



**Гусинін Валерій Павлович**  
доктор фіз.-мат. наук, завідувач відділу  
Інституту теоретичної фізики ім.  
М.М. Боголюбова НАН України, Київ



**Локтев Вадим Михайлович**  
академік НАН України, академік-  
секретар Відділення фізики і  
астрономії НАН України, Київ



**Шарапов Сергій Геннадійович**  
доктор фіз.-мат. наук, провідний  
науковий співробітник  
Інституту теоретичної фізики  
ім. М.М. Боголюбова НАН України,  
Київ

# ГРАФЕН: ПІК ІМЕНІ НОБЕЛЯ ПІДКОРЕНО. ЩО ДАЛІ?

"Новые направления возникают из новых идей. Но почему идеи рождаются в одних организациях и не рождаются в других? Потому что они появляются там, где для них созданы более благоприятные условия и финансовые возможности."  
/Академік Ж.І. Алфьоров/

*Нечасто в науковому житті світу з'являються публікації, що викликають ажіотаже і все ростуче захоплення фахової — і не тільки — спільноти, яка майже одразу одноставно визнає нобелівський рівень отриманих і оприлюднених результатів. Але таке все ж таки трапляється, і, нарешті, подія, що вже 2-3 роки була "на слуху", на яку з нетерпінням чекали, відбулася: 5 жовтня 2010 року Нобелівський комітет оголосив, що Нобелівська премія цього року з фізики присуджена вихідцям з колишнього СРСР Андре Гейму (Andre Geim) та Костянтину Новосьолову (Konstantin Novoselov) за проривні експерименти з новоствореним двовимірним матеріалом — графеном. Це 108 присудження найпрестижнішої у світі наукової нагороди, яку, зазвичай, у грудні того ж року вручає в Стокгольмі король Швеції, а названі науковці відкрили другий десяток нобелівських лауреатів з фізики, що мають російське походження.*

**А**ндре Гейм та Костянтин Новосьолов, які в різні роки закінчили один із найкращих вищих навчальних закладів світу — Московський фізико-технічний інститут (МФТІ), і які тепер обидва працюють в університеті Манчестера (Велика Британія), зробили вирішальний внесок в отримання, ідентифікацію та з'ясування основних фізичних характеристик нового і до того часу практично невідомого широкому загалу фахівців матеріалу, що отримав назву *графен* [1]. Цей реально створений тільки шість років тому матеріал є лише одношаровим (а точніше — товщиною в один атом) вуглецевим кристалом, структура якого має гексагональну або стільникову ґратку. Поява справжньої, доступної для вимірювань двовимірної кристалічної системи викликало неабияке хвилювання в науковому світі, оскільки вважалося незаперечним, що існування подібних систем неможливе в принципі. Проте головним виявилось навіть не стільки саме відкриття нового матеріалу, скільки те, що, як досить швидко було встановлено, він є не тільки окремим фізичним об'єктом, а й має цілу низку виняткових властивостей, які роблять його надзвичайно цікавим і для подальших фундаментальних досліджень, і для майбутніх широких застосувань.

Серед властивостей графену, які найбільше вражають, зрозумілих для широкого загалу і, на перший погляд, дивних, можна, насамперед, відзначити те, що він найміцніший серед усіх відомих кристалічних речовин, його теплопровідність на порядок вища за теплопровідність міді, а електрони у графені чутливіші до прикладеного електричного поля, ніж найширше застосовувані напівпровідники. Причому — і це теж вельми важливо — його електронні властивості мають глибокі аналогії з фізикою елементарних частинок і квантовою теорією поля через те, що квазічастинкові електронні збудження у стільникових ґратках поводять себе як безмасові частинки, завдяки чому стають у певному сенсі подібними до таких частинок як нейтрино, або навіть квантів світла — фотонів.

## Curriculum Vitae

Андре Гейм (Андрій Костянтинівич Гейм) народився 1958 р. в Сочі в родині інженерів, що мала німецькі корені. Зараз він є підданим Нідерландів. У 1976-1982 рр. А. Гейм навчався в МФТІ, після закінчення якого працював в Інституті фізики твердого тіла РАН в Чорноголовці, де 1987 р. отримав ступінь кандидата фізико-математичних наук. Звідти він переїхав до Європи, почавши працювати як фі-

зик-експериментатор у Нотінгемському університеті (Англія) і університеті Бат (Англія), Копенгагенському університеті, а згодом став професором Радбурзького університету міста Наймегена в Нідерландах. З 2001 р. він обіймає дуже престижну посаду професора Ленгворсі в Манчестерському університеті. Ця професорська позиція з експериментальної фізики була заснована ще у 1874 р. Е. Р. Ленгворсі (E. R. Langworthy), який для збереження цієї посади в університеті та її фінансової підтримки залишив своїм нащадкам у спадок велику на той час суму у 10000 фунтів. Символічно, що попередниками А. Гейма на цій посаді були такі видатні фізики, як Нобелівські лауреати Ернст Резерфорд (Ernest Rutherford — премія з хімії 1908 р.), Лоуренс Брегг (Lawrence Bragg — премія з фізики 1915 р.) і Патрік Блекетт (Patrick Blackett — премія з фізики 1948 р.). Може здаватися фантастично, але А. Гейму вдалося зберегти цю історичну традицію, також ставши Нобелівським лауреатом і посівши серед цих історичних славетних постатей гідне місце.

З 2002 р. А. Гейм є директором Центру мезонауки та нанотехнологій при Манчестерському університеті. Серед багатьох серйозних і престижних міжнародних нагород і відзнак А. Гейма варто згадати лише одну — так звану "Шнобелівську" премію (Ig Nobel Prize — від латинського слова ignoble (неблагородний)). Її він отримав у 2000 р., поділивши з одним із найвідоміших матфізиків сьогодення Майклом Беррі (Michael Berry) з Бристольського університету (Англія) за наочну демонстрацію великої сили, що може діяти з боку магнітного поля на немагнітні речовини, яку він продемонстрував на прикладі живої істоти, дослідивши діамантну левітацію жабеняти. І взагалі, будучи дуже оригінальною людиною з яскраво вираженими лідерськими рисами, А. Гейм має добре почуття гумору, що видно, наприклад, із публікації, де його співавтором виступає хом'як на ім'я Тіша (H.A.M.S. ter Tisha).

