поглинання світла, яким закладено основи теоретичної оптики кристалів з дефектами. Було побудовано загальну теорію форми спектрів домішкового поглинання й люмінесценції, показано визначальну роль електрон-фононої взаємодії у формуванні спектрів і дано їх повну адіабатичну теорію, визначено форму асиметричної кривої спектрального розподілу електрон-фононного поглинання світла (пекаріан). Пояснено стоковей зміщення спектрів поглинання й випускання, визначено його зв'язок із напівшириною спектра [9]. В 1953 р. С.І. Пекар із М.О. Кривоглазом розробив загальну теорію форми смуг домішкового поглинання в кристалах з довільним законом дисперсії фононів, дослідив тонку структуру спектрів, передбачив наявність дуже вузької безфононої лінії в спектрі домішкового поглинання (оптичний аналог ефекту Мессбауера) [2, с. 168—191]. Вивчено також оптичні властивості ідеальних кристалів в області екситонного поглинання.

До проблеми сильного електрон-фононного зв'язку С.І. Пекар та його учні зверталися неодноразово. Зокрема, в 1979 р. він, Е.Й. Рашба і В.І. Шека розглянули в адіабатичному наближенні існування в іонних кристалах поляризуючого й неполяризуючого екситонів і розробили теорію автолокалізованого бар'єра для екситона Ванье — Мотта [30, с. 425—429].

Значний цикл досліджень С.І. Пекара і його школи стосується теорії екситонів і оптики кристалів. В 1957 р. він показав, що в кристалах в області екситонного поглинання світла повинна істотно змінитися класична кристалооптика, і передбачив додаткові електромагнітні хвилі [2, с. 238—252], отримав нові формули для коефіцієнтів відбиття світла від поверхні кристала, прозорості кристалічної пластинки [2, с. 253—265] та ін. Як писав він сам,

«у результаті теоретичних досліджень було виявлено недостатність класичної теорії двозаломлення в спектральних областях екситонних резонансів, передбачено додаткові світлові хвилі в кристалах, для них обґрунтовано додаткові граничні умови на поверхні кристала, виведено нові формули для відбиття й проходження світла. Отримані результати дозволили істотно доповнити та узагальнити кристалооптику» [10, с. 3].

Протягом 1957—1960 рр. С.І. Пекар вивчив явища й закономірності, що не вкладаються в рамки класичної теорії двозаломлення, розвинув нову теорію електромагнітних хвиль у кристалах, у яких виникають екситони, розглянув теорію дисперсії та екситонного поглинання світла, вивів основні закони нової кристалооптики на основі узагальнення залежності питомої поляризації від електричного поля [10]. Вихідним пунктом теорії було узагальнення класичної формули для поляризації з урахуванням того, що екситонні рівні в кристалі розщеплюються в екситонні зони. Внаслідок цього діелектрична проникність виявляється функцією не тільки частоти світла (тимчасова дисперсія), а й хвильового вектора (просторова дисперсія), а оскільки хвильовий вектор містить множником показник заломлення, то підвищується степінь дисперсійного рівняння, яке пов'язує показник заломлення з частотою світла. Це й дає додаткові світлові хвилі. Спостережуване в області дисперсії світло є результатом певного «змішування» електромагнітного поля з екситонними збудженнями. Це дало підставу ввести новий термін «світлоекситон» (інші автори користуються еквівалентним терміном «поляритон».)

В 1960 р. С.І. Пекар ототожнив довгохвильові світлоекситони зі спостережуваними світловими хвилями і в такий спосіб побудував макроскопічну теорію екситонів з урахуванням запізнення, звівши теорію екситонів до макроскопічної теорії світлових хвиль [2, с. 306—317]. У випадку нехтування запізненням отримують просто екситони. В цьому ж році С.І. Пекар і М.С. Бродин експериментально довели існування додаткових світлових хвиль (в антрацені) [11]. Варто зазначити, що С.І. Пекар розробляв також постановки різних експериментів, у яких повинні проявлятися додаткові хвилі, а в деяких брав безпосередню участь. Зокрема, за його ідеєю М.І. Страшнікова здійснила досить ефективний дослід, коли світло, що падало майже



перпендикулярно до поверхні вузького клина, розщеплювалося на виході на два пучки внаслідок різних значень коефіцієнтів заломлення для «звичайної» й додаткової хвилі.

