

НА ПОРОЗІ НАНОТЕХНОЛОГІЧНОЇ РЕВОЛЮЦІЇ



В.М. ЛОКТЕВ

2008 рік – ювілейний і для Національної академії наук України, і для її президента, видатного вченого і громадського діяча академіка Б.Є. Патона. НАН України і Борису Євгеновичу у листопаді – в один день, 27-го! – виповнюється 90 років.

У зв'язку з таким Ювілеєм багато про що хотілося б і можна було б розказати – і про розвиток фізики, і про сьогодення академічних інститутів, і про найбільш вагомні здобутки вітчизняних фізиків. Але мені здалося, що найцікавішими для всіх тих, хто своє життя планує зв'язати з наукою і, зокрема, з фізикою, можуть бути думки про сучасні тенденції розвитку фізичної науки в цілому.

Тут, на мій погляд, сьогодні безперечним лідером стає все те, що в своїй назві вмщує коротку приставку «нано», яка свідчить про те, що мова йде про лінійні розміри об'єктів порядку 10^{-9} м (нм). Але справа не тільки і не стільки в розмірах, скільки в зміні наших уявлень і поглядів на невідомі раніше можливості нанорозмірних машин і механізмів, на створення нових підходів до виробничих технологій на молекулярному рівні, на границі тієї чи іншої науки взагалі, бо нанопідходи грають об'єднуючу роль, стираючи грані між різними науками.

Ознакою наступаючої *нанотехнологічної революції* і вступу у так звану наноеру є і швидке проникнення нових результатів наноекспериментів в усі сфери нашого життя.

Не буду заперечувати, що нанотехнологічний бум охопив багато природничих наукових і науково-технічних напрямів – матеріалознавство, техніку, хімію, біологію, медицину, але не можу не стверджувати, що базисним елементом розвитку основних засад наноідеології будь-де є фізика, її закони та методологія.

Загальновідомо, що в тісній співпраці з технікою і будучи по суті її фундаментом саме фізика створила передумови для небачених успіхів промисловості, інколи навіть обумовивши появу деяких галузей сгтання. Легко навести прикла-

ди: електро- і теплотехніка, ядерна енергетика, лазерні і голографічні технології, космічні дослідження, напівпровідникова, радіо-, опто- і криоелектроніка, а в останній час – багатообіцяюча **спінтроніка**, що відрізняється від звичайної електроніки тим, що оперує не зарядом частинок, а їх спіном.

Рівень наукових досліджень – і це не секрет – сьогодні визначає рівень розвитку будь-якої держави, і Сполучені Штати Америки вже заявили, що не менше 70% їх економіки спираються на фундаментальні знання.

Зрозуміло при цьому, що без подальшого розвитку фізичних досліджень ніяке суттєве збільшення обсягу таких знань неможливе. Але постає важливе питання: як і куди ми маємо рухатись, які головні задачі визначатимуть розвиток і які його напрями обіцяють найбільш ефективно і прискорене просування людства по шляху розв'язання таких глобальних проблем, як покращення якості життя, безпечна екологія, зменшення кількості невиліковних хвороб. Нехай це виглядає дивним, але фахівці вважають, що вирішення подібних і багатьох інших проблем дійсно залежить від успіхів *наноіндустрії*.

Цікаво, що незважаючи на відносну новизну питань, вони вже мають свою історію. Найновіша почалася у січні 2000 року, коли президент США Білл Клінтон, виступаючи перед конгресменами з закликами

про необхідність збільшення асигнувань на нанонауку, сказав дослівно таке: «Уявіть собі, що з речовини, величиною як шматок цукру, можна виготовити матеріал в десятки разів міцніший за сталь». І хоча, треба визнати, що порівняння було не дуже вдалим, керівника найбільш розвиненої країни світу почули не тільки в ній. Видатки передових держав на нанодослідження в найзагальнішому розумінні цього слова зросли від приблизно \$1 млрд. у 2000 році до десятків мільярдів на кінець 2010 року.

І це не викликає подиву – на думку багатьох експертів, нанотехнології мають змінити світ: невидимі для ока роботи будуть ремонтувати організм на клітинному рівні, вибудовані з молекул фільтри очищать воду від будь-яких шкідливих домішок, вуглецеві нанотрубки розорять власників бензозаправок, вправно працюючи у водневих двигунах, квантові обчислення стануть практично миттєвими тощо.