Другий лауреат, Костянтин Сергійович Новосьолов, народився 1974 р. у невеликому уральському місті Нижньому Тагілі і зараз зберігає російське громадянство поряд із британським підданством. У 1991 р. після закінчення нижньогагільського ліцею також вступив до МФТІ, який закінчив 1997 р. Два роки по тому він працював в Інституті проблем технології мікроелектроніки РАН (Чорноголовка). У 1999 р. К. Новосьолов переїздить до Нідерландів, де стає аспірантом А. Гей-



Андре Гейм, Костянтин Новосьолов

ма в університеті Наймегена, а 2001 р. вони вдвох починають свою діяльність у Манчестерському університеті. PhD ступінь К. Новосьолов отримав 2004 р. в лабораторії сильних магнітних полів університету Наймегена, виконавши блискучі експериментальні дослідження руху доменної стінки, яка переповзає через точковий дефект у наноманетику. Як бачимо, його дисертація не мала нічого спільного з майбутньою роботою з пошуків максимально тонких фізичних середовищ. У 2008 р. К. Новосьолов разом з А. Геймом отримав премію "Єврофізика" за відкриття графену і вимірювання його фізичних властивостей. 36-річний К. Новосьолов — наймолодший Нобелівський лауреат із фізики після Брайана Джозефсона (Brian Josephson — премія 1973 р.), який був удостоєний цієї найвищої наукової нагороди у 33-річному віці.

Закінчуючи короткий життєпис новоспечених лауреатів, які досягли нобелівського олімпу, не можна оминути їхню молодість — особливо К. Новосьолова, а також притаманну їм обом рідкісну працездатність. Як свідчать їхні колеги, які добре знають і співпрацюють з А. Геймом і К. Новосьоловим, цих дослідників по-справжньому цікавить лише наука, а їхнє вміння концентруватись на розв'язанні поставленої задачі вражає навіть запеклих трудоголиків.

#### Історія отримання графену

У той час, коли сучасні передові наукові дослідження вельми затратні та складні (згадаймо хоча б Великий адронний колайдер, інші прискорювачі, телескопи тощо), здається дивовижним, що серйозне фундаментальне досягнення у фізиці могло бути зроблено за допомогою простого і навіть дотепного методу — прямим

застосуванням звичайного скотчу. Але у 2004 р. К. Новосьолов і А. Гейм із колегами саме за допомогою цієї липкої стрічки змогли зробити своє відкриття, що дуже швидко стало загальноновизнаним та істотно вплинуло на ситуацію у фізиці конденсованого стану [2]. Почавши працювати з графітовими зразками завтовшки приблизно 1 мм і добре знаючи про дуже слабку міжшарову взаємодію в графіті, вони поставили за мету отримати якомога тонші графітові шари. Для цього ці зразки приклеювали до звичайного скотчу, і від них суто механічно відривали ще тонші шари, що в певній кількості так чи інакше утворювались на скотчі. Потім останній обережно видаляли з налипими тонкими фрагментами графіту, які, зрозуміло, виявлялись різношаровими. Після декількох повторень цієї нескладної процедури деякі шари графіту виявлялись настільки тонкими, що могли вмішувати всього кілька атомних шарів, в тому числі — один (!), що наперед не було очевидним і вимагало спеціальної перевірки.

Таким ручним способом одержані плівкові шматочки зі скінченням і достатньо малим числом шарів і були бажаними зразками графену, які тепер так і звуться: *одно-, дво-, тришарові* (або *кількашарові*) тощо (включаючи багатшарові) графенові плівки. Для подальшого дослідження — зокрема, встановлення істинної товщини — їх розміщали на підкладці з кремнію, верхній шар якої був ізолятором з оксиду кремнію  $\text{SiO}_2$ . Тоді як товсті плівки з графіту (товщиною більше 3 нм та розміром, що перевищує 100 мікрон) можна побачити навіть неозброєним оком (фактично це є слід на папері від будь-якого чорного олівця), справжній графен, плівки якого за

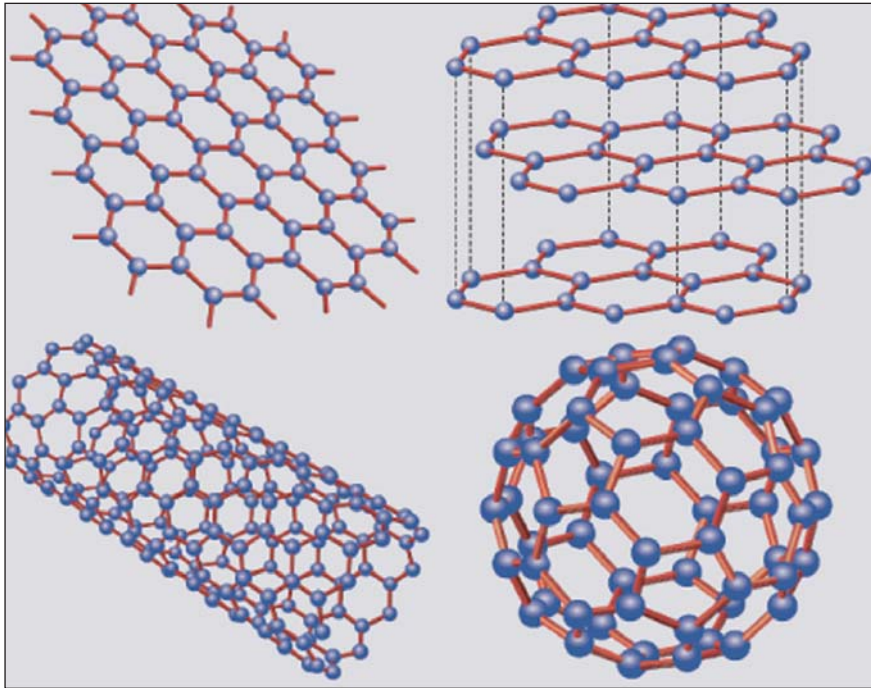


Рис. 1. Графен, графіт, вуглецева нанотрубка, фулерен (малюнок з [3]).

