

С В І Т

Ф І З И К И

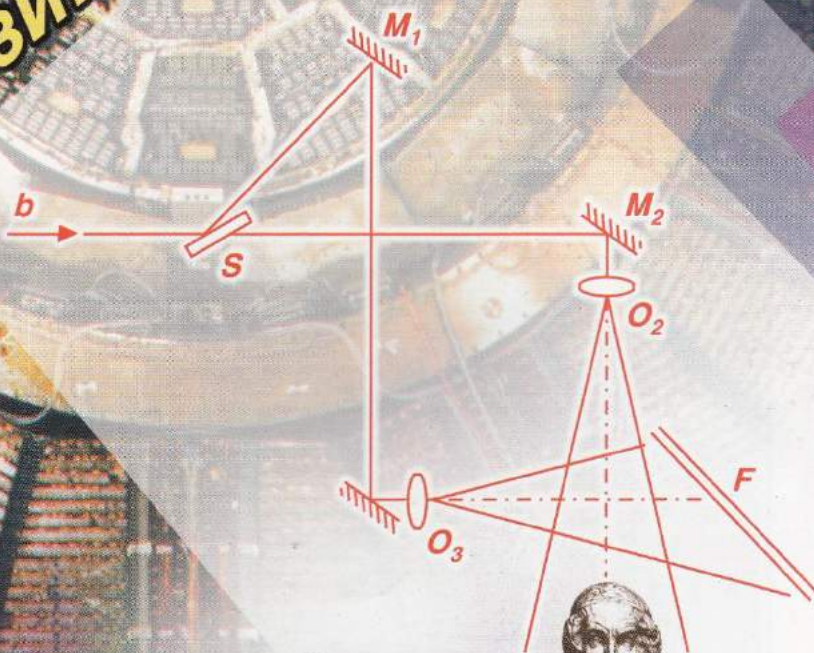
№3
2000

науково-популярний журнал



М.М.Боголюбов та
І.Р.Юхновський.
Дубна, 1977 р.

Куди йде фізика?



Голографія...



Слова, які творять назву журналу „Світ фізики” – не випадкові. Фізика була, є і буде саме світом. Світ, який дає нову епоху, світ, який дає якість нової епохи, світ, який дає нову економіку знань. І щоб не відбувалося, які б слова ми не вживали – цифрова культура, інформаційне століття, економічна глобалізація, а в природі є саме ті фізичні явища, що рухають основними закономірностями, які дає саме та якість економіки, яка буде визначати якість розвитку нашої держави. Тому я всім бажаю вивчати фізику, я всім бажаю жити в якісно іншій державі, назва якої – Україна.

Фізика, як предмет, це є як інваріант, що проходить через епохи. Безумовно пріоритети фізики змінюються, і вже навіть протягом цього століття ми бачили як це робиться. Думаю, що основні навантаження фізики будуть у галузі біофізики, швидких процесів, які рухають інформацією, ті, що будуть відповідати новій якійсь телекомунікації і загалом утворенню комунікативних мереж. Тому фізика буде, але питомою вагою різних напрямів змінюватиметься. Це дуже добре, це цікаво, і тому це повинно захоплювати всіх студентів, які сьогодні займаються фізикою.

Володимир Семиноженко,
академік НАН України,
народний депутат України

Фізика – це одна з найпрекрасніших наук і мати справу з нею може по-справжньому лише той, хто справді має поклик, Божу іскру. І якщо дивитись на це, то він буде їй справді мати втіху і насолоду, в нього буде широкий світогляд і він буде про все мати власну думку, він побачить і світ, тому що фізика – наука інтернаціональна, вона представлена скрізь, в усіх країнах. Якщо говорити про те, що, фізика не є така популярна, як було колись, 20-30 років тому, вона все ж відкриває можливості стати відомим науковцем, бути присутнім на конференціях у різних країнах, працювати будь-де. Це наука інтернаціональна і вона відкрита для всіх. Але для цього потрібно, звичайно, як сказав Ігор Рафаїлович Юхновський, тяжко вчитися, дуже багато працювати і лише після цього відчуси, наскільки це прекрасно займатися фізикою.

Анатолій Загородній,
заст. директора інституту теоретичної фізики
НАН України ім. М.М.Боголюбова,
член-кореспондент НАН України,
професор Київського університету ім.Т.Шевченка

Мені дуже приємно сьогодні поздоровити усіх учителів та учнів з новим навчальним роком, з Днем знань і присмню знати, що є такий чудовий журнал „Світ фізики”, який читають не тільки у Львові, але й у Києві, по усій Україні, читають і за її межами. Це журнал дуже високого наукового рівня, він чудово проілюстрований. Я думаю, якщо було б більше таких журналів, то наша освіта рухалась би семимильними кроками. Бажаю успіху колективу журналу, всім читачам.

Юрій Горобець,
начальник департаменту
Міністерства освіти і науки України,
доктор фізико-математичних наук

З інтерв'ю кореспондента журналу „Світ фізики”
з відомими фізиками України.
(1 вересня 2000 року, Львів)



День знань у Львівському національному
університеті імені Івана Франка. 1 вересня 2000 р.

С В І Т Ф І З И К И

науково-популярний журнал

3(11) '2000

Журнал „СВІТ ФІЗИКИ”,
заснований 1996 року,
реєстраційне свідоцтво № КВ 3180
від 06.11.1997 р.
Виходить 4 рази на рік

Засновники:

Львівський національний університет
імені Івана Франка,
Львівський фіз.-мат. ліцей,
СП „Євросвіт”

Головний редактор

Іван Вакарчук

заступники гол. редактора:

Олександр Гальчинський

Галина Шопа

Редакційна колегія:

О. Біланюк

М. Бродин

П. Голод

С. Гончаренко

Я. Довгий

І. Климишин

Ю. Ключковський

Б. Лукіянець

Ю. Ранюк

Й. Стахіра

Р. Федорів

Я. Яцків

Художник **Володимир Гавло**

Літературний редактор

Мирослава Прихода

Комп'ютерне макетування та друк
СП „Євросвіт”

Адреса редакції:

редакція журналу „Світ фізики”
вул. Саксаганського, 1,
м. Львів, 79005
Україна

тел./факс 380 322 40 31 88, 40 31 89

sf@ktf.franko.lviv.ua

www.franko.lviv.ua/publish/phworld

С В І Т Ф І З И К И

– це всеукраїнський науково-популярний журнал;

– популяризує українських учених та їхні наукові здобутки;

– досліджує актуальні проблеми науки та освіти;

– вивчає маловідомі сторінки історії науки;

– висвітлює олімпіади, турніри, інші творчі змагання школярів;

– знайомить читачів з новинами в науковому та освітянському житті України;

– допомагає школярам та учителям у поглибленому вивченні фізики;

– утверджує сучасну українську науково-технічну термінологію;

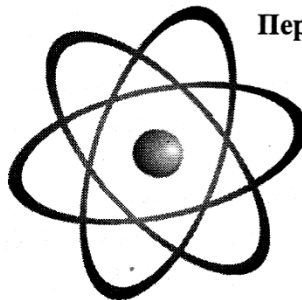
– здійснює просвітницьку роль серед широких верств;

– друкує перші наукові праці школярів та студентів;

– формує естетичні смаки.

Журнал читають науковці, викладачі, студенти, школярі як в Україні, так і за її межами.

Не забудьте передплатити журнал „Світ фізики” на наступний рік.



Передплатний індекс

22577

Передрук матеріалів дозволяється тільки з письмової згоди редакції та з обов'язковим посиланням на журнал „Світ фізики”

© СП „Євросвіт”

ЗМІСТ



1. Нові і маловідомі явища фізики

Бродин Михайло. Явища самовпливу лазерного випромінювання в напівпровідникових середовищах
Довгий Ярослав. Фулерени

2. Про фізиків України

Формула життя (75 років від дня народження І.Р.Юхновського)
Довгий Ярослав. Олександр Смакула: повернення на рідну землю

3. Фізика світу

Шопа Галина. Винахідник голографії

4. Актуальні проблеми ...

Куди йде фізика?
Краус Іво. Про фінансування науки в Чеській республіці

5. Нобелівські лауреати

Гальчинський Олександр. Нобелівський лауреат, що народився на українській землі...

6. Олімпіади, турніри ...

Задачі ІХ Всеукраїнського відкритого турніру юних фізиків, 2001 р.

7. Творчість юних

Сорока Арсен. Не послизьніться

8. Олімпіади, турніри ...

Розв'язки задач ІV етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики (2000, 10-11 кл.)

9. Інформація

10. Реальність і фантастика

Вовченко Ростислав. Магнетна вода

3

10

18

22

24

27

29

31

34

36

38

45

48



Явища самовпливу лазерного випромінювання в напівпровідникових середовищах

Михайло Бродин

академік НАН України

Відомо, що при дії на середовище інтенсивного лазерного випромінювання в ньому може виникати низка так званих нелінійних явищ, відсутніх у звичайній оптиці, що має справу зі слабким випромінюванням від стандартних джерел. Одними із найважливіших є явища самовпливу, що ґрунтуються на залежності показника заломлення середовища від інтенсивності світла. Вони лежать в основі керування просторовими характеристиками лазерних променів (самофокусування, самодефокусування, обернення хвильового фронту та ін.) і мають важливе принципове та практичне значення. Явища, пов'язані з нелінійністю показника заломлення n , інтенсивно вивчаються у лабораторіях різних країн, зокрема України, щоб встановити фізичну природу нелінійності, знайти середовища з високими нелінійностями та іншими корисними параметрами, а також нові ефекти самовпливу.

Результати досліджень свідчать про те, що особливо перспективними нелінійними середовищами для реалізації процесів самовпливу є напівпровідникові кристали.

У цій статті розглянемо питання про фізичну природу та характеристики нелінійностей показника заломлення у нелінійних середовищах та приведемо огляд деяких важливих явищ.

Природа нелінійності

Внесок нелінійної поляризації

Протікання оптичних процесів у лінійній оптиці, що має справу з променями малої інтенсивності, визначається лінійним зв'язком поляризації середовища P з напруженістю електричного поля світлової хвилі E :

$$P = aE, \quad (1)$$

де a – лінійна сприйнятливість. Це співвідношення отримано при класичному розрахунку на основі моделі гармонійного осцилятора. При за-

гальному квантовому підході такий лінійний зв'язок відповідає першому наближенню теорії збурень.

Міра придатності виразу (1) залежить від співвідношення між амплітудою електричного поля E світлової хвилі та величиною внутрішнього поля E_0 , що визначає силу зв'язку, яка діє на оптичний електрон у середовищі. Поле E_0 зв'язане з потенціалом іонізації $I_{\text{пот}}$ та характерною віддаллю a , на якій забезпечується зв'язок, співвідношенням

$$eE_0a = I_{\text{пот}}, \quad (2)$$

де e – заряд електрона.

Для атома водню, наприклад, $E_0 = 5 \cdot 10^9$ В/см, для деяких кристалічних середовищ $E_0 = 10^9 - 10^7$ В/см. Випромінювання звичайних джерел світла характеризується полями в одиниці вольт на сантиметр, що суттєво менші від E_0 , і для них виконується співвідношення (1). Сучасні лазери легко забезпечують випромінювання з полями, близькими до 10^7 В/см, тому для описання оптичних ефектів у таких полях лінійне матеріальне рівняння (1) непридатне і має бути замінене на складніше [1]:

$$P = \alpha(E)E = P(E), \quad (3)$$

де $P(E)$ – у загальному випадку функціонал. Поляризація може бути представлена у вигляді степеневого ряду з нелінійними членами:

$$P = \alpha E + \chi_2 E^2 + \chi_3 E^3 + \dots, \quad (4)$$

де χ_2, χ_3 – нелінійні сприйнятливості, загалом тензорного характеру, що за порядком величини дорівнюють $\chi_2 \cong 1/E_0$, $\chi_3 \cong 1/E_0^2$. Їх величина, як і величина a , визначається фізичними властивостями середовища. Наявність у поляризації P нелінійних за степенями членів і призводить до появи основних нелінійних явищ.



За нелінійність дисперсії n відповідає кубічний за полем член. Справді, у випадку гармонійної хвилі частоти ω , що поширюється в напрямку z :

$$E(t, z) = A \cos(\omega t - kz), \quad (5)$$

де A – амплітуда, k – хвильовий вектор.

$$\chi_3 E^3 = \frac{3}{4} \chi_3 A^3 \cos(\omega t - kz) + \chi_3 \frac{A^3}{4} \cos(3\omega t - kz) \quad (6)$$

Другий член у правій частині рівняння (6) відповідає за генерацію потроєної частоти. Перший же член має періодичність основної хвилі, але він нелінійний завдяки залежності від A^3 . Саме він дає нелінійну добавку до показника заломлення n . Справді, діелектрична проникність ϵ , яка виражається через діелектричну сприйнятливість у вигляді

$$\epsilon = 1 + 4\pi \alpha. \quad (7)$$

Тепер запишімо

$$\epsilon = 1 + 4\pi a + 3\pi \chi_3^2 A^2 = \epsilon_0 + \epsilon_2 A^2,$$

де $\epsilon_0 = 1 + 4\pi a$, $\epsilon_2 = 3\pi \chi_3^2$. Оскільки $\epsilon = n^2$, то

$$n^2 = \epsilon_0 + \epsilon_2 A^2. \quad (8)$$

Член $\epsilon_2 A^2 \ll \epsilon_0$, і замість (8) можна записати:

$$n_4 = -\frac{a^2}{2d \cdot F \cdot E^2}, \quad (9)$$

де $n_0 = \sqrt{\epsilon_0}$, n_2 – коефіцієнт нелінійної добавки до показника заломлення. Отже, сильна хвиля змінює показник заломлення, причому ця зміна пропорційна інтенсивності хвилі, оскільки $I \sim E^2$.

Величина n_2 – це питома характеристика нелінійного середовища, чим вона більша, тим менше значення E_0 . Для напівпровідників E_0 порівняно невелике – 10^7 В/см. Отже, нелінійна поляризація електронів у напівпровідниках повинна давати значні нелінійні зміни n . Між тим, як показують дослідження останніх років [2], електронна поляризація не єдина (а часто й не найістотніша) причина нелінійності n у цих середовищах. Напівпровідники характеризуються низкою додаткових факторів, що визначають величину та характер протікання нелінійних явищ. Найважливіші з них – це вклад нерівноважних та рівноважних вільних електронів.

Внесок нерівноважних та рівноважних вільних електронів

Якщо енергія кванта світла $h\nu$ менша від ширини забороненої зони E_g кристала (див. рис. 1), але подвоєний квант більший від E_g , то таке випромінювання при його високій інтенсивності здатне викликати електронне збудження кристала (переведення електронів із валентної зони E_v у зону провідності E_c), тобто спостерігається двофотонне збудження. Такий перехід – це також нелінійний процес, ймовірність якого залежить від інтенсивності світла.

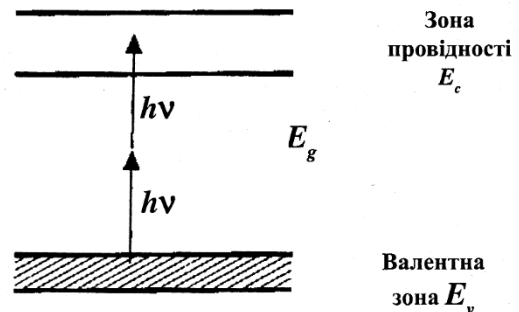


Рис. 1.

Однак ця ймовірність, навіть при досить високих інтенсивностях, мала порівняно з ймовірністю однофотонного переходу. І все ж двофотонне збудження при лазерних інтенсивностях може забезпечити значну концентрацію електронів у зоні провідності (тобто нерівноважних електронів), які вносять нелінійну добавку до показника заломлення, оскільки такі кванти світла здатні проникати на значну глибину в кристал. Ця добавка виникає через екранування поляризації зв'язаних електронів вільними носіями і може бути записана:

$$\Delta n = -4\pi N e^2 \tau / m_e^* \omega^2, \quad (10)$$

де N – концентрація вільних електронів, m_e^* та e – їхні ефективна маса та заряд, ω – частота діючого світла, τ – час життя електронів у зоні провідності.

Оскільки N нелінійно залежить від інтенсивності світла ($N \sim I^2$), то зміна показника заломлення також залежить від I ($\Delta n \sim I^2$), отже, вона нелінійна. Формально в цьому випадку

$$\Delta n_{\text{нел.}} \approx -n_4 E^4,$$

де n_4 – коефіцієнт нелінійності. Це нелінійність п'ятого порядку, що різко залежить від величини



електричного поля хвилі. Знак „мінус” у формулі (10) свідчить про те, що вільні носії призводять до зменшення показника заломлення на відміну від нелінійної поляризації зв'язаних електронів, де добавка до n додатня.

Реальні напівпровідникові кристали можуть мати чужорідні атоми, зокрема домішки донорного типу, енергетичні рівні яких розташовані поблизу зони провідності (рис. 2). При кімнатній температурі, завдяки тепловому збудженню, деяка кількість електронів із цих рівнів переходить у зону провідності, створюючи там відповідну концентрацію вільних електронів. Це – рівноважні носії. Вони також дають внесок у нелінійну зміну n через внутрішнє розсіювання під впливом діючої лазерної хвилі. Особливостями цієї зміни є надзвичайно високі швидкості її появи та релаксації, що мають характерний час порядку 10^{-12} с.

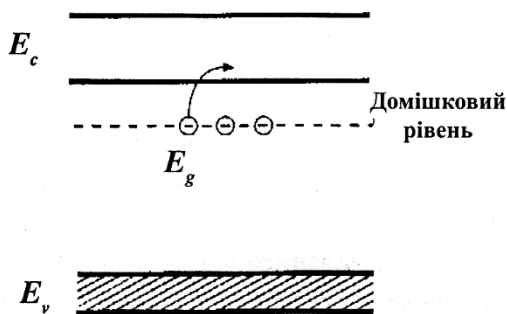


Рис. 2.

Відомі й інші механізми виникнення нелінійності дисперсії показників заломлення у напівпровідниках. Це нагрів кристала під дією світлової хвилі, ефект Штарка, тобто зміщення енергетичних рівнів під дією електричного поля хвилі, та інші. Реалізація цих механізмів залежить від індивідуальних особливостей середовища, зокрема від його енергетичної структури.

Сьогодні отримано досить багатий експериментальний матеріал щодо дослідження нелінійності показника заломлення в напівпровідниках. З'ясовано, що для кристалів, в яких проявляється двофотонне поглинання діючого лазерного світла, при його порівняно невисоких інтенсивностях, основним фактором нелінійної зміни n є нелінійна поляризація, причому ці зміни додатні, а при вищих інтенсивностях визначальну роль відіграють нерівноважні вільні носії, і зміна n від'ємна.

Перейдімо до розгляду найхарактерніших явищ самовпливу. Розглянемо приклади одно-, дво- та чотирипроменевого самовпливу.

Однопроменевий самовплив світла в напівпровідниках: самофокусування та самодефокусування

Розглянемо циліндричний світловий промінь з гаусовим розподілом інтенсивності в поперечному перерізі. Це означає, що його інтенсивність максимальна в центрі і симетрично спадає в напрямку до периферії. Якщо такий промінь потрапляє на пластинку нелінійного середовища (див. рис. 3), і його інтенсивність досить висока, він зумовить в середовищі нелінійну зміну показника заломлення, профіль якого в площині поперечного перерізу якісно повторить профіль інтенсивності променя.

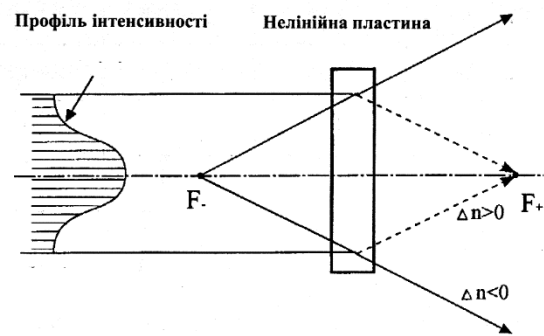


Рис. 3.