У наступні роки С.І. Пекар проводив дослідження в нових для нього напрямках, у яких висунув низку оригінальних ідей. Він розглянув (1965) механізм електрон-фононої взаємодії, пов'язаний із залежністю діелектричної проникності кристала від деформації, показавши, що внаслідок цього при накладанні зовнішнього статичного електричного поля в п'єзо- і неп'єзоелектричних кристалах виникає додаткова електрон-фононна взаємодія. Вона враховується поряд із деформаційним потенціалом і п'єзоелектричним полем при розгляді звукових хвиль в присутності носіїв струму, що дрейфують у зовнішньому полі [2, с. 346—354]. На основі передбаченого механізму він побудував теорію підсилення ультразвуку в напівпровідниках.

Необхідно зазначити, що ще в 1956 р. К.Б. Толпиго й З.І. Урицький незалежно від Вайнрайха передбачили можливість генерації гіперзвуку в кристалі за рахунок електрон-фононої взаємодії, коли дрейфова швидкість носіїв струму (поляронів) у зовнішньому полі перевищує швидкість звуку (акустоелектричний ефект, який лежить в основі акустоелектроніки) [12]. Експериментальне доведення підсилення гіперзвуку дали в 1961 р. Е. Хатсон, Дж. Макфі й Д. Уайт. У наступні роки ідея С.І. Пекара про додаткову електрон-фононну взаємодію нового типу отримала розвиток (1966—1978) у роботах, які він виконав разом із А.А. Демиденком, В.М. Пісковим і Б.Є. Цеквавою [2, с. 355—360].

В 1966—1969 р. С.І. Пекар з В.Н. Мальцевим досліджував властивості газів із високою концентрацією електронно-збуджених атомів і молекул і показав (1966), що резонансна диполь-дипольна взаємодія між молекулами, що перебувають на різних енергетичних рівнях, обернено пропорційна кубу відстані між ними й може давати внесок у термодинамічні функції газу, значно більший ніж звичайна ван-дер-ваальсова взаємодія. При цьому також вказано на можливість термодинамічної нестійкості й розпаду збудженого газу на дві фази з різним відносним вмістом збуджених атомів із наступною конденсацією однієї з фаз [2, с. 361—370, 405—409].

В 1969 р. С.І. Пекар вказав на можливість самостимульованого механізму випромінювання хімічно реагуючим газом, коли фотоперехід здійснюється під час елементарного акту хімічної реакції. Це дає можливість здійснити перетворення енергії хімічних реакцій в енергію когерентного випромінювання з більшим квантовим виходом. Інакше кажучи, С.І. Пекар запропонував новий тип хімічного лазера на стимульованих електронних фотопереходах [2, с. 384—386]. У наступні роки (1970—1979) С.І. Пекар і В.О. Кочелап розробили теорію стимульованої радіаційної хімічної реакції в газах, показавши можливість її використання в лазерах [2, с. 395—404, 413—416; 13]. В 1975 р. С.І. Пекар отримав вираз для енергії залежного від

часу електромагнітного поля в диспергуючому середовищі, що дозволило вперше послідовно провести квантування поля в ньому [14]. На основі цього 1977 р. знайдено нові формули для ймовірностей багатofотонних процесів у середовищі з дисперсією.