розміром не перевищували 10 мікрон, можна побачити лише за допомогою оптичного мікроскопу. Більше того, через явище інтерференції світла спостереження графену дуже залежить не тільки від його товщини, а й від того, якої товщини є верхній ізоляційний шар підкладки. Як з'ясували пізніше, дослідникам неабияк пощастило, що товщина шару з оксиду кремнію дорівнювала приблизно 300 нм, оскільки саме така товщина найсприятливіша з погляду оптичних спостережень.

Для електричних вимірювань цього, звичайно, замало, і до отриманих графенових плівочок довжиною у декілька мікрон треба було підвести металеві контакти, тобто виконати дії, які вимагають використання електронно-променевої літографії, або методики, що добре розроблена і широко використовується у виробництві напівпровідникових мікросхем. Проте мали місце і певні експериментальні труднощі, бо в цьому разі йшлося про поки що невідомі для літографії плівкові зразки, товщина яких робила їх квантовими об'єктами.

Можна припустити, що, приступаючи до виконання описаних процедур, А. Гейм і К. Новосьолов свідомо чи несвідомо йшли проти основоположних висновків таких всесвітньо відомих наукових авторитетів як теоретики Лев Ландау та Рудольф Паєрлс (Rudolf Peierls), які математично строго довели, що двовимірні кристали не можуть бути термодинамічно стабільними, що, своєю чергою, повністю забороняє їх існування у вільному стані. Таке твердження вже кілька десятиліть

вважалося абсолютно непорушним. І справді, нескладний розрахунок, наведений у багатьох підручниках, переконливо демонструє, що теплові флуктуації кристалічної ґратки швидко призводять до таких зміщень атомів з положень їхньої рівноваги, які за порядком величини збігаються з між-атомною відстанню у вихідній ґратці. Між тим графен, отриманий, нехай і дещо кустарно, з експериментальною вишуканістю, достойною усядкування, існував як суто двовимірне фізичне середовище, а отже, перед фахівцями постало питання — чому?

Воно отримало й експериментальну, і теоретичну відповіді, які полягали у наступному: як з'ясувалося трохи пізніше, вільний графен, будучи загалом справді плоским, має трохи нерівну, "зім'яту" поверхню. Іншою мовою, його атоми не лежать в одній площині, а виходять із неї на невеликі відстані, залишаючись при цьому дуже сильно зв'язаними між собою саме в просторі площини. В результаті, поверхня графену вкрита, образно кажучи, випадково розташованими пагорбами і долинами, які отримали назву *ripples* (ripples). Якщо строго, то останні, будучи наслідками спонтанних зміщень атомів вуглецю у *третьій* вимір, створюють ефективну "товщину" одноатомних шарів, яка, своєю чергою, породжує їх поперечну відносно площини механічну жорсткість, і тим самим забезпечує уникнення обмеження Ландау-Паєрлса, що залишається справедливим для строго двовимірних систем. Водночас, що яскраво довели численні експерименти, одношаровий

графен, незважаючи на згадану деяку тривимірність, у багатьох, а точніше — майже у всіх своїх проявах поводить себе як суто двовимірний кристал.

З теоретичного погляду, одношарова стільникова структура графена, яка насправді відповідає бджолиним стільникам, робить його "прабатьком" майже усіх сполук, що базуються на вуглеці та мають хімічні зв'язки, близькі до  $sp^2$  (див. Рис. 1): графіт — це фактично стос великої кількості шарів графену; вуглецеві нанотрубки є утвореннями зі згорнутого у рулони різного діаметру одного чи декількох шарів графену; фулерени, або "бакіболи", — ніщо інше, ніж нанорозмірні сфероподібні молекули, поверхня яких також фактично складається з графенових площин. Усі ці алотропні форми вуглецю були винайдені і непогано вивчені набагато раніше за графен. Вони вже мають і багато застосувань, але всі їхні електричні, магнітні та механічні властивості походять, як тепер з'ясувалося, з відповідних властивостей графену. Унікальні механічні властивості графену (а саме: його неперевершена міцність) дуже яскраво і переконливо проілюстровані гіпотетичним прикладом, поданим на Рис. 2.

Переходячи до електронних властивостей графену, які визначають, зокрема, і його оптичні властивості, відзначимо, що гамак, зображений на Рис. 2, був би невидимий, оскільки графен поглинає лише 2.3% світла, яке падає на нього, незалежно від довжини світлової хвилі.

### Особливості електронної фізики графену

Переважаюча більшість унікальних властивостей графену виникає, як уже зазначено, з поведінки в ньому електронів. У цьому разі їх рух у стільникової ґратці, що має два нееквівалентні атоми в елементарній комірці, призводить до того, що в кристалі виникають дві зони  $\pi$  і  $\pi^*$  — валентна зона і зона провідності, відповідно (див. Рис. 3).