Максимальні зміни n будуть у центрі, а мінімальні – на периферії. Тобто промінь створить аналог лінзи, яка, діючи на промінь, буде змінювати передусім його геометрію. Оптична сила цієї нелінійної лінзи, очевидно, залежатиме від інтенсивності світла. При збільшенні n лінза буде фокусуючою, а при зменшенні n – дефокусуючою. Отже, матимемо або процес самофокусування, або самодефокусування. Вимірюючи фокусні віддалі таких нелінійних лінз у випадку самофокусування (F_+) чи самодефокусування (F_-), можна визначити нелінійні коефіцієнти n_2 чи n_4 :

$$n_2 = \frac{a^2}{2d \cdot F_+ E^2}, \quad n_4 = -\frac{a^2}{2d \cdot F_- E^4}, \quad (11)$$

де E – середнє електричне поле променя, $2a$ – його діаметр, d – товщина нелінійної пластинки. Вираз (11) передбачає, що негативна зміна показника заломлення n зумовлена нерівноважними вільними електронами, створеними двофотонним збудженням.

Використовуючи методику нелінійних лінз і проводячи вимірювання при різних інтенсивностях, коли основний внесок у нелінійність дає нелінійна поляризація (n_2) чи нерівноважні елект-



рони, визначені нелінійні коефіцієнти для ряду кристалів CdS, CdS-CdSe та інших. Одержані за допомогою рубінового лазера ($\lambda = 0,69$ мкм) результати, подані у таблиці [2]. Для порівняння в цій же таблиці вказано величину n_2 для характерного нелінійного середовища CS_2 .

Таблиця. Нелінійні коефіцієнти деяких напівпровідників

Матеріал	E_g , eB	n_2 одн. CGSE	n_4 одн. CGSE
CdS	2,5	$2,5 \cdot 10^{-10}$	$-6,2 \cdot 10^{-15}$
$CdS_{0,5}Se_{0,5}$	2,12	$3,5 \cdot 10^{-10}$	$-1,1 \cdot 10^{-14}$
$CdS_{0,18}Se_{0,82}$	1,85	$2,2 \cdot 10^{-9}$	$-1,0 \cdot 10^{-12}$
ZnSe	2,7	–	$-1,4 \cdot 10^{-16}$
SiC	3,0	$2,0 \cdot 10^{-9}$	–
CS_2	–	$1,8 \cdot 10^{-11}$	–

Відзначимо, що в кристалі SiC кубічна нелінійність пов'язана з внеском рівноважних носіїв на відміну від інших перелічених кристалів, де вона пов'язана з нелінійною поляризацією зв'язаних електронів.

Із таблиці видно, що величини коефіцієнта n_2 кубічної нелінійності для всіх вказаних у таблиці напівпровідників на 1–2 порядки більша, ніж для CS_2 . Слід також зауважити, що хоч коефіцієнти n_4 загалом набагато менші від n_2 , пов'язані з ними нелінійні добавки $\Delta n_{нел}$ за абсолютною величиною можуть переважати добавки, пов'язані з n_2 , оскільки n_4 пропорційне E^4 , а n_2 пропорційне E^2 .

Двопроменевий самовплив. Запис динамічних фазових ґраток

Матеріали з досить високими параметрами нелінійної рефракції при урахуванні їхньої високої швидкості (малих τ), до яких належать напівпровідники, можуть бути середовищами для запису динамічних голограм [3]. Простим прикладом таких голограм є запис динамічних ґраток світловим полем двох когерентних променів. Нагадаймо, що дві хвилі з однаковою частотою та поляризацією є когерентними, якщо їхня різниця фаз залишається постійною.

Якщо два когерентні промені I_0 перетинаються під деяким кутом, то внаслідок їхньої інтерференції інтенсивність результуючого поля буде просторово періодично промодульована. У місцях, де різниця фаз буде кратна 2π , матимемо максимуми інтенсивності, у місцях, де ця різниця дорівнюватиме непарному числу π – мінімуми інтенсивності.

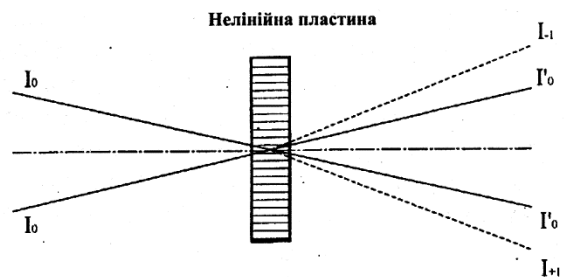


Рис. 4.

Якщо ми накладемо це промодульоване за інтенсивністю світлове поле на пластинку нелінійного матеріалу (рис. 4), у ній виникне така ж модуляція показника заломлення. Просторові відстані між сусідніми максимумами чи мінімумами L_x визначаються зі співвідношення:

$$L_x = \frac{\lambda}{2 \sin \theta}$$

де λ – довжина хвилі, 2θ – кут сходження променів. Це так звані фазові ґратки. Їхні розміри, форма та орієнтація визначаються характеристиками інтерферуючих променів.

Доказом того, що такі ґратки справді виникають, є спостереження самодифракції обох взаємодіючих променів на ними ж створених ґратках. Справді, якщо сфотографувати поперечний переріз світлового променя на виході пластинки, то поряд з двома розглянутими променями I_0 реєструються також дифраговані промені – перший I_{+1} та вищі порядки дифракції. Схематично це зображено на рис. 4. На рис. 5 зображена картина самодифракції променів рубінового лазера, що отримана в кристалі SiC [2].



Рис. 5.

Інтенсивність m порядку дифракції визначається співвідношенням:

$$I_m = I_0 J_m^2 (2\pi \Delta n d / \lambda)^2,$$

де I_0 – інтенсивність записуючого променя (розглядаються записуючі промені однакової інтенсивності), J_m – функція Бесселя порядку m , Δn – глибина модуляції показника заломлення в максимумах і мінімумах інтерференційної картини, d – товщина нелінійної пластини, λ – довжина світлової хвилі. Цей вираз дає змогу на основі вимірювання ефективності дифракції визначити величину нелінійності. Отже, запис фазових ґраток – це ще один ефективний метод визначення коефіцієнтів нелінійності.

У чому ж полягає відмінність динамічних голограм від широко відомих статичних голограм? У статичній голограмі зображення об'єкта формується при взаємодії об'єктної (когерентна світлова хвиля, що відбилася від об'єкта) та опорної хвилі. Картина їх інтерференції несе інформацію про розподіл фази об'єктної хвилі. Її записують на фоточутливому матеріалі у вигляді зміни коефіцієнта поглинання. Ці зміни потрібно зафіксувати, проявити і лише після того можна відтворити голографічне зображення за допомогою іншої хвилі. Отже, в статичній голографії процеси запису та відтворення зображення розділені в часі.

У динамічній голографії ці процеси відбуваються практично одночасно. Інтерференційне поле взаємодіючих хвиль „матеріалізується” в нелінійному середовищі у вигляді змін показника заломлення і тут же відтворюється тими ж променями. Якщо в процесі запису об'єкти змінюються, наприклад, рухаються, то відповідно змінюється і зміст голограм. Для реалізації динамічного процесу запису і відтворення необхідна висока реверсивність нелінійного середовища, тобто висока швидкість зникнення змін n , що виникли під впливом світла. Це означає, що записане зображення повинно дуже швидко і неперервно стиратись, середовище повинно неперервно поновлюватись, прагнучи до вихідного стану з постійним

та незалежним від координати значенням n . В іншому разі в різні моменти часу зображення нагромаджуватимуться, накладаючись одне на одне, і спотворюватимуть відтворюване зображення. Напівпровідники з їхніми механізмами нелінійності цілком відповідають цим вимогам. Як уже зазначалось, в кристалі SiC час релаксації нелінійності $\sim 10^{-12}$ с, а у кристалах типу CdS – порядку 10^{-9} с. До того ж, зміни n досить високі, що забезпечує достатню ефективність запису.

Чотирихвильова взаємодія в напівпровідниках; обернення хвильового фронту

Нелінійність рефракції у середовищах можна використати для реалізації дуже цікавого явища – обернення хвильового фронту (ОХФ) [4]. У чому воно полягає?

Розгляньмо гармонійну хвилю:

$$E^*(r, t) = A \cos[\omega t + kr - \varphi(r)], \quad (12)$$

де A – амплітуда, ω – частота, k – хвильовий вектор, що визначає напрям поширення хвилі, r – координата точки, яка розглядається, $\varphi(r)$ – початкова фаза; $-kr + \varphi(r)$ – просторова частина фази. Нагадаємо, що поверхня, на якій кожного фіксованого моменту часу фаза хвилі однакова, називається хвильовим фронтом. Для плоскої хвилі хвильовий фронт – площина, перпендикулярна до напрямку поширення хвилі, а для сферичної – концентрична сфера. Для реального світлового променя хвильовий фронт має досить складну форму.

Хвилею з оберненим хвильовим фронтом до розглянутої буде хвиля

$$E^*(r, t) = A \cos[\omega t + kr - \varphi(r)], \quad (13)$$

в якій напрям поширення став протилежним до вихідної, а кривина хвильового фронту змінила свій знак.

Для ілюстрації цього явища розгляньмо сферичну хвилю, що виходить з точкового джерела S . Порівняймо її відбиття від звичайного дзеркала (рис. 6) та від спеціального дзеркала, що обертає хвильовий фронт (ОХФ-дзеркало, рис. 7). У першому випадку хід відбитого променя має вигляд, що добре відомий зі звичайної оптики: відбита хвиля розходиться, її фазовий фронт повернутий випуклістю в напрямку поширення. Відбита хвиля дає уявне зображення джерела – S' . У другому



випадку – фазовий фронт повернутий випуклістю в протилежному до поширення хвилі напрямку, тобто хвиля сходиться в точці джерела. Це має важливе практичне значення: при відбиванні від ОХФ-дзеркала хвиля обов'язково потрапить у вихідну точку.

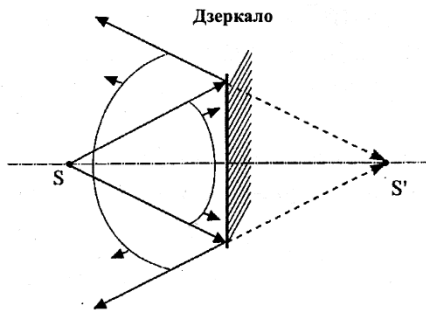


Рис. 6.

Ще одна дуже важлива властивість хвилі з ОХФ полягає у тому, що коли падаюча на ОХФ-дзеркало хвиля, пройшовши через неоднорідне розсівне середовище, зазнала порушення хвильового фронту, а у відбитій від ОХФ-дзеркала хвилі, яка ще раз, вже у зворотньому напрямку, пройде через це середовище, хвильовий фронт повністю відтвориться. Ця властивість починає широко застосовуватись в лазерній техніці як ефективний спосіб корекції zdeформованих у неоднорідному середовищі променів.

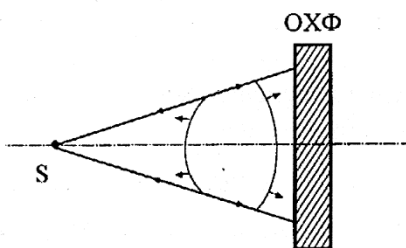


Рис. 7.

Виникає запитання: як здійснити обернення хвильового фронту, тобто, що є ОХФ-дзеркалом? Зрозуміло, що плоску хвилю обернути просто: досить на її шляху помістити плоске дзеркало, перпендикулярне до напрямку її поширення. Не дуже важко обернути сферичну хвилю, для цього можна використати сферичне дзеркало певної кривини, відповідно встановивши його. Для променя з довільним фронтом використати подібний ме-

тод практично неможливо, оскільки для цього довелося би виготовляти дзеркало зі складним профілем, що важко здійснити.

Порівняно недавно показано [5, 6], що ефективний метод ОХФ можна здійснити на основі так званої 4-хвильової взаємодії у нелінійному середовищі. При цьому ефективність методу тим вища, чим більші нелінійності. І тут знову привертають до себе увагу напівпровідникові кристали [2].

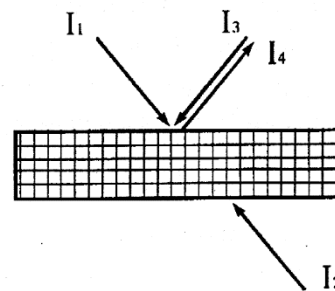
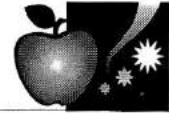


Рис. 8.

Суть методу полягає ось у чому. На нелінійне середовище подаються три когерентних промені I_1, I_2 та I_3 однакової частоти. Один з них I_3 – об'єктний, хвильовий фронт якого потрібно обернути. Промені I_1 та I_2 (їх називають опорними), мають плоский фронт і поширюються назустріч один одному (рис. 8). Попарна інтерференція цих трьох променів записує систему двох динамічних ґраток: інтерференція хвиль I_1 та I_3 дає ґратку з вертикальними лініями, а інтерференція I_2 та I_3 – ґратку з горизонтальними лініями. Хвиля I_2 дифрагує на вертикальній ґратці, завдяки чому виникає хвиля I_4 , що поширюється у зворотньому до I_3 напрямку. Внесок у хвилю I_4 дає також дифракція променя I_1 на горизонтальній ґратці. Виявляється, що хвиля I_4 є оберненою по хвильовому фронту до об'єктної хвилі I_3 . По суті, хвиля I_2 відтворює інформацію, записану хвилями I_1 та I_3 , тобто інформацію про розподіл фази об'єктної хвилі. Оскільки друга опорна хвиля I_2 спрямована назустріч першій, відбитий промінь I_4 виявляється фазово оберненим до об'єктного. Хоч відбиття від окремого шару і невелике, елементарні хвилі від кожного з шарів коливаються синфазно і когерентно підсумовуються з усього об'єму, даючи велике сумарне відбиття. Завдяки цьому можлива значна передача енергії з боку опорної хвилі в хвилю I_4 , тобто під-



силення I_4 . Теоретичний аналіз показує, що інтенсивності оберненої хвилі I_4 та об'єктної хвилі I_3 пов'язані співвідношенням:

$$I_4 = I_3 \operatorname{tg}^2 pd, \quad (14)$$

де $p = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot n_2 \sqrt{I_1 I_2}$, I_1 та I_2 – інтенсивності опорних хвиль, (d – товщина нелінійного матеріалу, λ – довжина хвилі, n_2 – коефіцієнт нелінійності (розрахунок проводився для кубічної нелінійності). Отже, ефективність обертання хвильового фронту залежить від параметра нелінійності матеріалу.

Розглянута 4-хвильова взаємодія є прикладом динамічної голограми, оскільки всі три процеси – запис, перетворення та відтворення – відбуваються одночасно. Наведені зміни показника заломлення зникають після припинення освітлення і сама голограма неперервно „підлаштовується” до зміни об'єктного променя.

Проведені в останні роки експерименти щодо ОХФ з використанням напівпровідникових кристалів як нелінійних середовищ підтвердили ефективність методу 4-хвильової взаємодії для ОХФ. Наприклад, використовуючи кристал ZnSe товщиною 0,25 см та рубіновий лазер ($\lambda = 0,69$ мкм), отримано обертання хвильового фронту з ефективністю 200%, тобто

$$I_4/I_3 = 2.$$

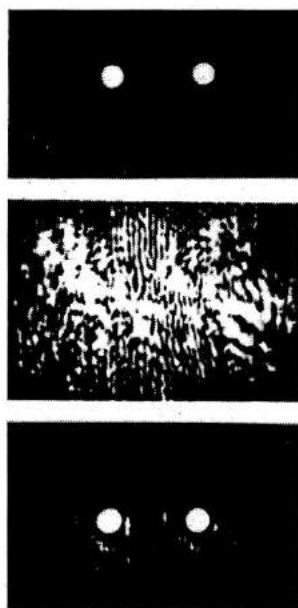


Рис. 9.

Експериментально доведена властивість ОХФ компенсувати спотворення, що вносяться оптично неоднорідним середовищем (рис. 9). Вузько-направлений промінь від рубінового лазера (його поперечний переріз зверху) внаслідок проходження через неоднорідне середовище спотворювався (всередині). Після обертання хвильового фронту за методом 4-хвильової взаємодії в кристалі CdS повторне проходження променя в зворотньому напрямку через те ж саме неоднорідне середовище відтворило попередню якість променя (внизу).

Отже, вивчення ефектів самовпливу приводить до одержання нових даних про фундаментальні властивості відповідних матеріалів, зокрема, про їх нелінійну поляризацію. Ці дослідження також створюють передумови для важливих практичних застосувань. Наприклад, обертання хвильового фронту застосовується на практиці для отримання потужного лазерного випромінювання з високою просторовою спрямованістю. Розроблені різноманітні нелінійно-оптичні пристрої для керування просторовими характеристиками променів. Створені елементи для оптичного перемикачів на основі явища оптичної бістабільності, що обіцяють стати основним елементом оптичних комп'ютерів. Для успішного розвитку цих та інших застосувань дуже важливі „хороші” нелінійні матеріали, здатні істотно та безінерційно змінювати свої дисперсійні властивості під дією світла. Напівпровідники мають такі властивості. Проте подальший пошук залишається актуальним.

ЛІТЕРАТУРА

1. Бломберген Н. Нелинейная оптика/ Пер. с англ. С. Ахманова и Р. Хохлова. М.: Мир, 1966.
2. Borshch A., Brodin M., Volkov V. Refractive Nonlinearity of Wideband Semiconductors and Applications. London: Harwood Academic Publishers, 1990.
3. Винецкий В. Л., Кухтарев Н. В. Динамическая голография. Киев: Наук. думка, 1983.
4. Зельдович Б. Я., Пилипецкий Н. Ф., Шкунов В. В. Обращение волнового фронта. М.: Наука, 1985.
5. Hellwarth R. Generation of time reversed wavefront by nonlinear refraction //J. Opt. Soc. of America. 1977. Vol. 67, N 1. P. 1-3.
6. Jariv A., Hehher D. Amplified reflection, phase conjugation and oscillation in degenerate four-wave mixing. //Optic Letters. 1977. Vol. 1, N 1. P. 16-18.



ФУЛЕРЕНИ*

Ярослав Довгий,

професор Львівського національного університету імені Івана Франка

Фулерени як нова структурна форма вуглецю

Вуглець є унікальним хімічним елементом. Він здатний утворювати найрізноманітніші хімічні структури у вигляді ланцюжків, циклічних утворень, просторових конфігурацій з кратними ковалентними зв'язками.

Донедавна вважали, що основними алотропними кристалічними формами вуглецю є алмаз і графіт. Подаємо коротку характеристику цих кристалів.

Алмаз – тривимірна кристалічна структура, що характеризується тетраедричним розташуванням атомів вуглецю в ґратці (рис. 1): кожен атом вуглецю згідно з його валентністю зв'язаний з чотирма сусідніми атомами і утворює кристалічну структуру кубічного типу. Алмаз має найвищу серед природних мінералів твердість, що дорівнює 10 за шкалою Мооса. Звідси й назва – від грецького *adamas* – твердий, неруйнівний. Це типовий ковалентний кристал, механічно міцний та хімічно стійкий. За симетрією належить до точкової групи $O_h = m\bar{3}m$, а це означає, що за фізичними властивостями він ізотропний. Чистий алмаз є діелектриком.

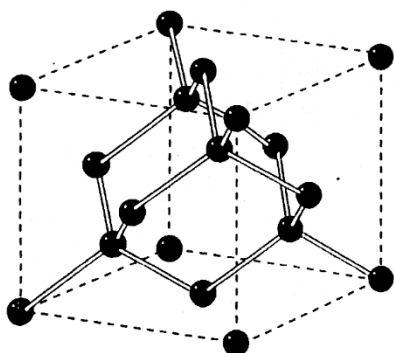


Рис. 1. Кристалічна структура алмазу

Графіт – типовий шаруватий кристал. У чергових плоских шарах атоми вуглецю зв'язані ковалентними силами і розташовані у вершинах шестикутників (рис. 2). Поміж шарами діє т.зв.