Дійсно, не буде великим перебільшенням стверджувати, що науковців і їх розробки охопила «нанотехнологічна лихоманка». Ну хто не мріє про те, щоб маніпуляції з предметами, у тисячі разів меншими за товщину людського волосу, стали основою так званих «технологій загального призначення», під якими розуміють виробництво електроенергії, машинобудування, нові конструкційні матеріали, шляхобудівництво і т.п.

А якщо продивитися світову пресу, то взагалі стає зрозумілим, що природознавство, а разом з ним і людство вступило, або краще сказати – невблаганно вступає, у новий етап свого індустріального розвитку, що отримав назву «нанотехнологічного». Останній термін увійшов до вжитку з науково-популярної книжки Еріка Дрекслера «Наносистеми: молекулярні машини, виробництво, обчислення» (1992 р.), де

робилася спроба визначити відкриття нових модифікацій вуглецю – наносферичної (й найбільш симетричної з усіх відомих) молекули фулерену C_{60} і нанотрубок як свідцтво початку IV-го етапу науково-технічної революції або, як зазначалося у цій книзі, її IV-ої хвилі.

Нагадаю, що III-я хвиля відповідала становленню напівпровідникової мікроелектроніки, під знаменами якої, як на мене, пройшла друга половина XX-го століття. Безпомилково, її народженням можна вважати 1947 рік, коли був винайдений транзистор. На побутовому рівні все починалося з кишенькового радіоприймача 50-х років «на семи транзисторах». Тепер же у процесорі сучасного ноутбука вміщується біля 10^8 транзисторів, які займають площу не більше $2-3 \text{ см}^2$. З цього випливає, що лінійний розмір одного транзистора трохи більший за 10^{-6} м, або за 1 мікрон (мкм). Оптилітографічна технологія виготовлення таких пристроїв полягає у фотоперенесенні малюнка на кремнієву основу за допомогою зменшуючої оптичної системи. Світлові хвилі, що при цьому працюють, мають довжину $0,3-0,6 \text{ мкм}$ і не дають змоги «намалювати» лінії (а це і є елементи транзистора) менші за приблизно 1 мкм. Відповідні технології надзвичайно тонкі і мають назву високих.

А що ж далі?

Звичайно, дуже легко збагнути, що для подальшого зменшення необхідно було б використовувати коротші хвилі – скажімо, рентгенівські. На цьому базується лінійний розвиток вже існуючої технології. Проте просто так він неможливий, бо ще ніхто не зумів сфокусувати рентгенівські промені. Більше того, не останню роль може відігравати і така непроста обставина, що має місце в наносистемах, як квантові флукту-

ації, які можуть непередбачливо змінювати роботу наноелектронних приладів. Саме тому частина спеціалістів притримується думки, що мікронний розмір транзистора – це за порядком величини все, на що можна розраховувати на шляху безпосередньої механічної мініатюризації деталей комп'ютерів і що прогрес вимагає використання принципово нових фізичних принципів.

Поки вони не винайдені, але й підстави для оптимізму в той же час не безгрунтовні. Він спирається на існування реальних біосистем або, точніше, – елементів пам'яті мозку, розмір яких, за сучасними оцінками, не перевищує 1 нм. Коли б вона існувала, то саме технологія керуваного виготовлення пристроїв з «біологічною» густиною укладки $\sim 10^9$ елементів пам'яті на см^2 могла б, строго кажучи, називатися «нанотехнологією». Безумовно, розв'язання цієї і пов'язаних з нею фізичних, хімічних і технічних задач стане одним із пріоритетних завдань для майбутніх поколінь науковців та інженерів.

Що стосується сьогодення, то переднім краєм досліджень в галузі фізики напівпровідників стало вивчення так званих «квантових точок» і «квантових ям». На даному напрямі зосереджені колосальні зусилля, які, без усякого сумніву, виправдані все ще значними сучасними досягненнями напівпровідникової мікроелектроніки.