Ці зони заповнюються вільними  $\pi$ -електронами, які відповідно до принципу Паулі, повинні відрізнитися величиною хвильового вектора і двома значеннями проекції спіну. Оскільки кількість станів у кожній зоні дорівнює кількості електронів, валентна зона виявляється заповненою повністю, тоді як зона провідності залишається пустою. Рівень Фермі  $\epsilon_F$ , як видно з Рис. 3, розташовується в точках, що отримали назву *діраківських*, шести подвійних конусів. Закон дисперсії  $\epsilon(k)$  в околі цих точок, або залежність

енергії квазічастинкових збуджень від хвильового вектора  $\mathbf{k}$ , у графені виявляється лінійним:  $\epsilon(\mathbf{k})=h v_F |\mathbf{k}|$  де нахил діраківських конусів задається швидкістю Фермі  $v_F$  ( $h=h/2\pi$ , де  $h$  — стала Планка). Така ж залежність енергії від імпульсу є характерною для елементарних частинок з нульовою масою, де, однак, замість швидкості Фермі  $v_F$  стоїть швидкість світла  $c$ , яка є приблизно в 300 разів більшою.

Можна додати, що завдяки лінійній дисперсії густина станів у діраківських точках двовимірної системи також дорівнює нулеві, а отже, провідність ідеального графену є дуже низькою, порядку кванта провідності  $e^2/h$  ( $e$  — заряд електрона). Дивовижно не

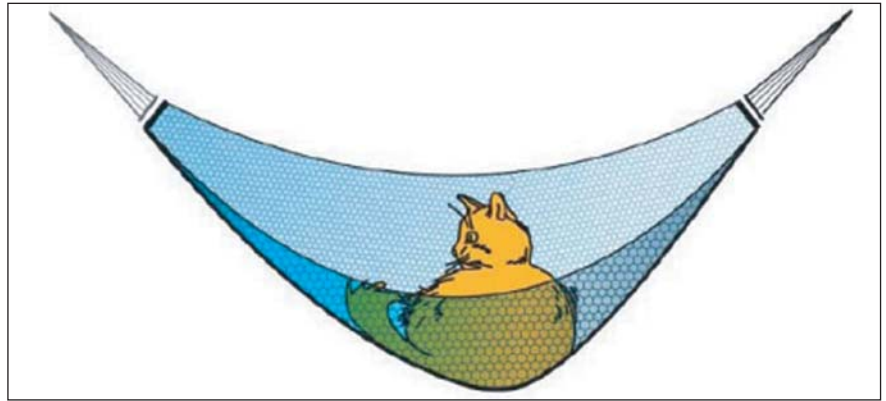


Рис. 2. Гамак із одношарового графену площею  $1 \text{ м}^2$ , маса якого виявляється меншою за міліграм (стільки приблизно важить вус kota), може витримати цілого kota вагою 4 кг. Якби вдалося зробити такий одношаровий гамак із найміцнішої сталі, то він би витримав вагу тільки у 40 грамів (малюнок з [1])

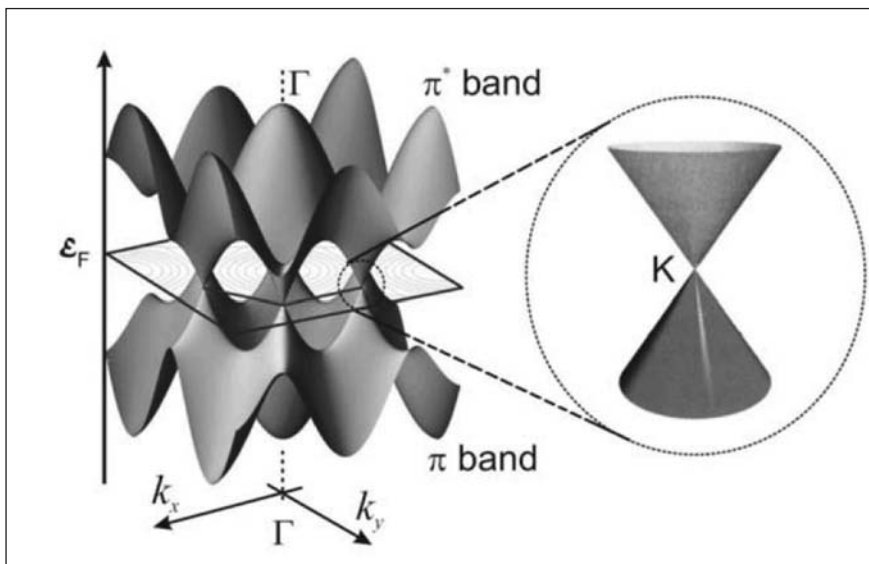


Рис. 3. Зонна структура графену та формування конусу Дірака. Показані напрямки хвильового вектора  $\mathbf{k}$  в площині та положення рівня Фермі  $\epsilon_F$  в діраківських точках перетину К або змикання зон (малюнок з [4]).

стільки те, що провідність є малою величиною, скільки її та, звичайно, опору  $R = \sigma^{-1}$  скінченні значення, незважаючи на відсутність станів на рівні Фермі.

Вперше безмасовий характер дисперсії електронів у двовимірних стільникових ґратках, з яких складається графіт, був встановлений у 1947 р. канадським теоретиком Філіпом Расселом Воллесом (Philip Russell Wallace). Проте у ті часи ніхто не сумнівався, що впорядковане конденсоване середовище завтовшки в один атомний шар не може існувати, тому Р. Воллес розглядав стільникову площину лише як вихідну модель для вивчення електронних властивостей графіту, які були істотним складником вкрай актуальних у ті далекі роки досліджень різноманітних ядерних реакторів, де як уповільнювач використовувався саме цей матеріал. Набагато пізніше, у 1984 р., тобто рівно за 20 ро-

ків до фактичного отримання графену, інший канадський теоретик Гордон Семеновф (Gordon Semenoff) довів, що його (графену) електронний спектр, або спектр двовимірної стільникової ґратки, має конусоподібний вигляд і добре описується за допомогою двовимірного безмасового рівняння Дірака, якщо перейти до довгохвильового (континуального) наближення. Як неважко здогадатися, швидкість світла  $c$ , яка входить у це рівняння, має бути замінена на швидкість  $v_F$ . Такий результат впливав безпосередньо з теоретичних розрахунків, які не викликали заперечень, але спиралися на модель невазємодіючих електронів (так зване одноелектронне наближення). Вона не була наперед очевидною, а крім того, не виключали, що, скажімо, міжелектронна взаємодія могла змінити спектр, породивши в ньому щілину, що, інакше кажучи, відповідає появи

або генерації маси квазічастинки. Тому перед творцями графену й іншими його дослідниками постала експериментальна проблема перевірити, якими насправді є електрони в графені. Так чи інакше, все це зводилося до пошуку відповіді на питання:

1) чи наспраді вони безмасові, а їхній рух описується рівнянням, яке для релятивістських частинок має назву рівняння Дірака-Вейля, і за допомогою якого описують рух нейтрино у фізиці високих енергій;

2) чи, незважаючи на теоретичні передбачення, рух квазічастинки у графені, як у більшості конденсованих середовищ, описується нерелятивістською квантовою механікою?