В результаті, завдяки лідерським якостям, визначним науковим здобуткам, отриманим особисто та очолюваним ним колективом теоретичного відділу у 50—70 роках, С.І. Пекарем сформовано велику та авторитетну теоретичну школу, яку дала не одне покоління теоретиків. Її представляють члени-кореспонденти АН УРСР М.Ф. Дейген, М.О. Кривоглаз, В.Й. Сугаков, К.Б. Толпиго, доктори наук Ю.Е. Перлін, І.І. Бойко, В.М. Буймістров, В.Л. Вінецький, З.С. Грибніків, І.М. Дикман, В.О. Кочелап, В.С. Машкевич, В.І. Мельников, В.В. Мітин, В.М. Піскової, В.Й. Піпа, Е.Й. Рашба, М.В. Стриха, Б.Є. Цеквава, В.І. Шека та інші [36].

Крім викладених вище, в школі отримано чимало результатів фундаментального значення в теорії екситонів, фізики напівпровідників, спектроскопії конденсованих середовищ, радіоспектроскопії, теорії неідеальних кристалів. Чимало учнів С.І. Пекара очолювали або очолюють теоретичні відділи, сектори й лабораторії в ряді академічних інститутах (Е.Й. Рашба, К.Б. Толпиго, М.О. Кривоглаз, М.Ф. Дейген, В.О. Кочелап, Ю.Е. Перлін, В.Й. Сугаков, П.Т. Томчук, І.М. Дикман, В.М. Буймістров та інші). В 1966—1991 рр. завідував сектором, відділом в Інституті теоретичної фізики ім. Л.Д. Ландау АН СРСР (Чорноголовка, Московська область) Е.Й. Рашба [37]. Він передбачив існування автолокалізаційного бар'єра для екситонів, вільних і автолокалізованих екситонів, континуальних автолокалізованих станів в одновимірних системах, а також велетенські сили осциляторів домішкових екситонів у молекулярних кристалах (ефект Рашби, 1957 р.). Е.Й. Рашба передбачив також комбінований резонанс — інтенсивне електродипольні збудження спінових переходів (1960) [15] і розвинув (1981—1984) його теорію для зонних і зв'язаних носіїв у напівпровідниках. Побудував динамічну теорію вібронних спектрів молекулярних кристалів (1966—1968), теорію зв'язаних станів фононів з електронними агрегатами в напівпровідниках (1971—1976). Передбачив електричний пінч-ефект у напівпровідниках (1964) та анізотропні розмірні ефекти в багатодолинних напівпровідниках і напівметалах (1965—1971). Запропонував механізми динамічного підсилення домішкової локалізації електронів низькочастотними фононами (1975), дефектоутворення й десорбції в ході автолокалізації (1979—1986), спонтанного порушення симетрії нелінійних структур внаслідок виродження електронного спектра (1981—1984). Побудував теорію швидкості автолокалізації й безвипромінювального захоплення носіїв струму та екситонів (1978—1986).

Дослідження К.Б. Толпиго присвячено динаміці ґратки, зонній теорії, теорії екситонів і домішкових центрів, оптиці кристалів, кінетичним явищам у напівпровідниках. У 1950—1961 рр. він істотно розвинув динамічну теорію коливань ґраток іонних кристалів. У ній уперше в моделі деформо-

ваних іонів було розглянуто оптичні коливання з урахуванням запізнювання взаємодії й одержано змішані стани фононів та електромагнітного поля, названі згодом поляритонами [16]. В 1952 р. він дав систематичний опис основних термоелектричних і термогальванічних явищ у напівпровідниках [17]. У 1956 р. К.Б. Толпиго і Е.Й. Рашба вивели закон залежності струму від напруги при біполярному дрейфі носіїв і побудували (1954—1965) теорію випрямлення струму в  $p-n$ -переходах та у контактах «метал — напівпровідник» при значних струмах інжекції [18], а також отримали низку важливих результатів у феноменологічній теорії напівпровідникових приладів [19]. В 1966—1988 рр. К.Б. Толпиго завідував теоретичним відділом Донецького фізико-технічного інституту АН УРСР. Тут він узагальнив динамічну теорію кристалічної ґратки на кристали інертних газів (у розгляд ефекту також включено квадрупольну деформацію атомних оболонок), обґрунтував і розвинув квазімолекулярну модель валентних кристалів, у якій розглядаються основні, екситонні й провідні стани кристала. Передбачив існування деформуючих низькосиметричних екситонів у лужно-галоїдних кристалах [20].