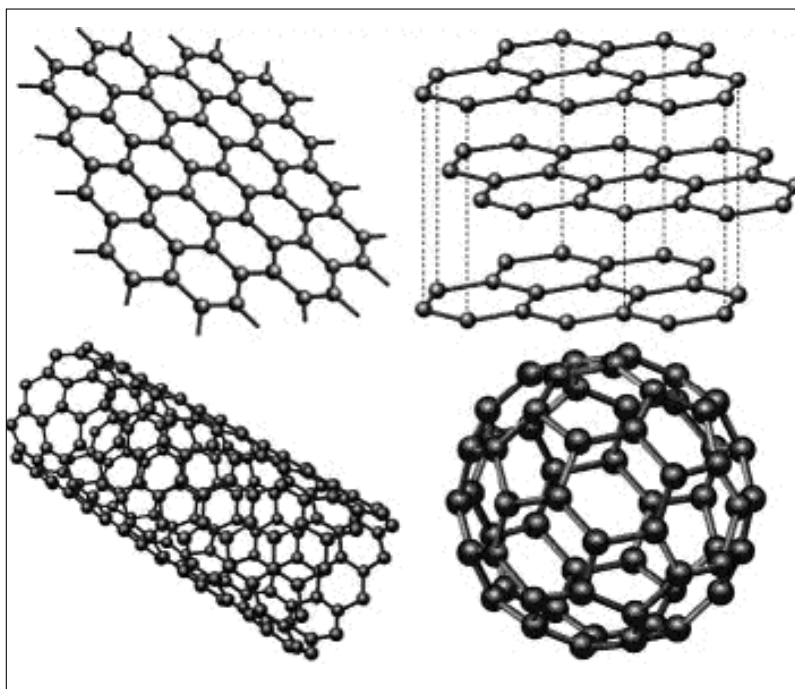
Проте ідея про «напівпровідниковий» механізм явищ життя, на якому нещодавно наполягав відомий біохімік А. Сент-Дьєрді, або штучне його (механізму) відтворення у напівпровідникових приладах, не виправдалась і навряд чи є правильною. Не виключено, що лінійна мініатюризація ще себе не вичерпала, але чекати суттєвого зменшення розмірів транзисторів без зміни фізичної парадигми вважаю безперспективним.

Тим не менше, незважаючи на певні проблеми міжнародний експрес під назвою «нано» швидко набирає хід і його вже не зупинити. Можна навести досить багато прикладів використання нанооб'єктів, до яких відносяться нанопорошки, нанокаталізatori, нанофільтри.

Збагачується **нанотермінологія**, і вже де-не-де можна прочитати про проблеми або досягнення таких дисциплін, як *фізика наноструктур*, включаючи *фізику поверхні твердих тіл*, *наноелектроніка*, *наноматеріалознавство*, *нанобіотехнології*, *нанодіагностика*, *нанометрологія* тощо.

Їх зміст впливає з назви – наприклад, фізика наноструктур вміщує такі підрозділи: електронні стани, транспортні властивості, нерівноважні процеси, колективні явища, нанофотоніка, спінтронні властивості, надпровідні характеристики, нановуглецеві структури, технологія створення наносистем. До них примикає наноелектроніка з її елементною базою, функціональні нанопристрої, принципами створення елементів, технологічним обладнанням, фізичним матеріалознавством, діагностикою наноструктурних об'єктів, методами обчислювального експерименту електронних процесів в наносистемах і суперкомп'ютерними методами.

Дуже великі завдання стоять і перед хіміками, хоча, відверто кажучи, в межах нанорозмірної просторової шкали важко відокремити фізичні процеси від суто хімічних. Тут важливо з'ясувати особливості протікання хімічних реакцій у малих об'ємах, які відомі лише у загальних рисах. Незрозуміло і як змінюються властивості нанодисперсної речовини від моменту її зародження до моменту використання, тому що значну роль відіграють релаксацийні процеси, деякі з них спричиняють деградацію самої речовини. Перед біохіміками і



Дуже популярні та перспективні для нанотехнологічних застосувань вуглецеві об'єкти: двовимірний шар графену (1), квазі-двовимірний графіт – основний елемент олівців (2), нанотрубка, що представляє собою зразок справжньої одновимірної електронної системи (3), молекула фуллерену C₆₀ – найбільш симетрична з усіх існуючих. Всі вони виявляють незвичайні фізичні та хімічні властивості і, як вважає більшість експертів, в недалекому майбутньому мають стати складовими різноманітних працюючих наносистем та наноприладів.

медиками стоять проблеми створення принципово нових ліків, які вміють діяти локально і безпечно для усього організму, крім тієї цілі, задля якої вони використовуються.