ван-дер-ваальсівський зв'язок, який значно слабший порівняно з ковалентним зв'язком. Цим і зумовлена сильна анізотропія графіту, коли в площинах шарів та у перпендикулярному напрямі фізичні властивості (електричні, механічні, теплові та ін.) суттєво відрізняються.

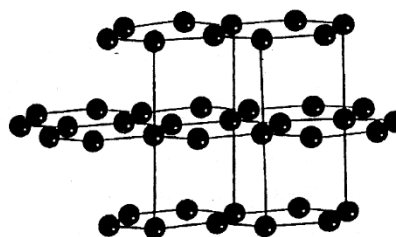


Рис. 2. Кристалічна структура графіту

Як відомо, графіт є м'яким вуглецевим матеріалом з низькою твердістю, яка дорівнює 1 за шкалою Мооса. З причин слабкої міжшарової взаємодії, шари графіту легко зміщуються та від'єднуються, залишаючи, наприклад, слід на папері. Звідти і назва – від грец. *grapho* – пишу. Температура плавлення графіту висока (3850 °С), густина 2,23 г/см³. Він добрий провідник електричного струму. Найпоширеніше застосування графіту (окрім виготовлення олівців) – ерозійностійкі покриття в ракетних двигунах, сповільнювачі нейтронів у ядерних реакторах. Графіт – вихідний матеріал для одержання фулеренів.

Назвемо ще дві поліморфні кристалічні модифікації вуглецю, про які менше відомо. Це карбін (чаоїт) та лонсдейліт.

Карбін – одновимірна структура (лінійні ланцюжки атомів вуглецю – рис. 3) з одинарними або кратними ковалентними міжвуглецевими зв'язками. У природі ця модифікація відома як мінерал **чаоїт**, що був виявлений як прожилки та вкраплення у графіті. Вперше знайдено в графітовому кратері Ріс у Баварії (Німеччина). Названо на честь американського петролога Е. Чао (E. Chao).

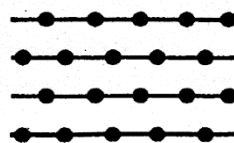


Рис. 3. Лінійні ланцюжки карбіну

*З книги Довгий Я. Чарівне явище надпровідність. Львів: Євросвіт, 2000. 440 с.



Чаоїт має напівпровідникові властивості: провідність n -типу, $E_g = 0,64$ еВ, $\rho \approx 10^6$ Ом·см (при кімнатній температурі).

Лондейліт – вуглецева гексагональна відміна алмазу із структурою, аналогічною структурі вюрциту). Вперше цей мінерал був знайдений у суміші з графітом у складі метеориту з Каньйону Диявола. Назва – за прізвищем англійського мінералога К. Лондейла (K. Lonsdale).

Відкриття у 1980-х роках нової форми чистого вуглецю – **фулеренів** – суттєво розширило звичні уявлення про вуглецеві структури. У 1985 році фізико-хімік з Університету Райса в Техасі (США) Річард Смоллі (Richard E. Smalley) разом з науковим співробітником Брайтонського університету (Англія) сером Гарольдом Крото (Sir Harold W. Kroto), вивчаючи мас-спектроскопічним методом продукти випаровування графіту під дією потужного сфокусованого лазерного випромінювання (температура в фокусі досягала 10000 градусів), зафіксували в мас-спектрах інтенсивний пік, що відповідав масі молекули C_{60} , а також низку піків меншої інтенсивності, які відповідали молекулам C_{70} , C_{50} , C_{32} , C_{28} , C_{24} та ін. (рис. 4). Почалися наполегливі дослідження молекул C_n (n – парне число), до яких доктор Р. Смоллі заангажував також Роберта Кела (Robert F. Curl Jr.). Так були відкриті нові екзотичні форми вуглецю – фулерени. Цим відкриттям була започаткована нова і вельми цікава галузь сучасної науки – фізика і хімія фулеренів. Бібліографія з цієї проблематики нині перевищує 2000 назв, скликаються міжнародні конференції, виходить спеціальний науковий журнал „Fullerene Sci. Technology”, опубліковано понад десяток ґрунтовних наукових оглядів та декілька монографій. А 1996 року Роберт Кел, Гарольд Крото та Річард Смоллі були удостоєні Нобелівської премії з хімії з формулою: „for their discovery fullerenes” („за їхнє відкриття фулеренів”).

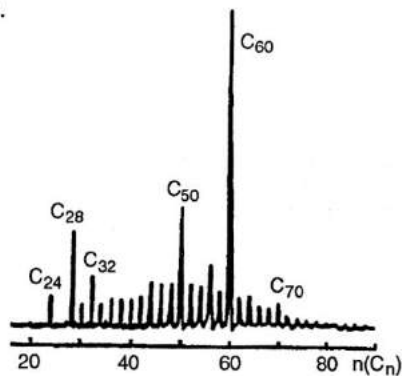


Рис. 4. Типовий мас-спектр продуктів випаровування графіту

Фулерени, фулериди і фулерити

Аналізуючи конфігурацію валентних зв'язків у цих великих молекулах C_n , Р. Смоллі з колегами виконали відповідні квантово-механічні розрахунки стійкості фулеренових утворень і дійшли висновку, що молекула C_{60} має найбільш симетричну геометричну форму у вигляді зрізаного ікосаедра. Ця фігура обмежена 20 правильними шестикутними гранями (гексагонами) та 12 правильними п'ятикутними гранями (пентагонами), нагадуючи футбольний м'яч (рис. 5). Молекула C_{70} не така округла (рис. 6), вона має форму витягнутого багатогранника, що схожий на м'яч овалної форми для гри в регбі). Як видно з рисунків 5 і 6, у високосиметричній молекулі C_{60} всі атоми знаходяться в еквівалентних позиціях, тоді як у молекулі C_{70} є п'ять різних позицій атомів вуглецю.

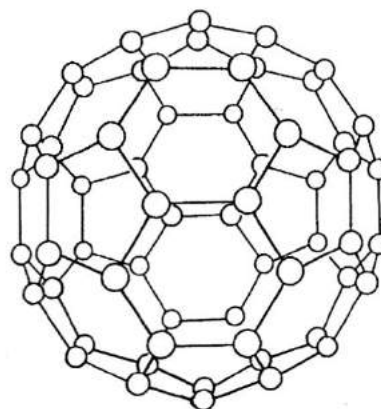


Рис. 5. Молекула фулерену C_{60}

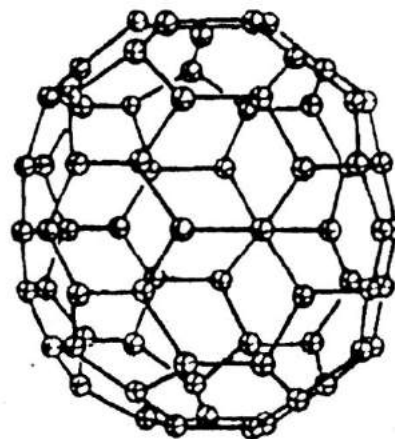


Рис. 6. Сфероїдальна структура молекули C_{70}



Звідки походить назва „фулерени”? Цей термін пов'язаний з іменем американського архітектора та інженера Річарда Бакмінстера Фуллера (Richard Buckminster Fuller, 1895–1985), який розробляв і конструював легкі та міцні архітектурні конструкції із стандартних бетонних багатокутових елементів, що монтуються на базі каркасів з прямих стрижнів. Таку архітектуру (т.зв. „геодезичні куполи” Фуллера) мав американський павільйон на всесвітній виставці „Експо-67” у Монреалі та чимало інших виставкових і видовищних споруд.

Отже, фулерени – це вуглецеві багатоатомні молекули із загальною формулою C_n (n – парне число), які мають конфігурацію випуклого замкненого багатогранника сфероїдального типу. Це і є нова (п'ята) алотропна модифікація вуглецю.

Як це часто буває, після важливого відкриття з'ясовується, що в авторів були попередники, про яких вони не знали. Так, гіпотетична можливість існування великих стабільних молекул, що складаються з атомів одного сорту, передбачалася ще наприкінці 1950-х років. Конкретно, на можливість існування хімічно стабільного кластера C_{60} вказувалося в одній із статей японського фізика Е. Осави (E. Osawa, 1970). А дещо пізніше (1973) це ж передбачення теоретично обґрунтували Д. Бочвар, Є. Гальперін та І. Станкевич (Інститут елементоорганічних сполук). І лише 1985 р. вдалося виявити реальні сліди цих молекул у мас-спектрах.

Хімічні сполуки на основі фулеренів називаються **фулеридами**. Прикладом стабільних фулеридів є сполуки $C_{60}M$ ($M = Na, K, Rb, Cs, Ca, Sr, Ba, La, U$ та ін.), які однозначно ідентифікуються у мас-спектрах при випаровуванні графіту з солями відповідних металів. Атом металу при цьому може знаходитися всередині фулерену (ендоєдричні сполуки) або ззовні (екзоєдричні сполуки), а за певних технологічних умов він також може вмонтовуватися у саму структуру вуглецевого каркасу. При утворенні, наприклад, молекули $C_{60}H_{36}$ водень вмонтовується у каркас C_{60} , так що при цьому власні хімічні р-зв'язки молекули C_{60} перебудовуються з утворенням $C=N$ зв'язків.

Вдалося синтезувати складні сполуки типу $[(C_6H_5)_3P]_2MC_{60}$ і $\{[(C_2H_5)_3P]_2M\}_6C_{60}$, де $M = Pt, Ir, Pd$, та ін., започаткувавши новий напрям у фізиці і хімії комплексних органічних сполук-фулеридів.

Фулерити – це фулерени у твердій фазі (кристали, тонкі плівки, кераміки).

Технологія фулеренів

Після відкриття фулеренів (1985) несподівано виникла цікава обставина, що навіть змусила декого перекваліфікуватися на фахового технолога. А було ось як. Німецький астрофізик Вольфганг Кретчмер (W. Krätschmer) у спектрі міжзор'яної матерії знайшов ІЧ-лінію вуглецю (1430 см^{-1}), яка відповідає C_{60} . Разом з Дональдом Гуффманом (D. R. Huffman) і двома молодшими колегами Кретчмер спробував змоделювати в лабораторних умовах фізичні процеси в міжзор'яних газових середовищах (такі моделювання є вічною мрією астрофізиків, бо ж зі своїми спектрометрами до далеких зір і туманностей можна сягнути хіба у фантазіях або сні). Для цього треба було синтезувати фулерени і детально вимірювати їхні оптичні спектри. Так астрофізик став технологом, розробивши 1990 року відносно нескладну та ефективну технологію одержання цих матеріалів у макроскопічних кількостях. Маючи препарати і зразки (конденсати), до вивчення фулеренів могли залучитися інші лабораторії. Тож 1990 рік став новим етапом, і нові результати не забарилися. Зокрема вже наступного року (1991) були відкриті фулеренові надпровідники.

Технологія, яку розробив Кретчмер і Гуффман, ґрунтується на переробці графіту в фулерен методом лазерного або електродугового випаровування в атмосфері інертного газу.

Звернімо увагу на суттєву роль т.зв. буферного газу (яким звичайно є інертний газ гелій) у механізмі утворення фулеренів. Його головна роль полягає в охолодженні фрагментів випаровування графіту, котрі, очевидно, мають високий ступінь коливного збудження, що перешкоджає утворенню з цих фрагментів стабільних структур („злипання”). Крім того, атоми гелію відводять енергію, що виділяється при об'єднанні фрагментів. Перевагою гелію серед інших інертних газів є його висока ефективність гасити коливні збудження молекул. Мовою спеціалістів, гелій характеризується великими поперечниками взаємодії з коливально-збудженими молекулами. Очевидно, має існувати оптимальний тиск буферного газу, бо при високих тисках затруднюватиметься агрегація вуглецевих фрагментів. Як показали експерименти, таким оптимальним тиском гелію є 50–100 тор.



При перших технологічних спробах у кварцевій трубці розпиляли графітовий електрод і досліджували склад утвореної на стінках трубки сажі. Ні у воді, ані в інших звичних розчинниках цей вуглецевий наліт не розчинявся. Тоді спробували розчиняти його в органічних розчинниках – бензолі, толуолі і т.п., що дало позитивні результати. Далі застосували звичайну техніку препаративної хроматографії, тобто спробували розділити розчин на фракції, пропускаючи його крізь хроматографічні колонки. Було виділено декілька фракцій, які аналізували на мас-спектрометрі. В одній з цих фракцій були знайдені молекули C_{60} . Технологічний ключ було знайдено! Коли В. Кретчмер вилив розчин C_{60} -фракції на промокальний папір і розчин висох, на папері залишився порошок з маленькими кристаликами розмірів часток міліметра. Це були перші синтетичні фулери, здобуті рукою людини. Перша технологічна установка забезпечувала продуктивність близько 1г C_{60} на годину. Цього було цілком достатньо для одержання вимірних зразків і проведення широкомасштабних досліджень. Продуктивність синтезу C_{70} виявилась на порядок меншою. Згодом технологія одержання фулеренів настирно удосконаливалася. У наш час уже можна говорити про невеликі промислові виробництва цих речовин. Що конкретно слід розуміти під „удосконаленням технології”? Як видно з рис. 4, потік фрагментів, що утворюються в результаті випаровування поверхні графіту, містить, поряд з C_{60} і C_{70} , велику кількість легших утворень з парним числом атомів вуглецю. Отже, йдеться про створення таких умов, коли значна частина цих утворень перетвориться в C_{60} . Як з'ясувалося, для цього вугільний конденсат потрібно витримати декілька годин при температурі 600 °С у неполярному розчиннику. За таких умов відбувається перегрупування вуглецевих зв'язків з кінцевим утворенням C_{60} як структури з підвищеною стабільністю. Отже, процедура синтезу C_{60} та ін. фулеренів має дві стадії: а) випаровування або розпилення графіту; б) злипання фрагментів розпилення в стабільні утворення.

Вдалося синтезувати т.зв. нижчі фулери (C_{24} , C_{28} , C_{30} , C_{32}), середні фулери (C_{50} , C_{60} , C_{70}), гіперфулери (C_{76} , C_{78} , C_{82} , C_{84} , C_{90} , C_{96} , C_{102} , C_{106} , C_{110}), а також фулери-гіганти (C_{240} , C_{540} , C_{960}), які є композиціями декількох C_{60} (n кратне 60).

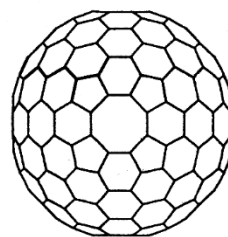


Рис. 7. Фулерен C_{240} : 24 пентагони, 92 гексагони і 6 октаонів. Група симетрії $O_h = m\bar{3}m$

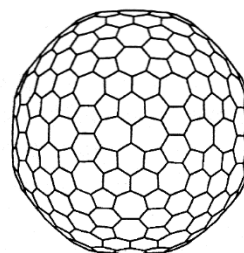


Рис. 8. Фулерен C_{540} : 76 пентагонів, 132 гексагони і 64 гептаони. Група симетрії $D_{2h} = mmm$

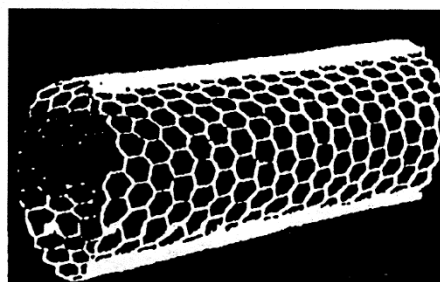


Рис. 9. Фулеренова нанотрубка

Фулери-гіганти C_{240} і C_{540} зображені на рисунках 7 і 8.

Великий науковий і прикладний інтерес мають т. зв. нанотрубки (рис. 9), особливо після створення у 1992–1993 рр. технології їх одержання у кількості майже грам. Сьогодні вдається виготовляти (синтезувати) нанотрубки, які мають по одному або по декілька шарів, з відкритими чи закритими закінченнями. Такі трубочки мають діаметр 2–20 нм і довжину до 0,01 мм. На їх можливі застосування вкажемо нижче.

Розташування атомів вуглецю в нанотрубках вказує, що це є структура скручених у найтонші

¹Для фулеренів C_n значення n (наприклад, 60, 70, 90, 102, 240, 540, 960), при яких структури стабільніші, називають „магічними числами” – за аналогією з оболонковою моделлю атомних ядер, де при магічних числах нуклонів (2, 8, 20, 28, 50, 82, 106) ядра стабільніші і вирізняються іншими фізичними характеристиками.



„рулончики” характерних шарів графіту (див. рис. 2 і 9). Як з’ясувалося, можливі утворення і одношарових, і багатошарових „рулончиків”. Механізми та умови їх формування поки що не цілком з’ясовані. Це цікава проблема для досліджень.

Може виникнути запитання: чи утворення нанотрубок притаманне лише графіту як шаруватій модифікації вуглецю, чи й з інших шаруватих кристалів можна за певних технологічних умов вирощувати нанотрубки? Останніми роками з’явилися повідомлення про одержання нанотрубок на основі шаруватих кристалів MoS_2 , WS_2 , GaSe .

Володіючи високою електровід’ємністю, фулерени здатні вступати в реакції з різними атомами, йонами та радикалами, утворюючи, по суті, щоразу матеріал з новими властивостями. Так були синтезовані металофулерени, фулерени з платиновими шпильками, гідровані фулерени та ін. Шляхом синтезу фулеренових сполук (фулеридів) вдається здійснювати прецизійне керування фізичними властивостями фулеритів.

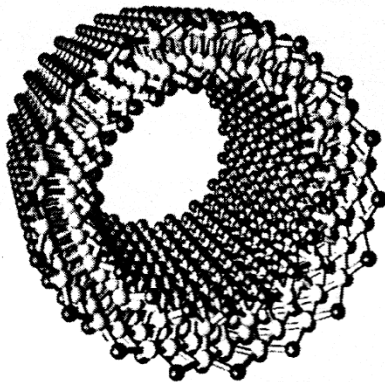


Рис. 10. GaSe-нанотрубка

Найчастіше кристалічні фулерити вирощують з розчинів (здебільшого в толуолі), а тонкі плівки одержують методом конденсації на підкладки. Це непрості технології, бо передбачають низку проміжних стадій, від строгого дотримання яких залежить остаточний результат. Контроль складу і чистоти одержаного матеріалу щоразу проводять спектроскопічним методом за відповідними характеристичними смугами спектрів.

Розгляньмо властивості і можливі застосування цих екзотичних матеріалів. Розпочнімо з фулерену C_{60} , оскільки він є базовою структурою цього класу речовин.

Молекулярна структура C_{60}

Уже було зазначено, що з-поміж усіх фулеренів найвищою симетрією і, як наслідок, – найбільшою стабільністю¹ характеризується молекула C_{60} . Що більше, в цій молекулі є поворотні осі 5-го порядку, перпендикулярні до пентагональних граней (таких осей є 6). Як відомо з теорії симетрії, у кристалах такі симетрійні осі (L_5) принципово неможливі, а серед молекул – це унікальний випадок точкової групи найвищої симетрії.

Атоми вуглецю в C_{60} мають sp^2 -гібридну електронну конфігурацію і кожен з них утворює з трьома найближчими сусідами два одинарні C–C та один подвійний C=C зв’язки (рис. 11). У п’ятикутниках і шестикутниках хімічні зв’язки між атомами вуглецю не еквівалентні: перші – одинарні, другі – почергово одинарні та подвійні. Кожний із шестикутників межує з трьома п’ятикутниками і трьома шестикутниками. П’ятикутники ж безпосередньо між собою не межують, кожен з них межує лише з шестикутниками. Отже, кожен атом вуглецю в молекулі C_{60} посідає вершину, де сходяться два шестикутники і один п’ятикутник. Кожний – без винятку! Усі атоми вуглецю в молекулі C_{60} розташовані в еквівалентних позиціях і принципово не відрізняються один від одного.