І.М. Дикман побудував (1947) кількісну теорію зовнішнього фотоефекту й вторинної електронної емісії з напівпровідників і передбачив (1954) важливий розмірний ефект, пов'язаний із квантуванням електронних орбіт у тонких пластинках.

З кінця 50-х років М.Ф. Дейген зі співробітниками проводив інтенсивні дослідження з радіоспектроскопії домішкових центрів у кристалах, був ініціатором створення, а в 1960—1977 рр. — керівником відділу радіоспектроскопії Інституту напівпровідників АН УРСР. Разом із В.Л. Вінецьким він розробив теорію агрегатних центрів забарвлення в кристалах [49]. Застосування теорії поляронів до метал-аміачних розчинів дозволило йому пояснити (1954) їх магнітні, оптичні та інші властивості [22]. Вперше було розвинено повну теорію спектрів подвійного електронно-ядерного резонансу, розглянуто його нові види (М.Ф. Дейген), запропоновано метод визначення структури енергетичних зон у кристалах за даними експериментального вимірювання подвійного електронно-ядерного резонансу (С.І. Пекар, М.Ф. Дейген, В.Г. Граčov, 1957—1967) [23]. Розроблено теорію параелектричного резонансу й запропоновано нові види акустичних параелектричних резонансів і новий механізм релаксації парамагнітних центрів за рахунок взаємодії спінів з плазмонами (М.Ф. Дейген, К.Д. Глинчук, 1970—1974) [24].

В 1963—1972 рр. М.Ф. Дейгеном зі співробітниками проведено глибокі дослідження електропольових ефектів в електронному парамагнітному резонансі, які дали можливість отримати нові параметри, що характеризують дефектні кристали, і виявити новий механізм розширення ліній електронного парамагнітного резонансу в кристалах. В 1974—1976 рр. він виконав роботи з вивчення взаємодії спінів домішкових іонів з плазмовими коли-

ваннями густини зарядів у напівпровідниках, обмінного та електропольового розсіянь носіїв на парамагнітних центрах. До цього ж часу належить і початок його широких досліджень магнітного резонансу в напівпровідниках і сегнетоелектриках. У результаті М.Ф. Дейгеном було створено власну наукову школу.

В 1959—1976 рр. І.М. Дикман і П.М. Томчук розвинули теорію кінетики електронів провідності й дірок з урахуванням електрон-електронної та електрон-діркової кулонівської взаємодії, обчислили внесок гарячих носіїв струму в показники заломлення електромагнітних хвиль у напівпровіднику, показали можливість керування електромагнітними хвилями в середовищі за допомогою зовнішніх електричних і магнітних полів. Вони ж побудували (1966—1976) теорію явищ переносу й колективних процесів у нерівноважній плазмі напівпровідників зі складним законом дисперсії енергії носіїв струму [25].