Саме це й змогли незалежно встановити А. Гейм з К. Новосьоловим та їхні співатори [5], а також група Філіпа Кіма (Philip Kim) з університету Колумбії (США), що теж експериментувала з одношаровим графеном [6]. Пропускаючи електричний струм через графенові стрічки, експериментатори незаперечно встановили, що здатність вільних електронів до руху (так звана *рухливість* носіїв) набагато (майже на два порядки) перевищує таку здатність у найбільш використовуваних в електроніці кремнієвих напівпровідниках. В абсолютних цифрах рухливість чистого (без домішок) графену може досягти  $2 \cdot 10^5 \text{ см}^2/\text{В сек}$ , що робить його найперспективнішим матеріалом для створення на його основі електронних пристроїв високої частоти.

Ще однією перевагою графену і приладів, які вже розробляють і розроблятимуть на його основі, до чого також безпосередньо приклалися й А. Гейм, і К. Новосьолов, є те, що положенням рівня Фермі в ньому дуже зручно керувати зовнішньою електричною напругою, прикладеною до підкладки з напівпровідника (зокре-



Рис. 4. Загальна схема вимірювання ефекту Холла (згори), а також вигляд експериментальних кривих холлівського опору з характерними поличками, що відповідають його квантуванню у графені (малюнок з [6]).

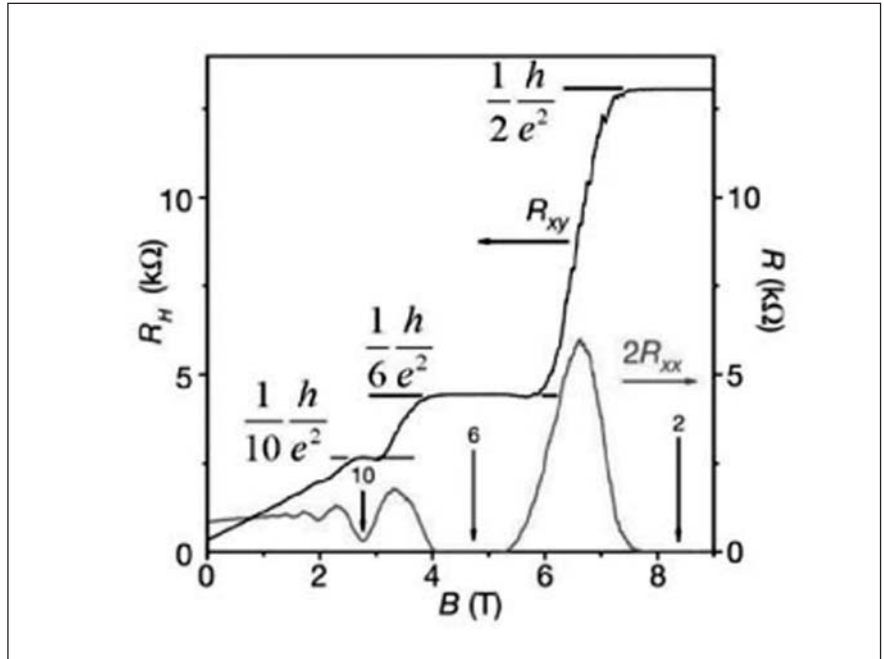
ма, кремнію з шаром ізолятора), на якій лежить графеновий зразок (польовий транзисторний ефект). Цим легко інжектувати в графен носії необхідного знака.

Проте навіть цих, безперечно, цікавих і важливих результатів, які, відкривали певні перспективи для зародження вуглецевої наноелектроніки, було замало для з'ясування одного з ключових питань, зазначених вище: яким же, врешті-решт, рівнянням можна описати рух електронів у графені. Відповідь на нього була знайдена, коли до графенових зразків було прикладене разом з електричним ще одне зовнішнє поле — магнітне, яке закручувало електрони.

### Ефект Холла в графені

Фактично, йшлося про вивчення в графені ефекту Холла, який, як відомо, створює додаткові можливості для вимірювання фізичних характеристик квазічастинок. Зокрема, інформацію про властивості електронів можна діставати, вивчаючи залежність електричного опору від магнітного поля (чи магнітної індукції), або, у випадку графену, ще й від густини додаткових електронів/дірок. Як ми вже відзначали, цю густину дуже просто змінювати, прикладаючи електричну напругу того чи іншого знака до підкладки з кремнію, на якій лежить графеновий зразок.

У результаті проведених детальних експериментів головною ознакою різниці між графеном та звичайними напівпровідниками стала саме незвичайна картина ефекту Холла, який спостерігали у графені. Нагадаємо, що класичний ефект Холла, відкритий у 1879 р., полягає у тому, що струм, який тече у провіднику в присутності перпендикулярного до напрямку струму магнітного поля, призводить до появи напруги вздовж напрямку, перпен-



дикулярного до напрямків струму і поля (див. Рис. 4). Відношення цієї напруги до струму в цьому ж напрямку зветься опором Холла. Більше ніж через століття німецький експериментатор Клаус фон Клітцинг (Klaus von Klitzing — Нобелівська премія з фізики 1985 р.) несподівано встановив, що у напівпровіднику при температурах, близьких до абсолютного нуля, холлівський опір виявляється квантованим, приймаючи значення  $R_H = h/\nu e^2$  (де  $\nu$  — додатне ціле число, або так званий *фактор заповнення*). Холлівське квантування виявилось настільки точним, що цей, вже *цілочисельний* квантовий ефект Холла (КЕХ), стали використовувати як стандарт для прецизійних вимірювань опору.