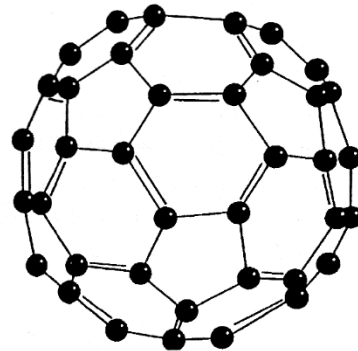


Рис. 11. Кратні зв’язки в фулерені C_{60}

Геометричні параметри нашого „м’ячика” (бакіболу) такі: усі 60 вершинних атомів вуглецю „сидять” на поверхні сфери радіуса $R = 0,341$ нм, а довжина ребер $h = 0,141$ нм.

Молекулі C_{60} властива велика кількість коливних і обертових мод, які виявляються у відповідних спектрах (див. нижче).



Фулерит C_{60}

Закристалізований фулерен C_{60} (тобто фулерит C_{60}) був передусім підданий детальним структурним дослідженням методами X-променевого, електронно- і нейтронографічного аналізів. Для цього були спеціально розроблені математичні алгоритми для обробки X-дифрактограм і нейтронограм фулеритів. Були одержані надійні дані щодо їхньої структури. Ми насамперед охарактеризуємо кристалічну структуру C_{60} , яка у багатьох аспектах є типовою для вищих фулеритів.

За типом хімічного зв'язку фулерит C_{60} належить до молекулярних кристалів. У ньому ковалентна взаємодія між атомами вуглецю у кожній молекулі C_{60} значно сильніша від міжмолекулярної взаємодії ван-дер-ваальсівського типу. З цієї причини молекули C_{60} у кристалі фулериту практично не змінюють ні своєї геометричної конфігурації, ні енергетичної структури. Іншими словами, в кристалі C_{60} молекули зберігають свою індивідуальність. Це стосується й інших фулеритів. Ситуація цілком схожа на ту, що є у випадку закристалізованих елементів VIII групи періодичної системи або інших закристалізованих газів. Це так звані кріокристали. Кріокристали, як і органічні кристали, є типовими молекулярними кристалами. Аналогія між кріокристалами інертних елементів і фулеритами C_{60} є корінною, адже їхні складові елементи – атоми інертних газів та молекули C_{60} – характеризуються сферичною симетрією. Тому природно, що, як і в кріокристалах (та й в інших молекулярних кристалах), ґратка C_{60} забудовується за принципом щільної упаковки. З кристалохімії відомо, що найщільніші упаковки можливі у двох варіантах побудови кристалічної ґратки. Це – кубічна гранецентрована або гексагональна щільноупакована ґратки. Якому варіантові надає перевагу природа у випадку кристала C_{60} ?

Вимірювання показали, що у фулериті C_{60} реалізується перший варіант – кубічна гранецентрована ґратка. При кімнатній температурі постійна ґратки $a = 1,415$ нм і відстань між найближчими молекулами $D = 1,006$ нм. Елементарна комірка містить чотири молекули ($z = 4$). Точкова група симетрії $O_h = m\bar{3}m$.

Знаючи радіус молекул C_{60} ($R = 0,341$ нм), за формулою $D = 2R + l$ знаходимо ширину потенціальної ями між молекулами в ґратці: $l = 0,324$ нм.

Далі неважко обчислити густину кристала, сталу ґратки, коефіцієнт щільності упаковки. Для кубічної гранецентрованої ґратки розрахована густина кристала $1,68$ г/см³, що узгоджується з експериментальними даними ($\rho_{\text{експ.}} = 1,65$ г/см³). Побіжно також зазначимо, що густина фулериту C_{60} значно менша від густини графіту. Це стосується й інших фулеритів.

Тепер розглянемо найголовніші фізичні властивості кристалів C_{60} .

Фулерит C_{60} є напівпровідником з шириною забороненої зони (при кімнатній температурі) $E_g = 1,55$ еВ. Питомий опір цього кристала великий: $\rho \approx 10^{14}$ Ом·см. При стискуванні електроопір зменшується, а ширина забороненої зони зростає. Тому навіть при дуже високих тисках ($P \approx 20$ – 25 ГПа) фулерит C_{60} не набуває металевої провідності, а зберігається як молекулярний діелектрик. Зате при вказаних тисках спостерігається інше явище – перетворення фулериту C_{60} у полікристалічний алмаз. Розміри алмазних крупинок біля мікрметра. Цей результат має значний інтерес, оскільки алмазний порошок, який одержується таким нескладним способом, може знайти різноманітні застосування.

Температура плавлення кристала C_{60} майже на порядок нижча, ніж графіту чи алмазу. Вона близька до 530 К.

При температурі $T_c = 251$ К у фулериті C_{60} виявлено фазовий перехід I роду (рис. 12).

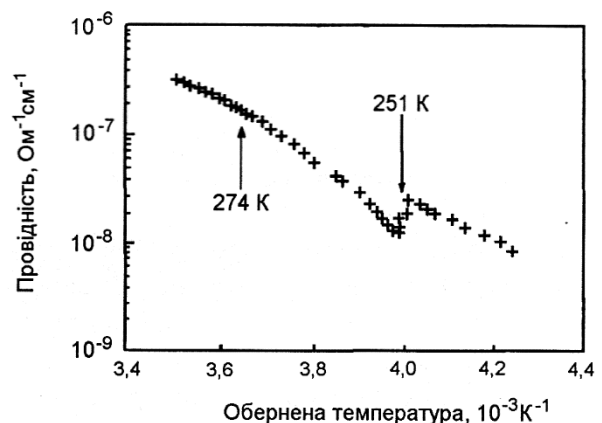


Рис. 12. Електропровідність фулериту C_{60} в околі фазового переходу

Експерименти показали, що залежно від тиску і температури (P, T-діаграми) гранецентровані



кристали фулеритів можуть переходити в інші кристалічні фази – орторомбічну, тетрагональну або ромбодрічну структури з густиною кристала від 1,8 до 2,5 г/см³.

Фулерити нетоксичні, у звичайних умовах на повітрі стійкі, не гігроскопічні. При $T < T_{пл}$ кристали не розкладаються, але при наближенні до точки плавлення сублімують. Відразу зазначимо, що явище сублімації характерне для молекулярних кристалів.

Оптичні спектри фулеритів пов'язані з енергетичною структурою C_n . Зокрема високосиметричній молекулі C_{60} властива велика кількість коливних мод. Сьогодні для цієї структури виконана детальна симетрична класифікація електронних і коливних станів та визначені правила відбору для квантових переходів. На рис. 13–15 зображені спектри поглинання і люмінесценції напилених тонких шарів C_{60} у широкому спектральному діапазоні – в інфрачервоній, видимій та ультрафіолетовій областях. Ми детально не аналізуватимемо структуру цих спектрів, яка містить багату інформацію.

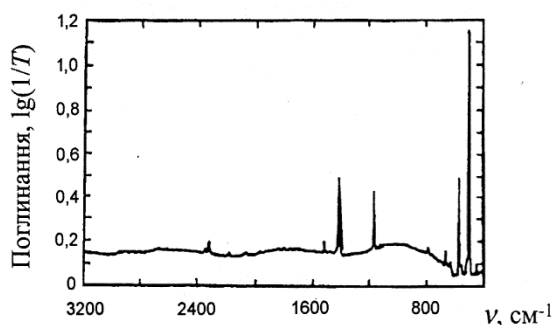


Рис. 13. Спектр інфрачервоного поглинання тонкого шару C_{60} , напиленого на кремнієву підкладку. Товщина шару $d = 2$ мкм

Звернімо увагу лише на інфрачервоний спектр поглинання. Вузькі смуги (майже лінії) ІЧ-спектра фулериту C_{60} так само характерні і для фулерену C_{60} (наприклад, у розчині в толуолі), оскільки вони пов'язані з внутрімолекулярними коливаннями. Найхарактерніші частоти 527, 576, 1182 і 1429 см⁻¹ відносяться до дипольно дозволених правилами відбору молекулярних коливань C_{60} . Ці частоти виразно підтверджені також методом нейтронного розсіювання. Їх використовують як

характеристичні частоти для ідентифікації C_{60} у процесах синтезу фулеренів, тобто вони служать індикатором при відпрацюванні нових технологій одержання фулеренів.

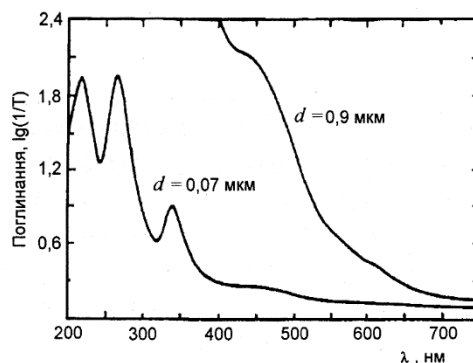


Рис. 14. Спектри поглинання у видимій і ультрафіолетовій областях тонких шарів C_{60} , нанесених на кварцову підкладку

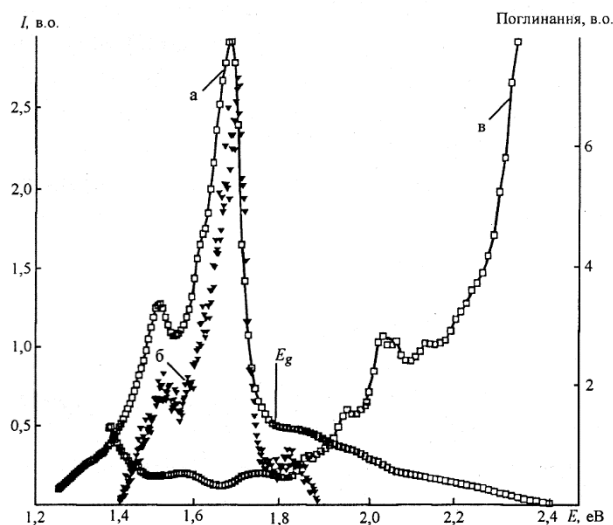


Рис. 15. Спектри люмінесценції півки C_{60} при двох способах збудження – азотним лазером – а та синхротронним ультрафіолетовим випромінюванням – б, а також спектр поглинання цієї півки – в

Перспективи застосування фулеренів і фулеритів

Фулерени характеризуються високими електровід'ємностями, тому в хімічних реакціях вони є сильними окислювачами й ефективними реагентами. Приєднуючи до себе радикали різної хімічної природи, вони здатні утворювати широкий



клас хімічних сполук (фулериди) з цікавими властивостями. Зокрема молекули фулеренів активно реагують з біологічно важливими молекулами. Це відкриває перспективи синтезу нових лікарських препаратів, у т.ч. для виведення радіоактивних елементів, оскільки фулерени є молекулярними пастками для радіоактивних атомів.

Фулерити нетверді, вони вирізняються своєю пластичністю, що здебільшого є характерним для молекулярних кристалів. Залежність деформації фулеритів від тиску нелінійна. Є у механіці деформованих твердих тіл таке поняття, як межа (або границя) текучості. Це механічне напруження, при якому настає пластична деформація і т. зв. текучість. Останнє означає, що при певних тисках тіло може деформуватися без посилення навантаження. Так ось, межа текучості фулеритів значно менша, ніж у найм'якших металах. Ця властивість може бути використана в техніці. Йдеться про т. зв. тверді мастила – речовини, які зменшують тертя між рухомими деталями машин. Дослідження показали, що поверхні твердих матеріалів, покритих фулереновими плівками, мають аномально низькі коефіцієнти тертя.

Велике зацікавлення викликають можливості застосування в електронній техніці фулеренових нанотрубок. Вже перші експерименти не могли не заінтригувати дослідників. При контакті відкритого кінця нанотрубки з поверхнею розтопленого свинцю вона під дією капілярного ефекту заповнювалася металом, перетворюючись у найтонший ізольований провідник в оболонці. Легко здогадатися, які перспективи тут відкриваються для мікроелектроніки. Далі з'ясувалося, що фулеренові ниткоподібні провідники є ефективними емітерами електронів, а висока міцність та еластичність нанотрубок дає змогу використовувати їх у майбутньому в технологіях високоякісних мікрокомпонентів, в кріоелектроніці тощо.

Це була чи не найбільша після 1986–1988 рр. сенсація – відкриття надпровідності при внесенні лужних металів у ґратку кристалічного фулерену C_{60} . Навесні 1991 року у лабораторії фірми „Белл” відважились на ризикований експеримент. При підвищеній температурі (декілька сотень градусів Цельсія) тонкоплівковий зразок чистого C_{60} був оброблений парами лужного металу калію. Керівника групи дослідників А. Гебарда (А. F. Hebard) насамперед цікавило, як прореагує фулерен з лужним металом. Зазначимо, що подібну реакцію технічно забезпечити не так просто, оскільки лужні метали при взаємодії з реагентами, котрі забирають у них валентний електрон, спалахують і на-

віть вибухають. Тому дослід доводилось проводити у герметично закритій, напочатку вакуумованій, а потім наповненій інертним газом, камері. Що ж виявилось?

Досліди показали, що фулерит C_{60} справді прореагував з калієм. При цьому несподівано з'ясувалося, що в результаті був синтезований новий фулереновий надпровідник з критичною температурою біля 20 К. Тоді Гебард з колегами вирішили перепробувати взаємодію C_{60} з усіма іншими лужними металами, як поодиночі, так і попарно, напр., з калієм і рубідієм, калієм і натрієм, літієм і цезієм. Буквально за декілька місяців подібні досліди були повторені у багатьох лабораторіях світу, себто майже повторився сценарій наукового ажіотажу років 1986–1988. Вивчали реакції C_{60} не лише з комбінаціями лужних металів, але й з іншими металами інших груп періодичної системи.

Тож які були одержані результати і чи були при цьому знайдені якісь закономірності щодо критичної температури? Насамперед зазначимо, що для сполуки $RbTl_2C_{60}$ критична температура виявилася серед цього класу матеріалів найвищою: $T_k \approx 48$ К.

У травні 1994 р. корпорація Міцубісі повідомила, що фулерени почали використовуватись як основа при виробництві нового покоління акумуляторних батарей для персональних комп'ютерів і слухових апаратів. Ці батареї мають у 5 разів кращі параметри порівняно з поширеними металогідридними нікелевими батарейками. Вони характеризуються малою масою та підвищеною екологічною безпекою.

Фулерити цікаві своїми напівпровідниковими властивостями. У них методом легування можна створити р–п-переходи і на цій основі виготовляти фулерен-транзистори. Проводяться дослідження з метою створити ефективні фулеритові сонячні батареї, а також світлодіоди та лазерні діоди. Леговані фулерити відкривають нові технологічні можливості у створенні різних датчиків та сенсорних пристроїв. Є підстави сподіватися, що найближчим часом вдасться також синтезувати фулерити з магнетними домішками, що забезпечить їх феромагнетні властивості.

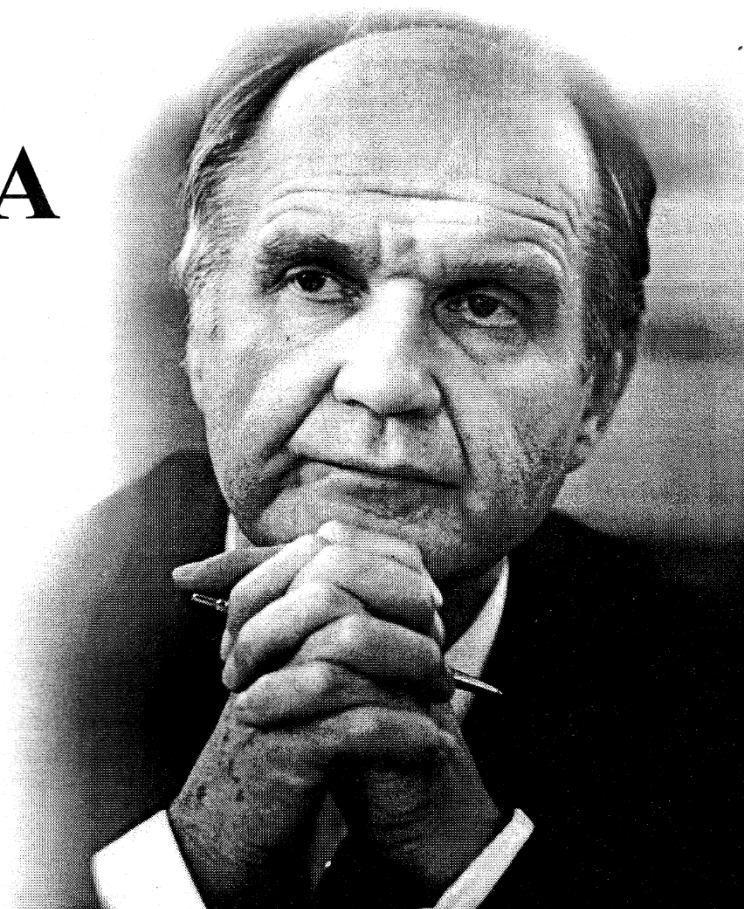
Розчини фулеренів характеризуються нелінійними оптичними властивостями, у зв'язку з чим вони становлять інтерес для прикладної оптики як фотохромні середовища.

Загалом, можемо стверджувати, що фулерени є важливою проміжною ланкою поміж простими неорганічними матеріалами та складнішими органічними молекулярними структурами.



ФОРМУЛА ЖИТТЯ

75 років від дня
народження
Ігоря Рафаїловича
Юхновського



1 вересня 2000 року виповнилося 75 років від дня народження відомого українського вченого, доктора фізико-математичних наук, професора, академіка НАН України, народного депутата України Ігоря Рафаїловича Юхновського*. В Інституті фізики конденсованих систем НАН України відбулася Вчена рада присвячена цьому ювілею. Ювіляра вітали його учні, відомі вчені наукових установ та університетів, громадські та державні діячі. З нагоди 75-річчя від дня народження, Ігоря Рафаїловича Юхновського нагороджено орденом „За заслуги” першого ступеня.

Народився Ігор Рафаїлович Юхновський 1 вересня 1925 року в селі Княгинин Рівненської області. У подружжі Анни Фортунатівни та Ра-

фаїла Автономовича Юхновських він був другим сином. Дід І. Юхновського по матері Фортунат Бельський був священиком і одночасно мав лікарську практику. З родини священиків походить і батько Ігоря Рафаїловича. Однак він не підтримав родинної традиції, не став священиком, а працював урядовцем у містечках Волині, яка напередодні Другої світової війни належала Польщі. Рафаїл Юхновський міг би зробити блискучу службову кар’єру, якби піддався намовлянням начальства перейти із православної віри в католицьку. Але подружжя Юхновських не приставало на це, за що доводилось платити частими переїздами з одного містечка в інше, та ще й з малими синами Михайлом та Ігорем. З особливою теплою в багатьох інтерв’ю та розповідях Ігор Рафаїлович згадував дитячі роки, своїх батьків та діда.

*У статті використані матеріали з книги „Формули життя і творчості академіка Юхновського”. Есе, інтерв’ю, хроніка. – Львів; Київ, 2000. – 160 с., Вченої ради ІФКС НАН України (1.09.2000, Львів) та спогади керівника відділу „Статистичної теорії конденсованих систем” ІФКС НАН України, доктора фіз.-мат. наук Михайла Козловського.