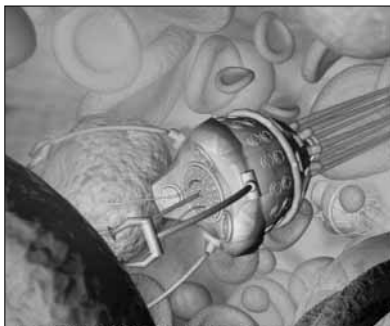
Серед названих проблем виникає ще одна – критична для розв'язання перелічених вище. Мається на увазі «**наноосвіта**», без якої неможливо виховувати кадри, спроможні зробити те, що вимагає сьогодення.

Ясно, що нанонаука є міждисциплінарною галуззю, отже і підготовка фахівців для неї потребує нових підходів. Зокрема, студентів-фізиків треба навчити хіміко-біологічному мисленню, а студентів-хіміків або біологів – відповідно фізичному. А є ще й інженерні спеціальності. Жоден університет нашої країни поки що не випускав вкрай потрібних **нанофахівців**.

Зараз йде створення навчальних програм, розробка ме-

тодичних посібників. Інший аспект – оновлення обладнання учбових лабораторій для опанування предметів в області нанотехнологій. Все це на часі і інтенсивно розвивається. Нинішні школярі будуть одними з перших, хто буде отримувати найновіші знання в галузі **наноісторії**.

В багатьох країнах керівництво зрозуміло необхідність розвитку нанотехнологій, прийняті принципові рішення, вкладаються гігантські кошти. Вже можна говорити про певні успіхи, в тому числі українських дослідників. Якщо навести конкретні приклади з фізики, то найбільш яскравим, незаперечно, є відкриття графену, або окремо існуючих моношарів графіту, в якому носії заряду характеризуються нейтриноподібним (а не електронподібним) спектром, крім того, вперше надійно спостерігалася бозе-ейнштейнівська конденса-



Нанороботи в кровеносній системі

ція екситонів у структурах з квантовими ямами; розроблені надпотужні лазери на квантових точках; створені алюмінієво-золоті нанокаталізатори для майже повного очищення вихлопних газів двигунів автомобілів; запущені у виробництво наноструктуровані вуглепластики, застосування яких у літакобудуванні підвищує експлуатаційні характеристики літаків майже на 100%.

Завершуючи коротку розповідь про найновітніший напрям світової науки – її наноіндустріальне спрямування, мушу застерегти: щоб відкрити щось дійсно нове, треба займатися, насамперед, фундаментальними дослідженнями і бути

готовими, що нічого революційного не відбудеться, бо в справжній науці нема гарантій виключно правильного шляху розвитку, а тим більше – гарантій нових відкриттів. Вони надзвичайно бажані, але внаслідок абсолютної непередбачуваності, ніхто не може обіцяти їх стовідсоткову появу. Тільки тоді можна буде сподіватися на справжні прориви, до яких, наприклад, можна було б віднести створення нанокомп'ютерів, що мало б вибухоподібний ефект. Цим обов'язково треба займатися. Але революції може й не бути, тоді ми переживатимемо лінійне вдосконалення вже існуючих машин і механізмів. Це, в принципі, теж непогано, але буде йти більш повільно.

Як би там не було, перед новими поколіннями дослідників стоять грандіозні завдання по розвитку наноіндустріального суспільства, повністю побудованого на знаннях. Можна також сподіватися, що кількість різних природничих наук зменшиться, оскільки нанотехнології ведуть до їх синтезу, піде в минуле спеціалізація. Можливо, зараз фізики, біологи

і хіміки не готові до єдиного фронту співпраці, проте таке не виключено в майбутньому, коли нанопідходи будуть опановані і запрацюють на повну потужність. Навпаки, стануть зрозумілими критерії поділу науки на її окремі ділянки, а фахівці будуть розуміти один одного, де б вони не працювали.

Нарешті, як зазначалося, будь-який науковець працює у світі, де на фундаментальному рівні практично все визначається фізичними закономірностями. Тому, повторю, навіть для дуже широкої за кількістю понять і завдань нанонауки в цілому фізика – це та основа, на якій має будуватися і сучасна нанотехнологічна підготовка.

Отже, глибоке вивчення фізики – найбільш виправдана і економічна форма оволодіння знаннями та навичками, необхідними в умовах сучасної і фактично необмеженої в часі науково-технічної нанореволюції.

В.М. Локтєв,

академік-секретар Відділення фізики і астрономії НАН України, академік НАН України