У той час, коли групи Гейма-Новосьолова та Ф. Кіма досліджували КЕХ у графені, два автори (В.Г. і С.Ш.) цієї статті, спираючись на дослідження, що велися в Інституті теоретичної фізики ім. М.М. Боголюбова НАН України з так званого *ефекту магнітного каталізу* в квантовій теорії поля з безмасовими ферміонами, вивчали холлівську провідність саме графену. З виконаних розрахунків випливало, що для діраківських електронів у графені, на відміну від звичайних, фактор заповнення має бути не довільним цілим, а тільки *подвоєним непарним*, тобто  $\nu=2(2n+1)$ , або 2, 6, 10, ..., де  $n=0, 1, 2, \dots$  [7].

Це пов'язано з тим, що послідовність дискретних у зовнішньому магнітному полі рівнів енергії (*рівні Ландау*, які з'являються у полі і на яких містяться електрони) у графені істотно відрізняється від послідовності подібних рівнів у металах і напівпровідни-

ках. Якщо в останніх вона еквідистантна, або осциляторна, і пропорційна величині прикладеного поля, то у діраківському випадку, де спостережувана залежність коренева, — це не так. (Див. Рис. 5)

Іншою унікальною властивістю графену є наявність у його спектрі рівня з нульовою енергією, який належить одночасно обом — і валентній, і провідній — зонам, саме існування якого й зумовлює нестандартний КЕХ у графені.

Передбачена поведінка холлівського опору і була спостережена обома експериментальними групами [5, 6]. Цим були усунуті будь-які сумніви щодо того, якими квазічастинками є електрони у одношаровому графені, оскільки навіть у двошаровому графені квантування цієї провідності має зовсім інший характер. Тому тепер кожний із графенів (маємо на увазі графени, що відрізняються числом шарів) розглядають як окремий оригінальний об'єкт, властивості якого дуже активно досліджуються на предмет порівняння один із одним і можливого оптимального застосування в техніці.

Підсумовуючи, підкреслимо, що заслуга А. Гейма і К. Новосьолова не зводиться і не може бути зведена лише до факту першого отримання графену, тому що їм належить також відкриття і піонерські дослідження його численних дуже незвичайних властивостей — величезної рухливості квазічастинок, мінімальної провідності, квантового ефекту Холла, надзвичайної прозорості тощо. Принципово важливо і те, що графен дав змогу досліджувати ефекти, притаманні релятивістській фізиці не за допомогою дуже дорогих прис-

корювачів, а у звичайних, відносно недорогих лабораторіях для досліджень з фізики твердого тіла. Яскравим прикладом цього став передбачений ще у 1929 р. парадокс Клейна (Oscar Klein), або аномально високої ймовірності тунелювання релятивістських частинок крізь потенціальні бар'єри, реалізації якого у графені присвячена теоретична робота [8], і який справді спостерігала у 2009 р. група Ф. Кіма. Чекає на своє спостереження ефект Швінгера (Julian Schwinger), який полягає у народженні з вакууму пар релятивістських частинок у присутності електричного поля.

Що стосується найцікавішого з них — одношарового графену, то, як з'ясувалося дещо пізніше і відображено у посиланнях робіт [5, 6], ще одна міжнародна група теоретиків у складі американця Антоніо Кастро Нето (Antonio Castro Neto), іспанця Франциско Гуїнея (Francisco Guinea) і португальця Нуно Мігеля Переша (Nuno Miguel Peres) незалежно прийшла до того самого висновку щодо аномального КЕХ у графені [9], розглядаючи поведінку так званої фази Беррі (відкритої згадуваним вище М. Беррі). Знову-таки, через діраківський характер квазічастинок квантово-механічна хвильова функція квазічастинок у графені не переходить сама в себе при обертанні на кут  $360^\circ$ , змінюючи свій знак, що, як легко здогадатися, тотожно зміні її фази на число, з чого теж можна прийти до висновку, що КЕХ у графені має бути відмінним від відомого [3]. Далі у спільній роботі обох згаданих експериментальних груп у 2007 р. було продемонстровано, що КЕХ у графені можна спостерігати навіть при кімнатних температурах, але зазвичай КЕХ вимагає не стільки низьких, скільки наднизьких температур. Така властивість графену є ще одним прямим наслідком релятивістської поведінки його електронів, забезпечуючи велику відстань між рівнями Ландау з невисокими номерами, яка у тисячі (!) разів більша, ніж у звичайних матеріалах. Останнє дало змогу деяким експериментаторам стверджувати, що квантування Ландау в графені можна спостерігати навіть у магнітному полі Землі.