В 1964—1975 рр. Е.Й. Рашба, І.І. Бойко й З.С. Грибніков передбачили низку нових лінійних і нелінійних ефектів, пов'язаних із анізотропним перерозподілом носіїв струму по перерізу напівпровідника та з виснаженням напівпровідника носіями під дією протікаючого струму [26]. В 1965—1967 рр. Е.Й. Рашба та І.І. Бойко розвинули теорію електричних і фотоелектричних явищ у напівпровідниках з анізотропною провідністю. В 1965 р. З.С. Грибніков із В.І. Мельниковим побудував теорію розмірних ефектів для гарячих електронів [27]. Передбачив 1979 спільно з ін. від'ємну диференціальну провідність та осциляції струму у напівпровідниках. Розробив теорію багатознакової анізотропії провідності в багатодолинних напівпровідниках, зокрема з В.В. Мітиним — (1971) — теорію неоднорідних станів у сильному електричному полі. В 1985 р. ефект багатознакової анізотропії провідності в напівпровідниках (З.С. Грибніков, В.В. Мітин) визнано відкриттям. В 1970 р. з В.О. Кочелопом виявив незвичайну поведінку електронних напівпровідників у сильному електричному полі — їх охолодження [36]. І.І. Бойко й В.Й. Піпа створили (1967—1977) теорію явищ, пов'язаних із проходженням через тверде тіло сильних струмів. Досліджено пінч-ефект в електронно-дірковій плазмі, що приводить до сильної нелінійності вольт-амперних характеристик, і зміну провідності, яка відбувається внаслідок власного магнітоопору [28]. В результаті було істотно розвинено теорію електронно-діркової плазми в напівпровідниках. В.Й. Піпа отримав важливі результати в теорії електронфонної взаємодії та оптиці напівпровідників; зокрема, він започаткував тут новий напрям — концентраційно-деформаційну нестійкість кристалів.

В 1969—1970 рр. В.Л. Вінецький пояснив механізм провідності напівпровідника з урахуванням процесу утворення електрично активних дефектів (власне дефектної провідності та самокомпенсації провідності). Він увів (1970—1977) нові уявлення про механізми утворення радіаційних дефектів у напівпровідниках і діелектриках і побудував теорію їх нагромаджен-

ня, знайшов умови радіаційної стійкості й підвищеної чутливості неметалічних кристалів до ядерних випромінювань [29]. В.Л. Вінецький розробив також теорію біполяронів (два електрони локалізовані в спільній поляризаційній ямі) та вивів умови їх існування. Такі квазічастинки могли бути ототоженені з куперівськими парами з малою кореляційною довжиною в теорії надпровідності.

Важливий цикл робіт з оптики кристалів і теорії електронних станів у системах напівпровідникового типу виконав М.О. Кривоглаз, який у 1964—1988 рр. очолював відділ теорії неідеальних кристалів Інституту металофізики АН УРСР. Він побудував (1953—1970) теорію безвипромінювальних електронних переходів, теорію фононного й спінового розширення суто електронних ліній у домішкових спектрах [30; 31]. Розвинув (1956—1977) рентгенографічні методи дослідження недосконалостей кристалів, передбачив ефекти заглушення критичних флуктуацій далекодіючими силами (1963), появу квазіліній на рентгенограмі сильно спотворених кристалів (1968) [32], побудував теорію ефекту Мессбауера в неідеальних кристалах [33; 34], запропонував концепції флуктонів і рівноважних гетерогенних систем [35].

Таким чином, С.І. Пекаром та його науковою школою зроблено значний внесок у розвиток теоретичної фізики в Україні, а також у створення в Києві другого в Україні центру в галузі теорії твердого тіла. Президією НАН України засновано премією імені С.І. Пекара за видатні досягнення в цьому напрямі [36].

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Соломон Ісакович Пекар. К.: Наук. думка, 1988. 38 с.
2. Пекар С.И. Избранные труды. К.: Наук. думка, 1988. 511 с.
3. Памяти Соломона Исаковича Пекара. *Успехи физ. наук.* 1986. 149, Вып. 1. С. 161—162.
4. Пекар С.И. Автолокализация электрона в диэлектрической инверсионно поляризуемой среде. *Журнал эксперим. и теор. физики.* 1946. **16**. Вып. 4. С. 335—340.
5. Пекар С.И. Исследования по электронной теории кристаллов. М.; Л.: Гостехтеориздат, 1951. 256 с.
6. Буймистров В.М., Пекар С.И. Теория поляронов при произвольной силе связи между электроном и оптическими колебаниями решетки. *Журнал техн. физики.* 1957. **27**. Вып. 11. С. 2667—2669.
7. Пекар С.И. Теория поляронов в многодолинных кристаллах. 1. *Журнал эксперим. и теор. физики.* 1968. **55**. Вып. 5. С. 1997—2002.
8. Пекар С.И., Шека В.И., Дмитренко Г.В. Теория поляронов в многодолинных кристаллах. 2. *Журнал эксперим. и теор. физики.* 1972. **63**. Вып. 10. С. 1455.
9. Пекар С.И. Форма и температурная зависимость полос примесного поглощения света и люминесценции в твердых и жидких диэлектриках и полупроводниках. *Известия АН СССР. Серия физ.* 1954. **18**. Вып. 6. С. 712—713.
10. Пекар С.И. Кристаллооптика и добавочные световые волны. К.: Наук. думка, 1982. 296 с.