У 40-х роках Юхновські осідають в Кременці, старовинному мальовничому містечку. 1932 року Ігор Юхновський вступив до Кременецької гімназії. *„Вчився в Кременецькій гімназії. Спеціально на цьому зупинюся, бо початкові школи відіграють свою роль у формуванні людини. Це школа чудової традиції, столітньої традиції. Ви пам'ятаєте, що Київський університет був створений з Кременецького ліцею 1825 року. У ліцеї чудова бібліотека, чудові рисувальні класи. Вони склалися з чотирьох величезних залів, там стояли скульптури, копії грецьких та римських художників. На уроках малювання все було під руками: і добрі олівці, фарби, відповідно насвітлені горщики і добрий викладач. Кожен міг собі вибрати кімнату і годину малювати ... Концерти на скрипці. Заняття симфонічного оркестру, на яких викладач повністю описує зміст твору: маєте почути як гойдається поле, як відбувається гра вітру і поля, власне, маєте, то не так відчутти як побачити ... У спорті дуже висока культура легкої атлетики ... Пам'ятаю стародавній парк, стародавнє місто ...”*

„...Я вчився у польській гімназії. У польській школі я був як затуманений. Я часто не розумів логіки речей, висловлених чужою мовою. І тільки тоді, коли ми будемо працювати своєю рідною мовою, будемо спроможні створювати вагомі твори, як з точки зору науки, так і мистецтва. Тільки материнська мова заложена десь далеко у нашій глибині дає нам такі звичини логічного мислення, які недоступні іншій чужій мові, як би ми не намагались її опанувати.”

Цей складний період історії – польська влада, прихід радянських військ, гори трупів замордованих людей, після входження німецьких військ, серед яких багато учнів старших класів гімназії – залишив відбиток у його свідомості на довгі роки.

Ігор Юхновський брав участь у Другій світовій війні у лавах Червоної армії (1944–1946). Тяжкою була наука війни, кожен хотів жити, але щоб не зачерствіти не озлобитись, зберегти здатність прощати. Дідова наука і християнське виховання допомагали ефрейторові Юхновському у ці важкі роки. З вихору війни він виніс не озлобленість і черствість, а потребу злагоди, спокою та доброти.

1946 року І. Юхновський вступив на фізико-математичний факультет Львівського університету імені Івана Франка з незакінченою середньою освітою. *„То страшно, як я вчився”*, – не раз згадував Ігор Рафаїлович ті роки. Ці слова сміливо можна брати як життєве кредо усього його життя. Лише на третьому курсі, будучи візирцем студентом, Ігор Юхновський отримав атестат за середню школу.

Ігор Рафаїлович одружився 1951 року. Його дружина Ніна Василівна – учитель хімії. Вони мають двох дітей, внуків.

Університет І. Юхновський закінчив з відзнакою 1951 року і вступив до аспірантури на кафедру теоретичної фізики. Його науковим керівником був професор А. Ю. Глауберман. 1954 року І. Юхновський захистив дисертацію й отримав учений ступінь кандидата фізико-математичних наук. Як учений він формувався під впливом праць та ідей М. М. Боголюбова. Написавши свою дисертацію на папері з учнівських зошитів, Ігор Рафаїлович поїхав до М. М. Боголюбова, якому дисертація сподобалась і він погодився бути опонентом на захисті. З тих пір доброзичливі наукові та людські взаємини поєднували ці дві видатні особистості. Ігор Юхновський завжди наголошує на своїй приналежності до наукової школи М. М. Боголюбова.

Подальша науково-педагогічна діяльність молодого кандидата наук пов'язана з кафедрою теоретичної фізики, де ще недавно він був аспірантом. Доцент кафедри (1954–1959), завідувач кафедри (1959–1969). За цей час І. Юхновський захистив докторську дисертацію (1965) та отримав звання професора. 1972 року був обраний членом-кореспондентом Академії наук України, а з 1982 року – академік НАН України.

І. Юхновському притаманна висока вимогливість, цілеспрямованість та надзвичайна працездатність. У поєднанні з оригінальним підходом до розв'язання наукових проблем це дало йому змогу об'єднати навколо себе обдарованих молодих науковців, спрямувати їхню роботу на вирішення актуальних проблем теоретичної фізики і в результаті створити Львівську школу статистичної фізики. Основи цієї школи були закладені у Львівському відділі ІТФ АН УРСР, створення



якого він зініціював, і який очолив 1969 року. Цей відділ (який спочатку налічував три працівники) згодом переріс у Львівське відділення ІТФ АН УРСР (1980), а пізніше – в Інститут фізики конденсованих систем Національної Академії наук України (1990). Відділ складався з менш як 20 співробітників, вік яких не перевищував 25 років. Переважно це були випускники фізичного факультету Львівського університету імені Івана Франка, які після закінчення аспірантури в І. Юхновського займалися дослідженнями в галузі теоретичної фізики. На той час аспірантами І. Юхновського були Іван Вакарчук (нині ректор Львівського національного університету імені Івана Франка), Юрій Рудавський (нині ректор національного університету „Львівська політехніка”). Поряд з молодими аспірантами у відділі Юхновського працювали вже сформовані науковці. Згодом вихованці І. Юхновського стали відомими вченими, професорами. На той час це були одержимі наукою молоді люди, які обожнювали свого керівника і нерідко допізна затримувалися разом з ним на роботі, обговорюючи актуальні задачі статистичної фізики.

Створення нової наукової школи вимагає сильної особистості, людини непересічного характеру, сильної волі, яка здатна до наукової творчості. Талант ученого й організатора науки, людини, покликаного знайти та розкрити в молодих людях майбутніх науковців притаманні Ігореві Рафаїловичу. Глибока інтуїція (не лише у розв'язанні наукових проблем) дала йому змогу згуртувати навколо себе колектив однодумців, який згодом переріс в визнану наукову школу – Львівську школу статистичної фізики.

Підготовка наукових кадрів потребує довгої і кропіткої роботи. Вона потребує не лише постійного навчання, систематичного і критичного відбору матеріалу, але й ретельного пошуку майбутніх науковців. Розпочинати цю роботу потрібно зі шкільної лави, шукати молодих людей, які мають „іскру Божу”. Саме цим шляхом і пішов І. Юхновський. Маючи талант від природи, він став ініціатором створення Малої академії наук школярів „Еврика”. Починаючи з 1978 року, як Президент цієї академії, він доклав чимало зусиль, щоб обдаровані учні спробували свої сили.



Акад. Ігор Юхновський виступає на Вченій раді ІФКС НАН України. 1 вересня 2000, м. Львів.

Важливим науковим досягненням школи Ігоря Юхновського стало узагальнення теорії розчинів електролітів. Поряд з науковим пріоритетом це має велике практичне значення, адже тісно пов'язане з проблемою опріснення води.

У середині 1960-х років І. Юхновський опублікував праці, які започаткували великий цикл досліджень з актуальних питань теорії взаємодіючих квантових частинок. У них запропоновано та розвинуто новий оригінальний підхід – метод зміщень і колективних змінних (ЗКЗ). Окремий напрям у розвитку методу ЗКЗ пов'язаний із дослідженням систем взаємодіючих бозе-частинок.

Принципово важливі результати отримав Ігор Юхновський також при побудові теорії фазових переходів і пов'язаних з ними критичних явищ. Перші публікації в цьому напрямі він зробив у середині 1970-х років. У працях І. Юхновського розвинуто оригінальний метод обчислення статистичної суми тривимірної моделі Ізінга. Це відкрило ще один шлях до побудови послідовної теорії фазових переходів на мікроскопічному рівні.

Суттєві і принципово нові результати І. Юхновський отримав у середині 1980-х років при описі фазових переходів у флюїдах. Поєднання концепції системи відліку та розвинутого ним підходу до опису критичної поведінки моделі Ізінга дало змогу описати фазовий перехід в системі рідина-газ.



Починаючи з 1986 року, Ігор Рафаїлович приділяв постійну увагу проблемам, пов'язаним з Чорнобильською аварією. Ще тоді були розпочаті наукові дослідження водних розчинів радіоактивних елементів відповідно до тематики наукових досліджень Національної академії наук України. Проблема водних розчинів радіоактивних елементів, які взаємодіють із паливомісними масами та фрагментами активної зони реактора в об'єкті „Укриття” гостро виявились, починаючи з 1994 року. Тому активно поновились наукові дослідження процесів взаємодії паливомісних мас з водними розчинами. Ігор Рафаїлович був ініціатором створення 1995 року спільного відділу „Теоретичних досліджень фізико-хімічних процесів у радіоактивномісних середовищах” між Інститутом фізики конденсованих систем НАН України та Міжгалузевим науково-технічним центром „Укриття”. У процесі досліджень було встановлено роль процесів радіолізу, гідролізу, комплексотворень у водних розчинах радіоактивних елементів (йонів уранілу, плутонілу, америцинілу), що взаємодіють із паливомісними масами.

За результатами досліджень запропоновано використати процеси взаємодії водних розчинів із паливомісними масами, як один із способів вилучення ядерного палива із об'єкта „Укриття”. У цьому напрямі продовжуються активні дослідження фізико-хімічних процесів у водних розчинах радіоактивних елементів. Ігор Рафаїлович приділяє велику увагу цим надзвичайно важливим проблемам.

Це далеко неповний перелік наукових задач, у формулюванні і вирішенні яких І. Юхновський брав безпосередню участь.

Свій багатий науковий і життєвий досвід академік І. Юхновський використовує в роботі Міжвідомчої аналітично-консультативної ради з питань розвитку продуктивних сил і виробничих відносин при Кабінеті Міністрів України. З 1997

року і досі він є незмінним заступником голови ради. За цей час він опрацював та видав рекомендації стратегічного розвитку таких галузей господарства України, як електроенергетика (1997), сільське господарство (1997, 1999), гірничо-металургійний комплекс (1998), хімічні технології й хімічна промисловість (1998), попередній макроекономічний огляд господарського комплексу України (1998), промисловість будівельних матеріалів (1999), харчова промисловість (2000). Глибоке розуміння академіком І. Юхновським суті проблем з кожного із вказаних напрямів та розгляд їх з єдиних неупереджених позицій є неоціненним внеском у розбудову України.

Сьогодні академікові І. Юхновському виповнюється 75 років. Його творчий доробок – це понад 500 наукових праць, 5 монографій, підручник з квантової механіки, книга „Україна – незалежна держава”, низка аналітичних матеріалів із стратегії розвитку основних галузей України. 1986 року вченому присуджена престижна премія ім. М. М. Крилова (спільно з М. Боголюбовим та С. Пелетмінським) за цикл праць „Математичні методи дослідження систем з спонтанно порушеною симетрією”. І. Юхновський нагороджений орденами і медалями.

З 1990 року І. Юхновський є народним депутатом Верховної Ради України. З цього часу Ігор Рафаїлович став відомою політичною фігурою не тільки в Україні – голова Народної Ради, голова постійної комісії з питань науки і освіти Верховної Ради, перший віце-прем'єр уряду України (1992–1993).

„Це людина дуже спокійна, виважена, кожному свою позицію і пропозицію обгрунтовує, а не просто декларує, має здатність до глибокого аналізу ситуації... Ця людина достойно і гідно представляє інтереси своїх виборців, інтереси України і стоїть за українську державу – незалежну, демократичну і правову” (Л. Кравчук).

Редколегія журналу „Світ фізики” вітає академіка Ігоря Рафаїловича Юхновського з його 75-річчям і бажає йому міцного здоров'я, подальших успіхів у науковій роботі та розбудові Української держави.



ОЛЕКСАНДР СМАКУЛА: повернення на рідну землю

Український учений Олександр Смакула (09.09.1900 – 17.05.1983) увійшов в історію науки як один з найвидатніших фізиків ХХ сторіччя. Він народився на межі епох, і доля вщувала йому стати свідком революційних змін у науці і драматичних подій у суспільному житті. Він був серед фундаторів нових наукових напрямів – фізики твердого тіла, твердотільної електроніки та оптоелектроніки, молекулярної біології, фізики тонких плівок. О. Смакула був активним учасником утвердження нової, квантової концепції будови речовини. Він автор важливих винаходів і праць з оптики й метрології, технології нових матеріалів для електронної та оптичної техніки.

Є декілька галузей сучасної фізики, де внесок О. Смакули був визначальним і загальноновизнаним. У науковому вжитку є чимало понять, пов'язаних з іменем нашого вченого: формула Смакули; противідбивний або безрефлекторний (безвідблисковий) шар Смакули (просвітлення оптики, антирадарні покриття); прецизійний метод Смакули для визначення числа Авогадро; Смакула удосконалив метод вирощування синтетичних моно-

кристалів із розплаву; метод призматичного перфорування, вперше запропонований Смакулою для вивчення пластичних деформацій кристалів. При розгляді фотоперетворень в молекулах і кристалах стильбену за участю π -електронів спеціалістам відомий механізм, що має назву „інверсія Смакули”. Серед матеріалів для інфрачервоної техніки добре знааний матеріал, який вперше синтезував та вивчив Смакулою.

Народився Олександр Смакула у селянській родині на Тернопільщині (с. Добриводи, що біля Збаража), з відзнакою закінчив (1922) українську гімназію в Тернополі. У 1918–1920 рр. О. Смакула був у лавах Української Галицької Армії, яка боронила незалежність України. Вищу освіту юнак здобув у Геттінгенському університеті (Німеччина). Наукові дослідження розпочав ще в студентські роки під керівництвом професора Роберта Поля. У грудні 1927 р. О. Смакула захистив дисертацію і здобув ступінь доктора філософії. Короткий час працював в Одеському університеті (1928–1929), відтак науковим співробітником Першого Фізичного інституту при Геттінгенському університеті, керівником оптичної лабораторії Інституту медичних дослідів у Гайдельберзі, а з 1934 р. – дослідної лабораторії фірми Карл Цейс (Єна, Німеччина)¹.

1930 року Олександр Смакула був обраний дійсним членом Наукового товариства ім. Шевченка у Львові.

Після Другої світової війни з 1946 року учений працював у США, де в Массачусетському технологічному інституті посідав посаду професора фізики, заснував Лабораторію фізики кристалів і був першим її директором, він створив наукову школу в галузі кристалофізики.

Наукові здобутки О. Смакули набули широкого визнання у світі. Він був членом багатьох наукових товариств і академій, отримав чимало нагород і премій.



*Відкриття II Смакулового симпозиуму
(м.Тернопіль, 6 вересня 2000 р.).
Фото Г. Шопи*

¹Детальніше про О. Смакулу та його винаходи читайте в журналі „Світ фізики”, 2000. № 1.



Обставини склалися так (воєнні лихоліття, окупаційні режими в Україні), що своє творче життя О. Смакула провів за кордоном. Тому у нас донедавна про нього фактично нічого не знали. В „Українській радянській енциклопедії” та у довіднику „Фізика”, виданих у Києві, це ім’я не згадувалося. Водночас у подібних закордонних виданнях про нього писали і пишуть, бо йому належать пріоритетні результати у згаданих вище галузях фізики.

Якщо нині заглянути до Science Citation Index, то пересвідчимось, що досі на праці О. Смакули є багато авторитетних посилань. Таке буває з працями винятково високого наукового рівня.

Значення діяльності О. Смакули визначається не лише його науковим доробком. Він був прекрасним педагогом і багато уваги приділяв формуванню наукової школи. Його учнями були представники різних країн.

З нагоди 100-річного ювілею дійсного члена НТШ, професора Олександра Смакули рішенням 30-ої сесії Генеральної конференції ЮНЕСКО 2000-й рік оголошено РОКОМ СМАКУЛИ.

В Україні ювілей ученого відзначено на державному рівні. Надійшли повідомлення про ювілейні семінари у Геттінгені та Єні (Німеччина), а також у Массачусетському технологічному інституті (США).

Помітною подією у житті наукової громадськості став II Міжнародний Смакуловий симпозиум „Фундаментальні і прикладні проблеми сучасної фізики” у Тернопільському державному техніч-

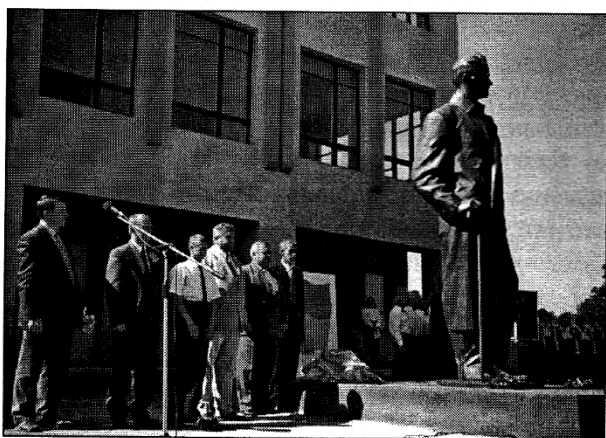
ному університеті ім. Івана Пулюя з 6 до 10 вересня 2000 р. Нагадаємо, що I Смакуловий симпозиум відбувся 15–16 травня 1992 р. у Львівському національному університеті імені Івана Франка. Основним організатором симпозиумів було Наукове товариство ім. Шевченка.

До програми Симпозиуму було включено 450 наукових доповідей і виступів, які були подані від науковців України, США, Німеччини, Росії, Польщі, Англії і Канади. Було заслухано доповіді 150 учасників Симпозиуму, що стосувались як наукового подвигу О. Смакули, так і найважливіших проблем сучасної фізики: оптики кристалів і тонких плівок, властивостей і технологій матеріалів для електронної техніки, застосування фізичних методів у біології та медицині. Представлені найновіші наукові результати засвідчили вагомий здобуток української фізичної науки, які дають змогу визначити пріоритети наукових пошуків на найближче майбутнє.

Питання про співпраці та можливу підтримку актуальних фізико-технічних проектів обговорено у доповіді Виконавчого директора Науково-технологічного центру в Україні проф. Лео Овсяцького.

На Симпозиумі були представлені нові архівні матеріали, праці О. Смакули, проаналізовано роль наукового доробку вченого у розвитку сучасної фізики і науки загалом.

До 100-річного ювілею видано перший том „Наукових праць” О. Смакули, підготовлено до друку переклад його монографії „Монокристали”, вийшов ювілейний випуск „Вісника Фонду О. Смакули”, надруковані „Матеріали II Смакулового симпозиуму”, у пресі опубліковано низку статей про життя і науково-освітницьку працю О. Смакули. Державний комітет зв’язку та інформації випустив художній конверт „Олександр Смакули” (зі спеціальним погашенням). У м. Тернополі відбулась Ювілейна Академія на відзначення 100-річчя від дня народження професора Олександра Смакули, а на батьківщині вченого в с. Добриводи Збаразького району Тернопільської області встановлено величний пам’ятник ученому.



*Пам’ятник Олександрові Смакулі у с. Добриводи (відкриття пам’ятника, 10 вересня 2000 р.).
Фото З. Грондзала*

Ярослав ДОВГИЙ,
*професор,
голова програмного комітету
II Міжнародного
Смакулового симпозиуму*



100 років від дня народження
Деніса Габор



Винахідник ГОЛОГРАФІЇ

Угорсько-англійський фізик Деніс (Денеш) Габор народився в Будапешті 5 червня 1900 року. Він був старший з трьох синів Андісни Кальман і Берталана Габор. Його мати до заміжжя була акторкою, а батько – директором великої вугільної компанії. В сім'ї шанувались інтелектуальні цінності, велика увага приділялась освіті дітей, була створена навіть домашня лабораторія.

Середню освіту Деніс отримав у державній школі Міклоша Тольді. Ще у шкільні роки Д. Габор зацікавився фізикою. У домашній лабораторії він з братом відтворював досліди, про які читав у наукових книжках і журналах.

1918 року Д. Габор був призваний до армії. Після офіцерських курсів, що готували артилеристів та кавалеристів, восени 1918 року його направили на італійський фронт. На щастя, війна швидко закінчилася. У листопаді цього ж року Деніс повернувся додому та вступив до Будапештського технічного університету на спеціальність інженер-механік. Хоча він захоплювався фізикою, але цю спеціальність вибрав тому, що роботу дипломованому фізику знайти тоді в Угорщині було майже неможливо.

Навчаючись на третьому курсі, Д. Габор знову призвали до армії. Однак він ухилився від служби, переїхавши до Берліну, де продовжив свою освіту у Берлінському технічному університеті. Під час навчання він часто бував у Берлінському університеті, де слухав лекції таких видатних учених, як Макс Планк, Вальтер Нерст, Макс фон Лауе, а також відвідував семінар Альберта Айнштейна.