Оскільки визначення фази Беррі квантових магнітних осциляцій є одним із методів ідентифікації основних характеристик електронної підсистеми провідних матеріалів, буде слушно згадати розрахунки 1999 р. такої фази у графіті українських теоретиків Г.П. Микитика та Ю.В. Шарлая з Фізико-технічного інституту низьких температур ім. Б.І. Веркіна НАН Ук-

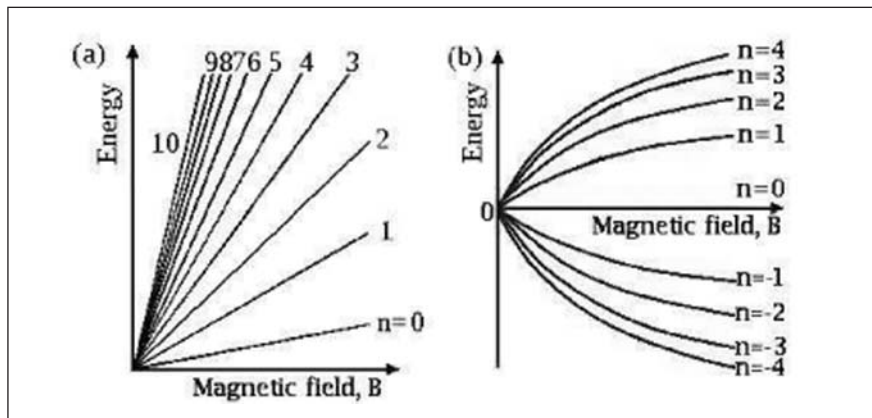


Рис. 5. Рівні Ландау для (а) електронів у звичайній двовимірній системі (б) графену.

раїни (Харків), що цитуються в обох пріоритетних з погляду досліджень графену статтях [5, 6].

#### Очікувані перспективи і прогнози

Щоб наочно уявити обсяг експериментальних і теоретичних досліджень, який був виконаний за шість років, що минули з моменту отримання графену, і спонукуваний його відкриттям, достатньо подивитись на Рис. 6. Зокрема, останні результати зі спостереження *дробового* КЕХ показують [10], що графен зайняв місце одного з найважливіших об'єктів саме фундаментальних досліджень. Проте, попри такий теперішній статус графену, очевидно, що дуже велику увагу приділятимуть його можливим практичним застосуванням. Можна сподіватись на створення працездатних і таких, що вироблятимуть у промислових умовах, графенових транзисторів. Скажімо, нещодавно прозорий лист з графену розміром понад 70 см (!) став основою міцного сенсорного екрана [11]. Графен може бути використаний також як ефективний газовий сенсор, який відчуває присутність навіть однієї молекули газу на його поверхні [12]. Нові композитні матеріали на основі графену можуть знайти застосування в космічних супутниках і літаках. Як швидко здійсниться мрія "*graphenium inside*", або з'явиться графеновий процесор, і скільки буде можливих практичних застосувань не тільки графену, а й його похідних (гідрогенізованого графену (СН) — *графану*, *флорографену* (ССІ) тощо) покажуть майбутні дослідження, які з інтенсивним наростанням тривають у лабораторіях усіх розвинених країн світу.

Додамо також, що можливе виникнення сплеску нових глибоких досліджень кількшарових графенових плівок (*few-layer graphene*), рухливість носіїв в яких за певних умов мо-

же помітно перевищувати її в одношаровому графені. Окреме місце посідає вивчення двошарового графену, де відносно легко можна не тільки створювати таку важливу для транзисторного ефекту енергетичну щільну в електронному спектрі, а й керувати її величиною за допомогою зовнішнього електричного поля. Такі задачі постають і перед експериментаторами, і перед теоретиками, причому й тими, хто цікавиться фундаментальними питаннями, й тими, хто бажає розробляти нові зразки напівпровідникової техніки.

Нобелівська премія витягла графен на перші шпальти не тільки наукових видань, — він і його винахідники стали героями численних ЗМІ та Інтернету, що викликало неабиякий інтерес до нового матеріалу широкою непрофесійною аудиторією. Якщо ж говорити про професіоналів, то теоретичні дослідження, які так чи інакше стосувалися графеноподібних систем, тривали ще до фактичного відкриття самого графену як розвинення результатів, отриманих згаданим вище Г. Семеновим. Без зайвого перебільшення, тут, крім вище згаданих, також можна говорити про незаперечний внесок у фізику релятивістських електронних систем таких українських теоретиків як Е.В. Горбар, В.А. Міранський, І.В. Криве, Ю.О. Ситенко, І.А. Шовковий та інші, які тепер залучені до активних досліджень графену.

Але справжній графеновий бум розпочався наприкінці 2005 р. після виходу статей [5,6]. На щастя, не оминув він і Україну, де незвичайні властивості графену не могли не викликати цікавості та захоплення у багатьох теоретиків. Ф.Ф. Васько, В.О. Кочелап, Л.І. Малишева, О.І. Оніпко, Ю.В. Скрипник, М.В. Стріха, В.О. Ямпольський — далеко не повний список українських фізиків, які в останні