11. Бродин М.С., Пекар С.И. К экспериментальному доказательству существования добавочных аномальных световых волн в кристалле в области экситонного поглощения. *Журнал эксперим. и теор. физики*. 1960. **38**. Вып. 1. С. 74—81.
12. Толпыго К.Б., Урицкий З.С. К теории подвижности полярона. *Журнал эксперим. и теор. физики*. 1956. **30**. Вып. 5. С. 929—937.
13. Кочелап В.А., Пекар С.И. Теория спонтанной и стимулированной хемилюминесценции газов. К.: Наук. думка, 1986. 264 с.
14. Пекар С.И. Плотность энергии произвольного электромагнитного поля и диссипация в среде с дисперсией. *Физика твердого тела*. 1976. **18**. Вып. 7. С. 1884—1887.
15. Рашба Э.И. Комбинированный резонанс в полупроводниках. *Успехи физ. наук*. 1964. **84**. Вып. 4. С. 557—578.
16. Толпыго К.Б. Состояние теории поляризации идеальных ионных и валентных кристаллов. *Успехи физ. наук*. 1961. **74**. Вып. 2. С. 269—288.
17. Толпыго К.Б. Об уравнениях переноса в теории полупроводников. *Труды Ин-та физики АН УССР*. 1952. Вып. 3. С. 52—83.
18. Рашба Э.И., Толпыго К.Б. Прямая вольт-амперная характеристика плоскостно-го выпрямителя при значительных токах. *Журнал эксперим. и теор. физики*. 1956. **26**. Вып. 7. С. 1419—1427.
19. Толпыго К.Б. Неравновесные поверхностные процессы в полупроводниках и полупроводниковых приборах. М.: Сов.радио, 1977. 256 с.
20. Толпыго К.Б., Троицкая Е.П. Распространение динамической теории кристаллических решеток с деформированными атомами на кристаллы элементов нулевой группы. *Физика твердого тела*. 1971. **13**. Вып. 4. С. 1136—1144.
21. Дейген М.Ф., Винецкий В.Л. Квантовые состояния и оптические переходы центра. *Журнал эксперим. и теор. физики*. 1957. **32**. Вып. 2. С. 289—295.
22. Дейген М.Ф. Теория магнитных свойств металл-аммиачных растворов. *Журнал эксперим. и теор. физики*. 1954. **26**. Вып. 3. С. 293—299.
23. Грачев В.Г., Дейген М.Ф. Двойной электронно-ядерный резонанс примесных центров в кристаллах. *Успехи физ. наук*. 1977. **125**. Вып. 4. С. 631—663.
24. Дейген М.Ф., Глинчук М.Д. Параэлектрический резонанс нецентральных ионов. *Успехи физ. наук*. 1974. **114**. Вып. 2. С. 185—211.
25. Дыкман И.М., Томчук П.М. Явления переноса и флуктуации в полупроводниках. Киев: Наук. думка, 1981. 320 с.
26. Рашба Э.И., Грибников З.С., Кравченко В. Я. Анизотропные размерные эффекты в полупроводниках и полуметаллах. *Успехи физ. наук*. 1976. **119**. Вып. 1. С. 3—47.
27. Грибников З.С., Мельников В.И. Диффузия «горячих» электронов в n-p-гетеропереходах. *Физика твердого тела*. 1965. **7**. Вып. 7. С. 1997—2006.
28. Бойко И.И., Пипа В.И. Пинч-эффект в полупроводниках при сильном вырождении электронно-дырочной плазмы. *Физика твердого тела*. 1971. **13**. Вып. 2. С. 579—585.
29. Винецкий В.Л., Холодарь Г.А. Традиционная физика полупроводников. К.: Наук. думка, 1979. 335 с.
30. Кривоглаз М.А. Теория уширения спектральных линий и безызлучательных переходов в системах со слабой связью. *Журн. эксперим. и теор. физики*. 1965. **48**. Вып. 1. С. 310—326.
31. Кривоглаз М.А., Лезенсон Г.Ф. Теория примесного поглощения и испускания света в ферромагнитных и антиферромагнитных кристаллах. *Физика твердого тела*. 1967. **9**. Вып. 2. С. 457—468.
32. Кривоглаз М.А. Теория рассеяния рентгеновских лучей и тепловых нейтронов реальными кристаллами. М.: Наука, 1967. 336 с.
33. Кривоглаз М.А. Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах. К.: Наук. думка, 1983. 407 с.