Отримавши ступінь доктора з електротехніки (1927), Д. Габор почав працювати в фізичній лабораторії компанії „Сіменс і Хальске” над ство-

ренням нових джерел світла. Серед робіт, які він там виконав, був і винахід кварцевої ртутної лампи. Після закінчення контракту, Д. Габор повернувся до Угорщини. Працюючи позаштатним співробітником у лабораторії науково-дослідного інституту електронних ламп, він створив новий тип флюоресцентної лампи, яку назвав *плазмовою*. Не маючи змоги продати патент на свій винахід в Угорщині, він емігрував до Англії, де з 1934 до 1948 року працював у компанії „Брітіш Томсон-Г'юстон”. Там Д. Габор займався удосконаленням своєї плазмової лампи, однак ця робота не завершилась через технічні труднощі.

1936 року Деніс Габор одружився зі своєю співробітницею М. Батлер.

З 1937 до 1948 року учений займався електронною оптикою – галуззю фізики, що вивчає способи керування електронними променями та їх фокусування. У роки Другої світової війни робота Габор в галузі електронної оптики була припинена (Д. Габор тоді ще не був громадянином Великобританії (громадянство він отримав 1946 року), і йому заборонялось працювати над військовою тематикою). Через це він займався дослідженнями, які не стосувалися секретної тематики. Не знаючи про роботи, що привели до створення радіолокатора, він створив власну систему, яка мала б виявляти літаки, реєструючи тепло від їхніх двигунів.

Незадовго до закінчення війни Д. Габор знову повернувся до досліджень в галузі електронної оптики і розпочав роботу, що привела його до створення голографії. Спершу він поставив перед собою завдання вдосконалити електронну лінзу – пристрій, що фокусує електронні пучки. Такі лінзи застосовувались в електронних мікроскопах, які винайшов Е. Руска 1933 року (див. журнал „Світ фізики”. 1999, № 1). Вони дають змогу значно збільшити зображення за допомогою спрямованого на об'єкт пучка електронів з наступним фокусуванням відбитих електронів на люмінесцентному екрані. Згідно з принципами



квантової механіки електрони, як і світло, мають хвильові властивості. Оскільки довжина хвиль прискорених електронів менша від довжини світлових хвиль, електронний мікроскоп дає більше розділення. У 1930-х роках роздільна здатність електронних мікроскопів обмежувалась недосконалістю лінз. Вони спотворювали зображення, що призводило до втрати частини важливої інформації.

Д. Габора зацікавило питання – чи можна виправити спотворене електронне зображення оптичними методами? І він прийшов до думки про те, щоб записану на електронному мікроскопі картину відтворювати світловим пучком із використанням оптичної системи, яка має такі ж недоліки, що й електронна система. Але для запису картини повинен використовуватись ще один пучок (так званий когерентний фон), що є принципово важливим і стало предметом відкриття.

1947–1948-х роках Д. Габор теоретично обґрунтував свій метод і провів експерименти. Першу інтерференційну картину в прохідному світлі вчений отримав 1948 року. Як об'єкт він використав зображення, в якому були тільки прозорі і непрозорі місця без плавних переходів оптичної густини („транспарант“). Скрізь прозорі місця проходив когерентний фон. Картину, записану експериментально, він назвав *голограмою** (рис. 1). Сьогодні якраз оптична голографія досягла найбільшого розвитку та набула широкого застосування.

У чому суть голографічного методу і яка його відмінність від звичайної фотографії?

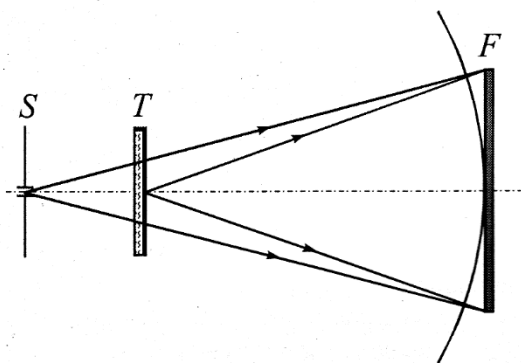


Рис. 1. Голографічна схема Габора:
S – точкова діафрагма, *T* – „транспарант”,
F – фотографічна пластинка

*Голограма – від двох грец. слів *олос* – весь, повний і *графо* – пишу.

Голограма – це своєрідний запис хвильового фронту світла, відбитого від предмета (або групи предметів). Пучок когерентного лазерного випромінювання розщеплюють на два пучка: опорний та предметний. Останній направляють на предмет. Світлові хвилі, відбиті від предмета (або які пройшли через предмет), несуть інформацію про нього й поширюються у різних напрямках. Частина з них потрапляє на фотопластинку. Одночасно на цю ж фотопластинку направляють опорний пучок. Оскільки ці дві світлові хвилі когерентні, вони інтерферують, утворюючи в області фотопластинки своєрідну інтерференційну картину. Записана на фотопластинці інтерференційна картина і є голограмою. Для відтворення зображення використовують цю ж схему, що й при записуванні голограми. Опорний пучок уже як відтворюючий, потрапляючи на голограму (своєрідна система інтерференційних смуг), дифрагує. Одна із дифрагованих хвиль має хвильовий фронт, що є точною копією хвильового фронту, відбитого від предмета. Якщо дивитись на голограму, то здаватиметься, що ми бачимо реальний предмет, розміщений там, де він був під час запису голограми. Голографічне зображення сприймається як реальний предмет на відміну від звичайної фотографії, яка сприймається як проекція предмета на площину. Це зумовлене тим, що в голограмі не втрачена інформація про фазу світлових хвиль, відбитих від предмета. Завдяки цьому голографічне зображення – об'ємне, і ми маємо змогу заглянути за предмети, розміщені на передньому плані. Якщо голограму розрізати на дві частини, то знову отримаємо дві повноцінні голограми цього ж предмета. Якщо ж розрізати фотографію предмета на дві частини, то матимемо на кожній з них зображення половини предмета.

Бурхливого розвитку голографічний метод, відкритий Д. Габором ще 1947 року, набув після винайдення лазера, потужного джерела когерентних світлових хвиль. Американські вчені І. Лейт і Ю. Упатнієкс уперше використали лазери для одержання голограми. Вони удосконалили метод Габора, використовуючи для запису і відтворення частину голограми, що знаходилася поза віссю системи.

Вагомими досягненнями в царині голографії були праці Ю. Денисюка про об'ємні голограми, опубліковані 1962 року. У класичному методі Габора опорний пучок і когерентний фон направляли на фотопластинку з одного боку. При цьому ізофазні поверхні стоячих хвиль інтерференцій-



ної картини майже паралельні до напрямку об'єктної і референтної хвиль. Ю. Денисюк запропонував направляти інтерферуючі пучки назустріч один одному.

Праці І. Лейта і Ю. Упатнієкса (1964) зробили різкий стрибок у розвитку голографії. Ще Д. Габор висунув думку, що метод голографії здатний передавати глибину предмета, але тільки І. Лейт і Ю. Упатнієкс реалізували голографічну установку для створення голограм тримірних предметів. Частина розширеного лазерного пучка потрапляє на дзеркало, що формує опорний пучок, а частина пучка освітлює предмет. Дифузно розсіяне предметом світло інтерферує зі світловим пучком, відбитим від дзеркала (рис. 2).

Для якісного запису голограми потрібно когерентне випромінювання і високороздільні фотоматеріали. Такі фотоматеріали мають малу чутливість, а найуживаніші лазери – малу потужність, тому час експонування є значним. Здебільшого якісні голограми записані з нерухомих предметів. Сьогодні з'явилися технічні можливості синтезування голограм за допомогою комп'ютерів та їхнього оптичного відтворення. Це відкриває перспективи створення голографічного кіно.

1949 року Д. Габор залишив компанію „Брітш Томсон-Г'юстон” і почав працювати в імперському науково-технічному коледжі при Лондонському університеті ад'юнктом-професором з електроніки, а з 1958 року – заслуженим професором кафедри прикладної фізичної електроніки. 1967 року вчений став науковим консультантом корпорації CBS (штат Коннектикут, США).

1971 року Денісу Габору присудили Нобелівську премію з фізики „за винахід і розробку голографічного методу”. Нобелівська лекція Д. Габо-

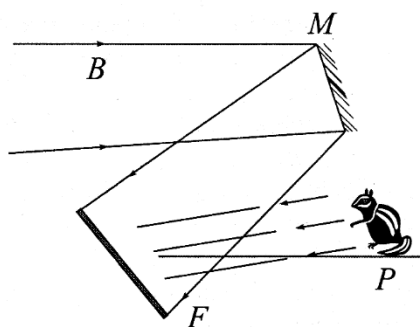
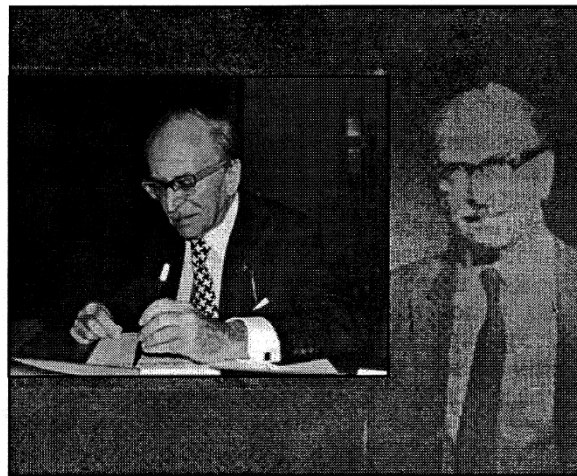


Рис. 2. Схема Лейта-Упатнієкса для голографування відбитих об'єктів:

B – лазерний пучок, M – дзеркало, P – об'єкт, F – фотографічна пластинка



Голографічний портрет Деніса Габоора (1971). Габор стоїть праворуч від свого голографічного двійника, який сидить за столом

ра, була присвячена проблемі, яка його давно хвилювала – ролі науки і техніки в суспільстві. У ній він наголосив, що „природа людини вивела нас із джунглів та печер на сучасний рівень промислової індустріалізації не для того, щоб протягом тривалого часу безтурботно перебувати на цій висоті ...”.

Вийшовши на пенсію, Деніс Габор багато подорожував, читав лекції, продовжував науковий пошук (працював над створенням проектора тримірних кінофільмів). 1974 року учений мав інсульт, що позбавив його здатності читати й писати. Однак він і далі підтримував контакти зі своїми колегами, слідкував за їхніми працями.

1977 року в Нью-Йорку відкрили музей голографії. Віддаючи шану Д. Габору за створення голографічного методу запису зображень, організатори музею запросили його стати першим відвідувачем.

Деніс Габор був членом Лондонського королівського товариства, почесним членом Угорської академії наук і кавалером Ордена Британської імперії, був нагороджений медаллю Томаса Юнга (1967), медаллю Ремфорда (1968), медаллю Альберта Майкельсона (1968), почесною медаллю Інституту інженерів електротехніки й електроніки (1970) та премією Хольвека Французького фізичного товариства (1971).

Деніс Габор помер 9 лютого 1979 року в одній із лондонських лікарень.

Галина ШОПА

„Кожен успіх нашого пізнання породжує більше проблем, ніж вирішує їх”

Луї де Бройль

КУДИ ЙДЕ ФІЗИКА?

Добігає завершення ХХ сторіччя, сторіччя стрімкого розвитку науки, прогресу техніки, світових воєн, виходу людини в космос. На зламі сторіч особливо загострюється увага як до минулого, так і до майбутнього. Хоча з погляду фізика нічого особливого не може статися, бо не дати з круглими цифрами є для фізики етапними, а дати епохальних відкриттів, таких, наприклад, які звершили Ньютон (1687), Максвелл (1860–1865), Планк (1900), Гайзенберга, Шредінґер, Дірак (1925–1928).

Нині актуальним є запитання: на якому етапі знаходиться фізика, куди спрямований розвиток цієї науки, що чекає її у ХХІ сторіччі?

Це запитання ми ставимо насамперед нашим Читачам, а в цій статті спробуємо окреслити основні риси фізики у минулому та торкнутись майбутнього.

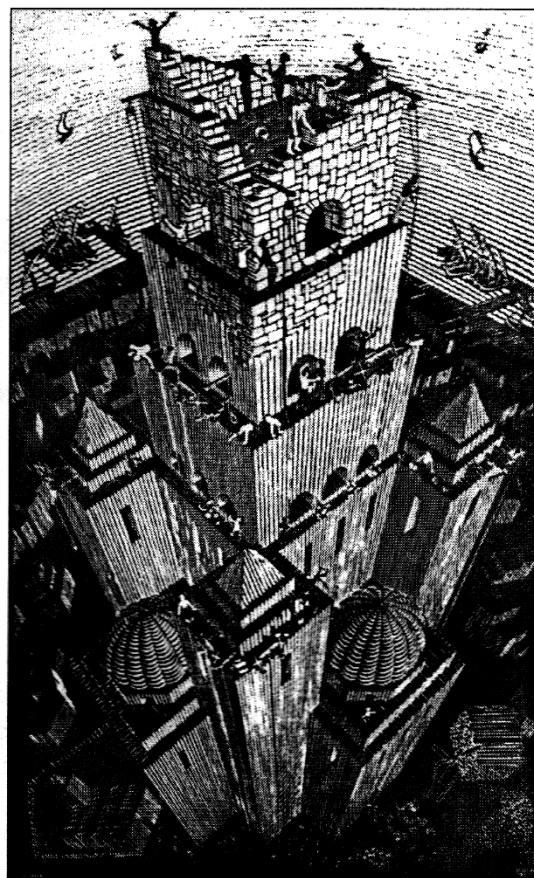
Історія нашої цивілізації, її прогрес тісно пов'язані з розвитком фізики. Високий злет механіки, термодинаміки, електрики створили передумови для промислової революції ХVІІІ–ХІХ ст. Ще більший вплив на розвиток цивілізації фізика мала у ХХ сторіччі. Фізика більше, ніж будь-яка наука спричинилася своїми відкриттями до зміни способу виробництва, побуту людей, їхнього світогляду. Більшість найважливіших досягнень фізики, здійснених у ХХ сторіччі має цивілізаційні наслідки.

Не дивно, що серед дванадцяти найбільших здобутків ХХ сторіччя, які визначила агенція Франс Прес, сім пов'язані з фізикою. Це – авіація, телебачення, поділ атомного ядра, створення комп'ютера, лазера, освоєння космосу, інтернет. П'ять інших великих відкриттів припадає на сферу біології та медицини.

Що характерне для розвитку фізики ХХ сторіччя?

Можна стверджувати, що у ХХ сторіччі тривав процес диференціації фізики, започаткований у попередніх сторіччях. Виникли нові галузі фізич-

ної науки: атомна, ядерна фізика, фізика плазми та напівпровідників тощо. Змінились методи експериментальної фізики. Для експериментальних досліджень вчені почали широко використовувати спеціально виготовлені вимірювальні прилади (про це вперше сказав ще Галілей), які мали високу точність, швидкодію, чутливість і могли працювати дистанційно. У ХХ сторіччі експериментальна фізика стала технічно досконалою і набула індустріальних рис. Фізики почали працювати колективно, сформувались наукові школи, інститути тощо.



Вавилонська вежа

У ХХ сторіччі фізика стала одним із важливих чинників науково-промислового поступу держав, невід'ємною частиною освіти, масовою професією. На формування напрямів досліджень помітний вплив мали держави, особливо в експериментальній галузі, де потрібно було концентрувати щораз більше матеріальних та фінансових ресурсів. Це не завжди під силу окремим країнам. Тому наприкінці ХХ сторіччя для проведення фундаментальних досліджень з'явилась тенденція кооперувати зусилля держав, почали створюватись міжнародні наукові центри і реалізовуватись міжнародні науково-дослідні програми. У майбутньому ці процеси розвиватимуться й надалі на основі нових інформаційних технологій.

Інший аспект фізичної науки – це її прикладний характер. Виникли цілі розділи прикладної фізики (наприклад, фізика твердого тіла, гідро- та аеродинаміка, електроніка та електрофізика), які стрімко розвиваються. Завдяки досягненням цих наук люди оволоділи повітряним та навколосемним простором, створили потужні засоби телекомунікації. Ці досягнення суттєво підвищили рівень технологій, матеріальний добробут, інформованість і вплинули на світогляд суспільства, якість життя людей.

Крім того, наприкінці ХХ сторіччя у зв'язку з припиненням протистояння двох соціальних систем, зменшилось фінансування на глобальні наукові дослідження у військово-технічній галузі. Це зменшило обсяги теоретичних та експериментальних досліджень у фізиці, які передують таким розробкам. Виникла потреба конвертувати інтелектуальний потенціал у галузі фізики, що зумовило низку проблем у середовищі фізиків світу. Одна з них – знайти нові пріоритетні напрями фізичних досліджень.

Розвиток фізики ХХ сторіччя показав, що розширюється застосування фізичних методів дослідження у суміжних природничих науках: біології, хімії, геології. Відкриваються нові перспективні ділянки для застосування зусиль фізиків у біології, медицині, енергетиці, сільському господарстві. Фізика ніби вливається в ці науки. Зростають масштаби наукових досліджень у галузі прикладної фізики, технології, живої матерії.

Для фізики немає явищ, які можна ділити на варті досліджувати чи ні. Будь-яке невивчене явище зберігає в собі закодовану таємницю природи і, тільки розкривши її, можна досягнути масштаби наслідків цих досліджень на матеріальне й духовне життя людства. Там, де широкий загал не бачить нічого, учений-фізик часто може здійснити велике відкриття.

Малим та індустріально слабозвинутим державам економічно не під силу проводити масштабні фізичні експерименти. У високорозвинутих країнах концентруватиметься науковий потенціал і основні здобутки фізики. Це може спричинити небезпеку нової форми гегемонії – наукової і технологічної. Саме тому в інших країнах слід хоча б зберегти належний освітній рівень фізики, щоб орієнтуватися у її нових відкриттях та вміти ефективно скористатися її досягненнями.

На перший погляд, здається, що у ХХ сторіччі вже відкрито усі найсуттєвіші фізичні закономірності, усі можливі типи елементарних частинок, залишається усе менше й менше проблем, над якими працюватимуть фізики у майбутньому. Але це не так. Щодо фундаментальної ділянки фізичної науки, то сьогодні ми не маємо задовільних квантової теорії гравітації, теорії сильних взаємодій, ... Тут можливі несподівані шляхи, які знайде наступне покоління фізиків. А хто може передбачити прикладні можливості квантової телепортації, застосувань квантових комп'ютерів, квантової криптографії?

Постає запитання: чи у ХХІ сторіччі не настане кінець фізики? Ні! Фізика є частиною людського життя і розвиватиметься й надалі. Важливо, щоби розвиток фізики був спрямований на гуманні цілі: пошук нових джерел енергії, створення нових технологій, розв'язання екологічних проблем тощо, а не на військові, які обслуговують амбіції політиків, поглинають величезні матеріальні та людські ресурси.

Якою б багатою не була уява людини, Природа багатша від неї. Фізика має велике майбутнє. Поза усяким сумнівом, наші Читачі – юні фізики – будуть серед творців фізики наступного тисячоліття.

ПРО ФІНАНСУВАННЯ НАУКИ У ЧЕСЬКІЙ РЕСПУБЛІЦІ

Іво Краус,

*професор Чеського технічного університету
у Празі, Чеська республіка*

Ми живемо наприкінці другого тисячоліття нової ери. Наукове пізнання принесло людям дивовижні відкриття, завдяки яким продовжилось життя людини, розроблені методи лікування багатьох важких хворіб, у багатьох країнах світу значно збільшилось виробництво сільськогосподарської продукції. Розвиток технологій і використання нових джерел енергії дало змогу людям звільнитися від важкої ручної праці.

Більшість досягнень науки розподілено нерівномірно як між країнами, так і між регіонами і соціальними групами людей. Оскільки наукові пізнання стають вирішальним чинником підвищення життєвого рівня, то цей розподіл несправедливий. Те, що відрізняє бідних людей (чи бідні держави) від багатих, полягає не тільки в матеріальній відмінності, але й у неоднакових можливостях брати участь у створенні науково-технічного потенціалу.