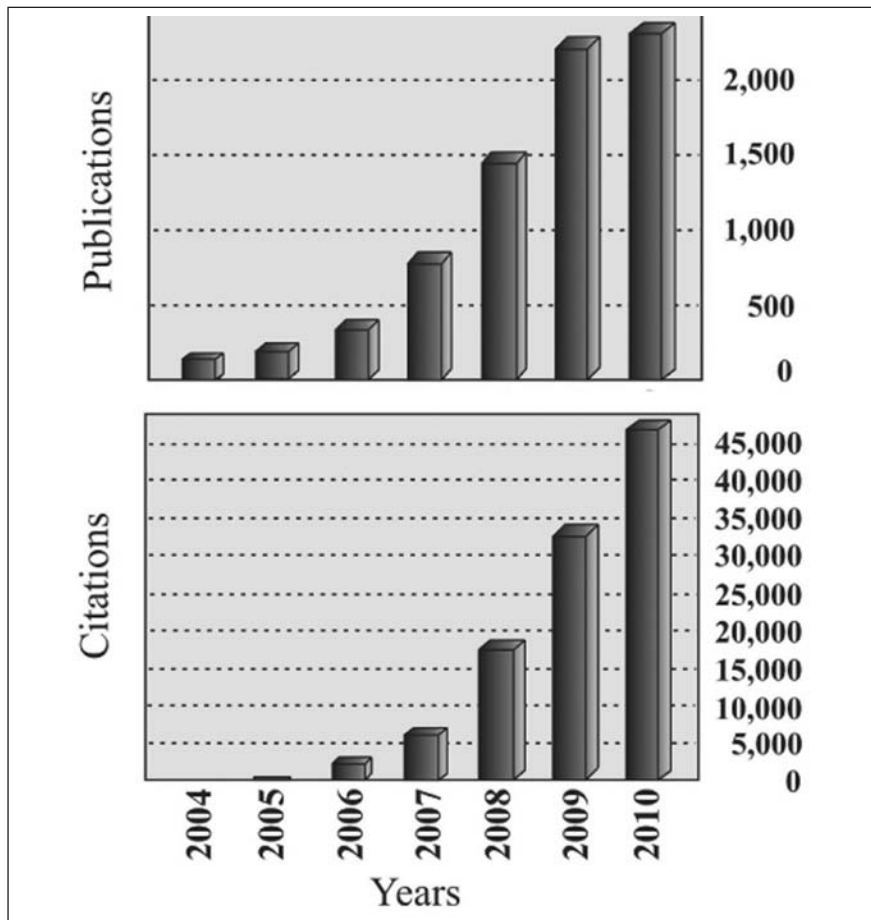


Рис. 6. Загальна кількість публікацій з графенової тематики та їх цитування у 2004-2010 рр. у світових виданнях, що входять до так званого списку ISI, або списку Філадельфійського інституту наукової інформації. (Використана база даних Web of Science).

роки мали публікації про графен і його властивості.

Навіть із нашого відносно неповного повідомлення, ініційованого такою екстраординарною подією як присудження Нобелівської премії, добре видно, що в Україні, якщо не всі, то принаймні переважна більшість досліджень із графену має теоретичний характер. Фізико-теорети-

ки, включаючи авторів цієї статті, не маючи змоги співпрацювати з вітчизняними експериментальними групами, вимушені шукати прямі контакти з зарубіжними експериментаторами, беручи, зокрема, участь у спільних грантах. Це дозволяє швидко, ще до публікації у наукових журналах, дізнатися про нові вимірювання і певною мірою компенсує неможливість із

фінансових причин відвідувати міжнародні конференції. Водночас, включення українських фізиків-експериментаторів до світових досліджень графенів і споріднених сполук, які отримали загальну назву *релятивістськи-подібні конденсовані системи*, було б не тільки бажаним, а й необхідним. Багато експертів прогнозують, що початок XXI-го століття, ознаменований потужним науковим поштовхом, яке породило відкриття графену, за багатьма ознаками свідчить про започаткування нового етапу в розвитку фізики, а саме: народження вуглецевої електроніки, яка, напевно, має прийти на зміну кремнієвій, зокрема і напівпровідниковій електроніці.

Колись, близько 20-ти років тому, бажаючи зіставити напівпровідникову промисловість із металургією, винахідник напівпровідникових гетероструктур Ж.І. Алфьоров (Нобелівська премія 2000 р.), для побудови яких використано арсенід галію, порівняв його з золотом, решту напівпровідників, окрім кремнію, з кольоровими металами, а кремній — із залізом. Можна за цією аналогією піти далі, припустивши, що графену випаде доля стати діамантом напівпровідникової техніки. Причому і в прямому, й у переносному значенні: перше випливає з того, що хімічний зв'язок  $sp^2$  в графені такий міцний, як і  $sp^3$  в алмазі; а друге — з найсміливіших прогнозів, які обіцяють зближення принципів роботи майбутніх штучно створених вуглецевих приладів із принципами роботи живих організмів, де, як відомо, вуглець є неодмінним і найважливішим структурним елементом. Хотілося б, щоб Україна посіла в цих досягненнях гідне, достойне славної історії і високому рівню її фізики місце.

**Література**

1. Graphene // Scientific Background on the Nobel Prize in Physics 2010. The Royal Swedish Academy of Sciences. - 12 p.
2. K.S. Novoselov, A.K. Geim, S.V. Morozov et al. Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films // Science - 2004. - Vol. 306, № 5696. - Pp. 666-669.
3. A.H. Castro Neto, F. Guinea, N.M. Peres Drawing Conclusions from Graphene // Physics World - 2006. - Vol. 19. - Pp.34-38.
4. T. Chakraborty Graphene: a nanoscale quantum playing field // Physics in Canada. - 2006. - Vol. 63. - Pp. 351-354.
5. K.S. Novoselov, A. K. Geim, S. V. Morozov et al. Two-Dimensional Gas of Massless Dirac Fermions in Graphene // Nature - 2005. - Vol. 438. - Pp. 197-200.
6. Y. Zhang, Y.-W. Tan, H. L. Stormer, P. Kim Experimental Observation of Quantum Hall Effect and Berry's Phase in Graphene // Nature - 2005. - Vol. 438. - Pp. 201-204.
7. V. P. Gusynin, S. G. Sharapov Unconventional Integer Quantum Hall Effect in Graphene // Phys. Rev. Lett. - 2005. - Vol. 95. - P. 146801.
8. M.I. Katsnelson, K.S. Novoselov, A.K. Geim Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene // Nature Phys. - 2006. - Vol. 2. - Pp. 620-625.
9. N.M.R. Peres, F. Guinea, A.H. Castro Neto. Electronic Properties of Disordered Two-Dimensional Carbon // Phys. Rev. B - 2006. - Vol. 73. - P. 125411.
10. C.R. Dean, A.F. Young, P. Cadden-Zimansky, L. Wang, H. Ren, K. Watanabe, T. Taniguchi, P. Kim, J. Hone, K.L. Shepard // Multicomponent fractional quantum Hall effect in graphene, arXiv:1010.1179 (2010).
11. S. Bae, H.Kim, Y. Lee et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes // Nature Nanotechnology - 2010. - Vol. 5. - Pp. 574-578.
12. F. Schedin, A.K. Geim, S.V. Morozov, E.W. Hill, P. Blake, M. I.Katsnelson, and K.S. Novoselov. Detection of individual gas molecules adsorbed on graphene. // Nature Materials. - 2007. - Vol. 6. - P. 652.