34. Кривоглаз М.А. Диффузионное рассеяние рентгеновских лучей и нейтронов на флуктуационных неоднородностях в неидеальных кристаллах. К.: Наук. думка, 1984. 287 с.
35. Кривоглаз М.А. Флуктуационные состояния электронов. *Успехи физ. наук*. 1973. **111**. Вып. 4. С. 617—654.
36. Інститут фізики напівпровідників ім. В.Є. Лашкарьова НАН України. К.: Інтертек-друк, 2010. 450 с.
37. Зарубіжні вчені — вихідці з України в галузі фундаментальних і технічних наук. К.: Фенікс, 2017. 304 с.

Одержано 05.09.2017

*Ю.А. Храмов*, доктор физико-математических наук,  
профессор, заведующий отделом,  
ГУ «Институт исследований научно-технологического потенциала  
и истории науки им. Г.М. Доброва НАН Украины»,  
e-mail: fenixprint@ukr.net

**СОЛОМОН ИСААКОВИЧ ПЕКАР И ЕГО НАУЧНАЯ ШКОЛА**  
(*К 100-летию со дня рождения*)

Раскрыты характерные черты выдающегося украинского физика-теоретика С.И. Пекара как ученого, человека и педагога, то есть научного лидера, который положил начало созданию в Киеве в 50—70-х годах прошлого века крупной и мощной теоретической школы в области физики твердого тела. Показан вклад С.И. Пекара и его школы в физику. Приведен персональный состав школы.

**Ключевые слова:** *Институт физики, Институт физики полупроводников, полупроводники, полярон, автолокализация, кристаллы, кристаллическая решетка, экситон, поглощение света.*

*Yu.O. Khramov*, Dsc (Phys.-Math.), professor, department head,  
G.M. Dobrov Institute for Scientific and Technological Potential  
and Science History Studies of the NAS of Ukraine,  
e-mail: fenixprint@ukr.net

**SOLOMON ISAKOVYCH PEKAR AND HIS ACADEMIC SCHOOL**  
(*The 100th anniversary since the birthday*)

Distinctive qualities of S.I. Pekar, an outstanding Ukrainian theoretical physicist, as a scientist, a human and a teacher are shown, i. e. as a scientific leaders who laid the foundation for creating a large and powerful theoretical school in physics of solid body in Kyiv in 50—60s of the past century. The contribution of S.I. Pekar in his school is physics is highlighted. The personal composition of his school is given.

**Keywords:** *Institute of Physics, Institute of Semiconductor Physics, semiconductors, polaron, autolocalization, crystals, crystal lattice, exciton, absorption of light.*