Декларація, яку прийняли в червні 1999 року учасники Всесвітнього конгресу з науки у Будапешті, закликає уряди всіх країн визнати провідну роль наукового дослідження не тільки в освоєнні нових знань, але й у вихованні нових учених і загальній освіті населення. Політикам рекомендують консультуватися з видатними ученими з усіх важливих запитань і разом з ними шукати оптимальні рішення. Історія довела, що політичне керівництво держав володіє інструментами, які дозволяють науці розв'язувати свої основні завдання, тобто:

- зменшити злидні більшості населення нашої планети,
- відповідати за сучасне і майбутнє покоління.

Часто стверджують, що розвиток науки залежить від особистості. Доля правди в цьому, звичайно, є. Без видатних особистостей, здатних синтезувати досвід попередніх поколінь і знайти у ньому нову якість, ніякі нові відкриття чи винаходи не здійснились би. Випадок приносить успіх тільки добре підготовленим. Талант – умова необхідна, але не завжди достатня. Ці фактори рухатимуть науку вперед, але не зможуть забезпечити її розквіт. Він

залежить насамперед від фінансів. Стрімкий розвиток фізики у ХХ сторіччі та її титул „королеви наук” був зумовлений не новою теорією руху частинок Ервіна Шредінгера, а стремлінням наддержав до володіння світом за допомогою атомної зброї.

У Всесвітній декларації прав людини, що є частиною конституційних гарантій Чеської республіки, визнають не тільки свободу думки, совісті і віросповідань, але й свободу наукового дослідження. Як ці благородні наміри здійснюються у Чеській республіці?

У нас державні засоби на наукові цілі виділяють здебільшого з 19 джерел. Крім міністерств, коштами розпоряджаються, наприклад, Академія наук або Грантова агентура Чеської республіки.

Фінансування проводиться так:

– *цільове*, коли кошти використовують на конкретні проекти не залежно від того, хто подав заявку: фізичні, юридичні особи чи міністерства;

– *інституційне*, коли кошти виділяють організаціям, що займаються науково-дослідницькою роботою: інститути Академії наук, вищі навчальні заклади і відомчі науково-дослідні інститути. Від усієї кількості інституційних коштів половину одержують академічні інститути, на вищі навчальні заклади та відомчі науково-дослідні інститути залишається по чверті від загального фінансування.

Як 1995 року ще переважало інституційне фінансування організацій, то з 1996 року співвідношення змінилося на користь цільового фінансування. Грантова агентура Чеської республіки, де я вже декілька років маю честь представляти Чеський технічний університет у Празі в комісії з технічних наук, розподіляє кошти по п'яти згрупованих галузях: технічні, природничі, медичні, сільськогосподарські і суспільні науки. Така послідовність, зазвичай, спостерігається і в кількості виділених фінансів.

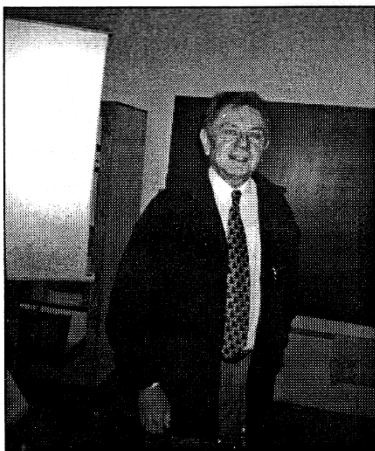
Згідно із загальними принципами, прийнятими чеським урядом, наукові дослідження і серійні розробки мають насамперед вносити вклад у на-

родну економіку й освіту; їх значення для загального пізнання відіграє вторинну роль. Нагадаю, що наукове дослідження – це експериментальна чи теоретична робота, спрямована на здобуття знань про суть явищ і спостереження новколишнього світу, а саме: або без уяви про їх конкретне використання (так звані фундаментальні дослідження), або ж спрямовані на досягнення практичної мети (експериментальні дослідження). Серійні розробки, навпаки, є систематичною роботою, які використовують знання, одержані як в процесі наукових досліджень, так і з практичним застосуванням. Її метою є виробництво нових матеріалів, виробів чи оснащення, введення нових технологічних процесів, або покращення того, що вже виробляється.

Щодо обсягу державної підтримки чеської науково-дослідної та інженерної діяльності, то це зазвичай проводиться у відсотках від валового національного продукту, тобто у числах, що свідчать про відношення країни до науки, про те, яку частину свого продукту вона присвячує цій надзвичайно важливій для свого майбутнього галузі. Незважаючи на всеможливі проголошення і передвибірні обіцянки швидкого зростання, з 1994 до 1997 року державна дотація залишилася на рівні 0,45 % валового національного продукту. 1999 року вона зросла на 0,55 %, 2000, 2001 і 2002 роках повинна досягти 0,6, 0,65 і 0,70 % відповідно. У країнах Європейського союзу середня величина державної підтримки уже сьогодні є майже 0,8 %.

Сьогодні стан чеської науки безумовно поліпшився. Учені, особливо молоді, яким вистачає менше, ніж середньої заробітної платні, мають достатню кількість вчислювальної техніки і так званих предметів короткочасного використання. Тим, хто займається експериментами, коштів для інновації застарілого устаткування не вистачає. Причому, якщо покласти руку на серце, дехто із заявників, що дістали відмову у підтриманні фінансування від грантової комісії, з полегшенням зітхнув. Навіть, якщо б він і мав змогу купити дорогу апаратуру, виникає проблема, як її використовувати. Не з причини відсутності розумної дослідницької проблематики (зрештою він її навів у грантовій заявці), але через відсутність кваліфікованої робочої сили. Немає чому дивуватися. Лабораторії порожніють і старіють; молоді випускники вищих навчальних закладів настільки відповідальні, що обов'язки щодо сім'ї ставлять вище, ніж свої наукові ідеали. Якщо вони махнуть рукою на науку, то їхня зарплата може бути і в декілька разів більшою, ніж зарплата професора, який їх учив. Диплом, що свідчить про спеціалізацію з точних і технічних наук, є достатньою гарантією успіху як у страховій, так і в менеджерській чи дилерській діяльності.

Отже, стверджувати, що розквіт науки залежить від фінансів, слід уточнювати. Потрібно мати достатні засоби для оплати праці спеціалістів, інакше доцільність використання навіть величезних фінансів, що виділяються для науки, є проблематичні.



Професор І. Краус читає лекцію студентам фізико-інженерного факультету Чеського технічного університету (29 березня 2000)

ІВО КРАУС,

професор Чеського технічного університету в Празі. Займається науковою та викладацькою роботою в галузі фізики, тісно співпрацює з ученими з багатьох країн світу. Проводить дослідження з історії науки, популяризує досягнення учених як Чеської республіки так і світові. До речі, цікавиться долею українських учених, які працювали у різних наукових установах Чехії з часів Австро-Угорської імперії. Зокрема є популяризатором імені та здобутків Івана Пулюя як у засобах масової інформації, так і наукових виданнях. Іво Краус є автором книги „Вільгельм Конрад Рентген” чеською мовою, де згадує про Івана Пулюя.

(Фото Г. Шопу)



Лауреатами Нобелівської премії з фізики 2000 року стали фізики Жорес Алфьоров (Росія) і Герберт Кремер (Herbert Kroemer) (США) за розвиток напівпровідникових гетероструктур, які використовуються у високошвидкісній оптоелектроніці (половина премії) та Джек Філбі (Jack St. Clair Kilby) (США) за дослідження в галузі інтегральних мікросхем.

НОБЕЛІВСЬКІ ЛАУРЕАТИ

1992



Жорж Шарпак

Нобелівський лауреат, що народився на українській землі...

Нобелівську премію з фізики 1992 року Шведська Королівська Академія наук присудила відомому фізику-експериментаторові Жоржу Шарпаку (Georges Charpak) „за винахід та вдосконалення детекторів частинок – багатодротинкової пропорційної камери”.

Жорж Шарпак народився 1 серпня 1924 року в м. Сарни Рівненської області (тоді ця територія входила до складу Польщі). Свої перші кроки майбутній Нобелівський лауреат зробив на українській землі. Тут пройшли перших вісім років його життя. 1932 року Жорж разом з батьками переїхав до Франції. У роки Другої світової війни він був учасником Французького руху Опору і рік перебував у концентраційному таборі Дахау.

У повоєнні роки Жорж спочатку навчався в гірничій школі в Парижі, а згодом – у Коллеж де Франс, де 1955 року отримав учений ступінь доктора філософії з фізики. З 1959 року до початку 1990-х років Ж. Шарпак працював в Європейському центрі ядерних досліджень (ЦЕРН, Женева), де очолював науково-дослідну групу, що займалась розробкою нових методик у ядерних дослідженнях.

Присвоєння Ж. Шарпаку Нобелівської премії є визнанням важливості методичних робіт для сучасної фізики. Нобелівський комітет і раніше виділяв методичні знахідки, що суттєво впливали на розвиток фізики та розширювали коло наукових досліджень. Нобелівські премії отримали

Ч. Вільсон (1927) за винахід камери Вільсона, С. Пауел (1950) за розробку методу ядерної фото-емulsії, Д. Глезер (1960) за створення бульбашкової камери.

Удосконалення детекторів елементарних частинок тісно пов'язане з прогресом ядерної фізики. Е. Резерфорд – основоположник цієї науки – для реєстрації частинок використовував люмінесцентний екран. Згодом, коли розпочались дослідження складніших ядерних реакцій, з'явилась потреба реєструвати траєкторію кожної частинки, і вчені почали використовувати камеру Вільсона. У камері Вільсона можливо побачити та сфотографувати траєкторію частинки завдяки тому, що йони, йонізованого частинкою повітря, є центрами конденсації перенасиченої пари. Подібне спостерігається в бульбашковій та іскровій камерах. Реєстрація траєкторій частинок у цих детекторах здійснювалась фотографічним методом.

Коли у практику фізичного експерименту ввійшли нові потужні прискорювачі, учені почали отримувати мільйони фотографій, які слід було опрацювати та проаналізувати. Це сповільнювало поступ наукових досліджень: надмір експериментальних результатів не давав змоги швидко і ефективно встановити основні фізичні залежності.

Якісний крок уперед у цих дослідженнях відбувся після того, як 1968 року Ж. Шарпак винайшов багатодротинкову пропорційну камеру (БПК), що дало змогу з'єднати детектор з комп'ютером і



збільшити швидкість збору корисної інформації у мільйони разів. Здатність БПК працювати швидше та точніше була важливою для вивчення складних ядерних реакцій, в яких лише одна з мільярда частинок є тією, за якою „полюють”.

Винаходи Шарпака якраз і дали змогу досліджувати такі рідкісні взаємодії, які несуть інформацію про глибинні властивості матерії.

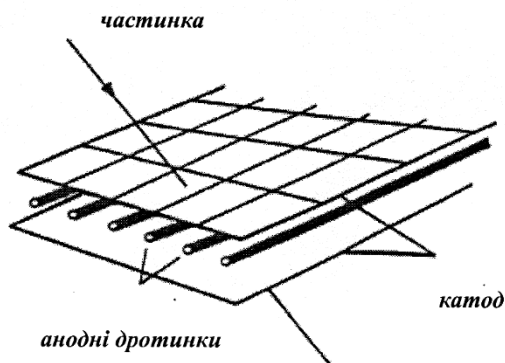


Рис. 1. Схема БПК

Що таке БПК і як вона працює?

Це паралельний ряд тонких дротинок (їх радіус 20 мкм), на які подається додатний потенціал. Зверху та знизу дротинок знаходяться катодні площини. Детектор, заповнений інертним газом, найчастіше аргоном з домішками CO_2 та CH_4 . Кожна анодна дротинка працює як незалежний пропорційний детектор – це є „родзинкою” винаходу Ж. Шарпака. Поблизу дротинки (в області великого градієнта електричного поля) електрони дістають енергію, достатню для йонізації атомів газу. Утворені при цій йонізації вторинні електрони, також йонізують інші атоми. Відбувається швидке зростання кількості йонів: замість n_0 йонів, створених йонізуючим випромінюванням утворюється kn_0 йонів, де k – коефіцієнт „газового помноження”. Пропорційна камера складається ніби з двох частин – тонкого шару поблизу дротинки, де відбувається ударна йонізація, та решти об’єму, що працює як йонізаційна камера. Дрейф до дротинки, утворених поблизу неї електронів, а позитивних йонів до катоду індукує у дротинці електричний сигнал, пропорційний кількості первинних йонів. Сигнали, що наводяться на інших дротинках, малі й мають іншу полярність. Це дає змогу визначити координату йонізуючої частинки

за розміщенням в анодному ряді дротинки, на якій індукується потрібний сигнал. Якщо, наприклад, віддаль між дротинками дорівнює 2 мм, то такою ж буде і невизначеність координати треку частинки. Часове розділення пропорційної камери дорівнює 30 нс, а ефективність реєстрації багатьох частинок – 100%. Час, за який прилад готовий до реєстрації наступної частинки після спрацювання, дорівнює 10^{-6} с. БПК може працювати у сильних магнетних полях і тому широко застосовується в магнетних спектрометрах, а також в інтенсивних пучках частинок, що дає змогу ефективно використовувати дорогоцінний час прискорювачів. БПК реєструє всі частинки, що проходять крізь неї, на відміну від інших трекових детекторів, що працюють в імпульсному режимі і реєструють тільки вибрані частинки. Опрацювання великого потоку інформації перекладено на комп’ютер, велика швидкодія і пам’ять якого дає змогу опрацювати і зберігати всю інформацію.

Однак на початках своєї кар’єри БПК були дорогим та ненадійним детектором з великою кількістю проблем, таких як високі вимоги до виготовлення дротинок, їх старіння, велика кількість електронних каналів, що на початку не мали потрібної надійності. Знадобилась значна енергія та експериментаторська майстерність Ж. Шарпака, щоб довести до високої технічної досконалості цей детектор. Він створив надійну технологію виготовлення БПК, підібрав потрібні конструкційні матеріали, вдосконалив електронні блоки, розробив комп’ютерні програми обробки сигналів. Він також запропонував газові суміші, включаючи чотирикомпонентні, що дали змогу отримувати однорідні сигнали, незалежно від втрат енергії йонізуючої частинки в газі і цим знизити вартість електронних пристроїв. Розміри БПК зростали разом із збільшенням потужності прискорювачів. На 1992 рік на гігантському прискорювачі (колайдері) LEP* уже працювали БПК площею 5×5 м², що містили 10^5 дротинок.

*Колайдер LEP – це гігантський прискорювач електронів і позитронів на зустрічних пучках, який почав працювати з липня 1989 року. Він розміщений на північний захід від Женеви в тунелі під землею на глибині 100 м, обабіч французько-швейцарського кордону. Довжина кільця прискорювача 27 км, діаметр – 3,8 м.



Згодом з'явилися інші багатодротинкові детектори, автором яких також був Ж. Шарпак: дрейфова камера, часопроекційна камера, багаторядний лавинний детектор, газовий детектор з твердим фотокатодом тощо.

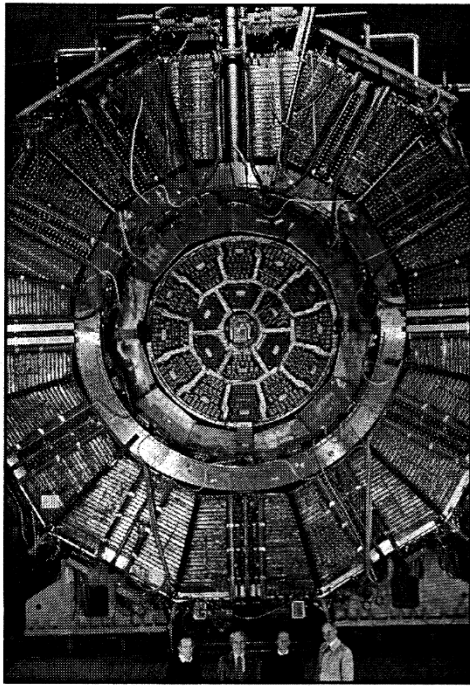


Рис. 2. Вигляд детектора БПК, яким обладнано колайдер LEP

Останні модифікації багатодротинкових камер мають як поліпшені характеристики, так і досконалішу технологію виготовлення. На сучасному етапі розвитку цієї галузі фізики використання локалізації електронів поблизу дротинки БПК і вимірювання часу дрейфу електронів дає таке якісне зображення складної картини взаємодії частинок, що успішно конкурує з тим, яке отримують в бульбашкових камерах. Це твердження ілюструє рис. 3, де зображена подія зіткнення електрона й позитрона, зафіксована детектором, яким обладнано гігантський прискорювач, що побудований у ЦЕРНі.

Багаторядний лавинний детектор дає змогу зберігати йонізаційний слід частинки протягом часу, потрібного для прийняття рішення для її реє-

страції. У газовому детекторі з твердим фотокатодом значно підвищена ефективність реєстрації ультрафіолетового та рентгенівського випромінювання, що дає змогу застосовувати цей пристрій у рентгенівських апаратах, замінюючи ним звичну рентгенівську плівку. У цьому застосуванні знову виявились переваги БПК: візуалізація та обробка інформації за допомогою комп'ютера, висока чутливість, що дала змогу зменшити дозу опромінення. Використання комп'ютера дало змогу опрацьовувати за спеціальними алгоритмами та зберігати в його пам'яті велику кількість інформації. Це зумовило якісно новий етап рентгенології.

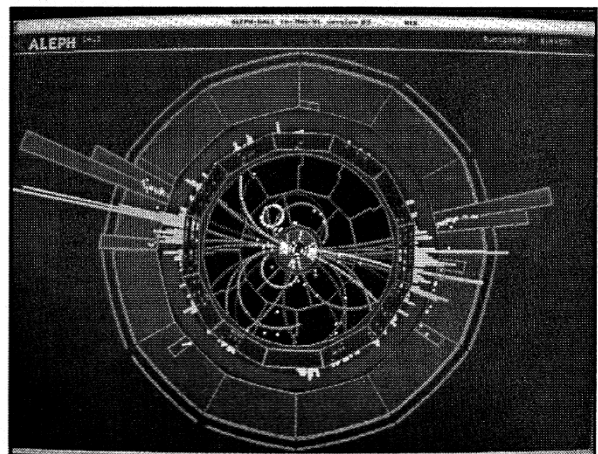


Рис. 3. Комп'ютерне зображення картини зіткнення електрона і позитрона, отримане в експерименті на колайдері LEP

Ці приклади демонструють те, що ми знаходимося на порозі широкого використання радіаційних детекторів в інших галузях науки і техніки.

Після повідомлення про присудження Жоржу Шарпаку Нобелівської премії він сказав, що в майбутньому його зусилля будуть спрямовані на застосування БПК у біології та медицині, а премія дасть необхідні для цього засоби. Він висловив сподівання, що його зусилля та зусилля колег приведуть до революції у цих галузях науки.

Олександр ГАЛЬЧИНСЬКИЙ,
канд. фіз.-мат. наук

Задачі ІХ Всеукраїнського відкритого турніру юних фізиків, 2001 р.

*Наука изоциряет ум,
ученье вострит память*
(Козьма Прутков, афоризм № 7)

1. „Придумай сам”

Виміряйте довжину хвилі лінії випромінювання якогось стандартного джерела за допомогою дифракційного спектроскопа (сконструйте самі), основним елементом якого є компакт-диск. Яка точність Вашого приладу і якої роздільної здатності можна при цьому досягти?

2. „Суперблискавка”

„...Сила струму в йонізованому каналі між Юпітером та Іо досягає мільйонів амперів ... Так утворюються найбільші блискавки в Сонячній системі” (А.Кларк. Одиссея-2). Оцініть, за якої різниці потенціалів між Іо та Юпітером відбувається пробій.

3. „Замок із піску”

Якої висоти можна побудувати замок з мокрого піску? (Замок – будівля з вертикальними стінами).

4. „Електричний колобок”

Відомий принцип роботи традиційного електродвигуна. А чи можна створити електродвигун, що працює завдяки статичній електриці? Якщо так, запропонуйте його конструкцію й оцініть основні параметри.

5. „Гумовий холодильник”

Дослідіть особливості енергетичних перетворень під час деформації гуми. Сконструйте холодильну машину, що використовує гуму як робоче тіло, і продемонструйте її роботу.

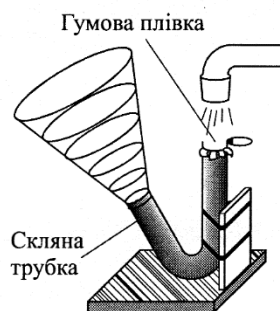
6. „Мотузкова крапельниця”

Якщо швацьку нитку частково занурити в посудину з водою, а залишок опустити так, щоб він не доторкався до зовнішніх стінок посудини, то за певних умов на кінці нитки можна спосте-

рігати краплинки води. У чому полягають ці „певні умови”? Чим обмежується час появи першої краплинки? Як впливає кут нахилу нитки на це явище?

7. „Музична крапельниця”

Зробіть (зображений на рисунку) музичний резонатор. Дослідіть, за яких умов із рупора можна чути музикальний тон. Чи вдалося Вам спостерігати ефект підсилення сторонніх звуків? Як і чому це відбувається?



8. „Знову полум'я свічки”

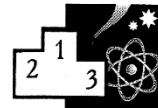
Якщо електроди, які перебувають під досить високою напругою, вмістити в полум'я свічки, то побачимо, як на одному з них починає наростати „шуба”. Чим вона є, чому утворюється і від чого залежить її вигляд?

9. „Планер”

Якщо паперову смужку скинути з деякої висоти, то через якийсь час вона починає обертатися навколо власної довгої осі й, ширяючи, знижується. Від чого залежить аеродинамічна якість подібного „планера”?

10. „Сонячний зайчик”

Як залежить форма сонячного зайчика від геометричних характеристик дзеркала і взаємного розміщення дзеркала й екрана?



11. „Енергія з нічого”

У Вашому розпорядженні є: швацька нитка, магнет і котушка мідного дроту. За допомогою запропонованого обладнання зарядіть до найбільшої напруги конденсатор ємністю 1 мкФ за час Вашої доповіді. Торкатись обладнання під час доповіді заборонено!

12. „Сірникоупорядкування”

Який відсоток сірників, висипаних з повної коробки на шорсткий стіл, розташується на столі вертикально?

13. „Крутий схил”

Вам потрібно залишити автомобіль на крутому схилі. Як мінімальні розміри повинна мати цеглина, щоб її можна було б підкласти під колеса автомобіля?

14. „Паперовий кораблик”

Оцініть „час життя” кораблика, виготовленого з газетного паперу і спущеного на воду в спокійне плавання.

15. „Шум водоспаду”

З віддаленням від водоспаду його шум стає не лише тихішим, а й глухішим. Чим визначається зміна тембру шуму?

16. „Китайський скороход”

Кажуть, що в Стародавньому Китаї скороходи для збільшення швидкості бігу зв'язували ноги біля щиколоток пружним шнуром. Дослідіть ефективність такого засобу прискорення бігу.

17. „Концерт на просіці”

*Я не то, чтобы от скуки,
Я надеялся понять,
Как умеют эти руки
Эти звуки извлекать.*

Б.Окуджава „Музикант”

Деякі умільці демонструють мистецтво гри смичком на ... пилці. Як їм вдається створювати звуки різного тону? Опишіть явище кількісно.

Задачі запропонували:

І. Альтман, П. Віктор, В. Колебошин, Д. Копейченко, І. Костін (м. Євпаторія), Н. Кулик (м. Луганськ), В. Кулінський, В. Манакін, І. Ненашев (м. Харків), С. Пузирков (м. Харків), П. Пшеничка (м. Чернівці), Р. Степанян (м. Гронінген, Нідерланди), О. Шевчук (м. Ніжин).

Міністерство освіти і науки України, Рішельєвський ліцей при Одеському університеті, Український фізико-математичний ліцей у березні 2001 року проводили у м. Києві ІХ Відкритий Всеукраїнський турнір юних фізиків. Турнір проводиться відповідно до чинного положення про Всеукраїнські учнівські олімпіади з базових і спеціальних дисциплін, турніри, конкурси, захисти науково-дослідницьких робіт і конкурси фахової майстерності (наказ Міністерства освіти України № 305 від 18 серпня 1998 року).

Турнір проводиться для команд середніх закладів освіти двома етапами, перший з яких на міському або обласному рівні. Другий (підсумковий) етап проводитиме Міністерство освіти і науки України та Науково-методичний центр середньої освіти. Склад учасників фінального етапу турніру визначається його оргкомітетом за поданням журі.

Кожна команда надсилає на розгляд журі стислі розв'язання не менше, як чотирьох завдань. Розв'язання надсилає разом із заявкою до 30 грудня 2000 року (за поштовим штемпелем). Команди, які на першому етапі будуть нагороджені дипломами першого ступеня, звільняються від подання вказаних вище розв'язань (до заявки слід додати копію відповідного диплома).

За інформацією звертайтеся за адресою:

В. Колебошину,
фізичний факультет ОНУ,
вул. Дворянська, 2
м. Одеса, 65026

(044) 417-85-69,
(0482) 23-80-06, 25-08-74,
E-mail: phys@lyceum.odessa.ua
http://www.rl.odessa.ua



НЕ ПОСЛИЗНИТЬСЯ

На восьмому Всеукраїнському турнірі юних фізиків була запропонована задача:

„Як зміняться умови ковзання по мармуровій підлозі, якщо на неї насипати тоненький шар піску”.

Очевидно, що нам потрібно порівняти силу дотичної взаємодії людини з підлогою (подібно до сили тертя спокою) у першому і в другому випадках. Цю взаємодію природно характеризувати коефіцієнтом, що пов'язує її з вагою людини (в одному з випадків це буде коефіцієнт тертя ковзання). Будемо вважати, що людина спочатку розігналася, а згодом уже потрапила на мармур чи на мармур з піском. Коефіцієнт тертя підошви (гуми) по мармуру (тобто коефіцієнт тертя взуття людини по мармуру) візьмімо з таблиці: $\mu = 0,8$.

Проблема задачі в тому, щоб знайти коефіцієнт, що характеризує взаємодію людини з підлогою тоді, коли між підошвою і мармуром буде тоненький шар піску. Виникає питання, що потрібно розуміти під „тоненьким” шаром піску, відносно чого цей шар повинен бути тоненьким.

У зв'язку з неконкретністю умови розглянемо два випадки.

1. Шар з однієї піщинки

Цей випадок характерний тим, що піщинки будуть рухатися разом з людиною. Причому кожна піщинка майже не перешкоджатиме рухові іншої.

Опишімо модель піску. Нехай піщинки будуть правильними многогранниками і нехай у проекції на вертикальну площину вони даватимуть правильні многокутники зі стороною a .

У процесі руху висота кожної піщинки постійно змінюватиметься. Це означає, що центр мас людини буде постійно коливатися по вертикалі. Здавалось би, це буде мізерне зміщення. Проте слід зауважити, що кількість таких зміщень за час, поки піщинки пройдуть одиницю шляху, буде досить великою (бо розміри піщинок дуже маленькі). Тому цим ефектом нехтувати не можна.

Покажімо, як цей ефект вплине на силу взаємодії.

Під час руху центр мас людини піднімається. Цей підйом проходить завдяки зменшенню кінетичної енергії руху людини. Після цього відбу-

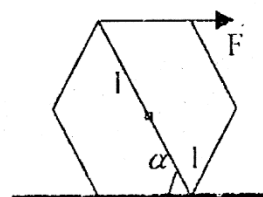
вається удар грані піщинки об мармур, у результаті чого енергія, яку затратили на підйом, переходить у тепло. Згодом усе починається по-новому.

З'ясуємо, чи в процесі руху піщинки відбуватиметься тільки проковзування, чи і проковзування. Розглянемо допоміжну задачу:

„Яку горизонтальну силу потрібно прикласти, щоб підняти піщинку на дуже малу висоту”.

Це буде сила тертя між підошвою і піщинкою, яка заставлятиме її прокручуватися. Якщо ця сила буде меншою за силу тертя ковзання піщинки об мармур, то в процесі руху піщинки будуть тільки проковзуватися; якщо ж ця сила виявиться більшою за силу тертя, то матимемо справу як із проковзуванням, так із проковзуванням.

Нехай піщинка повертається на маленький кут $\Delta\alpha$.



Тоді $A = \Delta\Pi = mg\Delta h$,

$$A = F \cdot 2l \cdot \Delta\alpha = mgl \cdot \sin(\alpha + \Delta\alpha) - mgl \cdot \sin\alpha,$$

$$2F \cdot \Delta\alpha = mg \sin(\Delta\alpha/2) \cdot \cos(\alpha + \Delta\alpha/2).$$

Оскільки кут $\Delta\alpha$ – малий, то

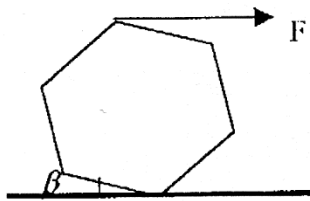
$$\sin(\Delta\alpha/2) \approx \Delta\alpha/2.$$

$$\cos(\alpha + \Delta\alpha/2) \approx \cos\alpha.$$

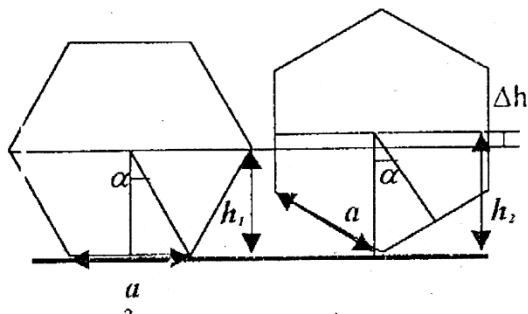
Маємо $F = \frac{1}{2} mg \cdot \cos\alpha$. Припустімо, що піщинка в перерізі на вертикальну площину є правильним шестикутником, тобто $\alpha = 60^\circ$, а

$$F = \frac{1}{2} mg \cos\alpha < \mu mg$$

Але, коли піщинка уже повернута на деякий кут β , то сила F уже буде дещо менша за попередню. Це дає змогу стверджувати, що проковзування якщо і буде, то важливої ролі не відіграватиме. Тому знехтуймо цим ефектом.



Тепер розрахуймо коефіцієнт тертя. Коли піщинка проходить відстань a , (відстань, яку проходить піщинка між двома послідовними ударами об мармур) то людина проходить відстань $2a$.



$$\Delta \left(\frac{mv^2}{2} \right) = F_m \cdot a = \mu mg \cdot 2a = \mu_{\text{коч}} mg \cdot 2a + mg \Delta h$$

$$h_2 = a / (2 \sin \alpha); \quad h_1 = (a/2) \cdot \text{ctg} \alpha$$

$$\Delta h = h_2 - h_1 = a/2 (1/\sin \alpha - \text{ctg} \alpha)$$

($\alpha = 30^\circ$ для шестикутника).

$$\mu mg \cdot 2a = \mu_{\text{коч}} mg \cdot 2a + mga(2 - \sqrt{3})/2.$$

$$\text{Звідси } \mu = \mu_{\text{коч}} + (2 - \sqrt{3})/4.$$

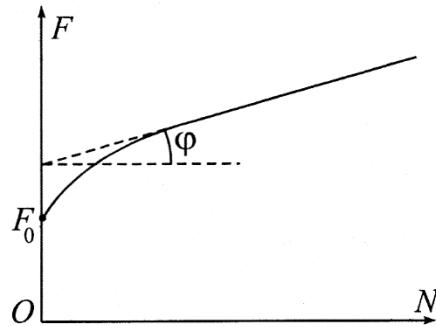
Врахувавши що, $\mu = k/a$, де k – коефіцієнт тертя кочення, знайдемо величину $\mu \approx 0,17$.

Отже, коефіцієнт, який характеризує взаємодію людини з підлогою, вкритою шаром піску із однієї піщинки, є значно менший від максимального значення коефіцієнта тертя спокою підошви по мармуру.

2. Випадок товстішого шару піску

Цей випадок складніший. Проблема в тому, що піщинки взаємодіють між собою, а сама взаємодія між окремими піщинками буде відрізнятися випадково. Оскільки ця взаємодія має не закономірний, а статистичний характер, аналітично описати її з уваги на вказані причини складно.

Тому потрібні параметри такої взаємодії ми отримали експериментально. У праці досліджено тангенціальну складову сили взаємодії підошви з шаром піску залежно від сили нормального тиску. Отримана експериментальна залежність зображена на рисунку.



Як видно, тангенціальна складову сили взаємодії нелінійно залежить від сили нормального тиску.

Лише при $N \rightarrow \infty$ залежність тангенціальної складової сили взаємодії підошви з шаром піску стає пропорційною. Крім того, цей графік не проходить через точку $(0; 0)$. У точці $N = 0$, $F_m = F_0$, тобто не залежно від зовнішньої сили, є початкове зчеплення. За таких умов не має сенсу коефіцієнт тертя, бо відношення F_m/N залежить від N . Лише при достатньо великих силах тиску можемо вважати, що сили дотичної взаємодії пропорційні до сили нормального тиску. Коефіцієнт пропорційності дорівнює $\text{tg} \varphi$. Така залежність очевидно пов'язана з неупорядкованим рухом піщинок. Встановлена закономірність залежить від вологості піску. При зволоженні піску піщинки все більше зв'язуються між собою, перестають рухатися одна відносно другій і шар піску стає подібним до суцільного середовища, яке, однак, характеризується малим модулем міцності. При $N = 700$ Н (сила тиску людини) $\mu = \text{tg} \varphi \approx 0,35$.

Цей коефіцієнт є менший від коефіцієнта тертя спокою підошви по мармуру, тому зрозуміло, що людина, яка потрапить на ділянку мармурової підлоги, що посипана піском, відчуватиме себе не так впевнено, як на мармуровій підлозі. Вона матиме відчуття, що підлога стала слизькішою.

Арсен СОРОКА,

учень 11-го класу Львівського фізико-математичного ліцею

Розв'язки задач IV етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики Чернівці, 2000 р.

(Умови задач та розв'язки за 8 і 9 кл. 2000 року дивіться в журналі „Світ фізики”. 2000. № 2(10))

10-й клас

Задача 1.

Поле в точці A , положення якої задано радіус вектором \vec{r} , знайдімо як векторну суму полів від зарядів диполя (див. рис. 1)

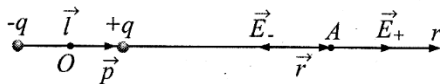


Рис. 1.

$$\vec{E}(r) = \vec{E}_+ + \vec{E}_-$$

Тоді у проекції на вісь r маємо:

$$E = \frac{kq}{(r-l/2)^2} - \frac{kq}{(r+l/2)^2} = \frac{kq \cdot 2rl}{(r-l/2)^2 (r+l/2)^2}$$

де $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$. Якщо $r \gg l$, то $E = \frac{2kql}{r^3} = \frac{p}{2\pi\epsilon_0 r^3}$.

У векторній формі $\vec{E}(r) = \frac{\vec{p}}{2\pi\epsilon_0 r^3}$.

Монета металічна, отже, електричне поле всередині монети відсутнє, тобто на поверхні монети індуються заряди $+Q$ і $-Q$, які створюють всередині монети електричне поле E , що дорівнює і протилежне полю диполя $E(r)$.

Оскільки $a \ll d \ll r$, то вважатимемо поле диполя в межах монети однорідним, а індуквані заряди розподілені рівномірно з густиною σ_+ і σ_- . Поле індукованих зарядів визначимо з формули поля плоского конденсатора:

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0}$$

Отже, $Q = \sigma \cdot S = \epsilon_0 E \frac{\pi d^2}{4} = \epsilon_0 E(r) \frac{\pi d^2}{4}$.

Тоді шукана сила (див. рис. 2):

$$\vec{F}(r) = \vec{F}_+ + \vec{F}_- = Q\vec{E}(r+a/2) - Q\vec{E}(r-a/2) = -\frac{3ad^2 p}{16\pi\epsilon_0 r^7} \vec{p}$$

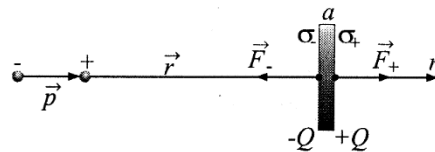


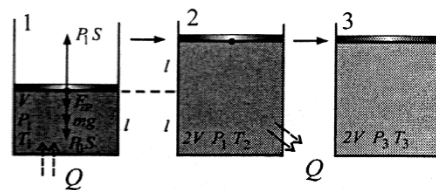
Рис. 2.

Монета притягуватиметься до диполя.

Задача 2.

Умова задачі некоректна. Вважаймо, що поршень починає рухатись у мить початку нагріву, тобто у початковому стані $P_1 S = F_{mp} + mg + P_0 S$.

Газ вважаймо одноатомним ($i = 3$ – кількість ступенів свободи руху молекул газу).



Процес нагрівання відбувається повільно, це означає, що поршень рухається рівномірно, тобто газ розширюється при сталому тиску P_1 . Для станів 1 і 2 запишімо рівняння стану:

$$\left. \begin{aligned} P_1 V &= \nu RT_1 \\ P_1 2V &= \nu RT_2 \end{aligned} \right\} \Rightarrow T_2 = 2T_1 \quad (1)$$

Для цих станів перший закон термодинаміки матиме вигляд:

$$Q = A' + \Delta U = P_1 S l + \frac{i}{2} \nu R (T_2 - T_1) =$$

$$= \nu R (T_2 - T_1) + \frac{i}{2} \nu R (T_2 - T_1) = \frac{i+2}{2} \nu R T_1. \quad (2)$$

Процес охолодження 2-3 відбувається ізохорно, тобто $Q = c_{V\mu} \nu (T_3 - T_2) < 0$ – газ віддаватиме тепло. Тоді

$$\frac{i+2}{2} \nu R T_1 = \frac{i}{2} \nu R (2T_1 - T_3) \Rightarrow \frac{T_3}{T_1} = \frac{i-2}{i}. \quad (3)$$

(враховано: $c_{V\mu} = \frac{i}{2} R$ – молярна теплоємність при сталому об'ємі). Для початкового й кінцевого станів запишімо рівняння Клапейрона:

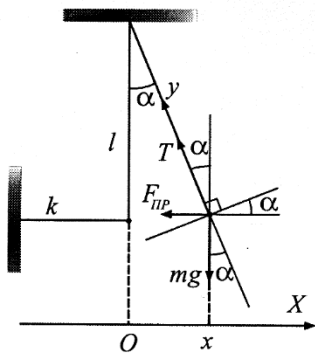
$$\frac{P_1 V}{T_1} = \frac{P_3 2V}{T_3} \Rightarrow \frac{P_3}{P_1} = \frac{T_3}{2T_1} = \frac{i-2}{2i} = \frac{1}{6}.$$

Тиск газу зменшиться у 6 разів.

Задача 3.

Період коливань коливальної системи $T = t_1 + t_2$,

де $t_1 = \frac{T_1}{2} = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ – час руху математичного маятника ліворуч від положення рівноваги, t_2 – час руху тягарця праворуч від положення рівноваги.



Розглянемо рух тягарця праворуч від положення рівноваги. Відведемо тягареця на x від положення рівноваги. За другим законом Ньютона у проекції на вісь OX маємо:

$$m a_x = F_{пр} + T_x = -kx - mg \alpha = -\left(k + \frac{mg}{l}\right)x. \quad (1)$$

(Враховано: $T = mg \cos \alpha$ (вісь y));

$$T_x = -mg \cos \alpha \cdot \sin \alpha = -mg \alpha = -mg \frac{x}{l};$$

$\cos \alpha = 1$, $\sin \alpha = \alpha = x/l$ для малих кутів) Диференціальне рівняння (1) описує гармонічні коливання з періодом:

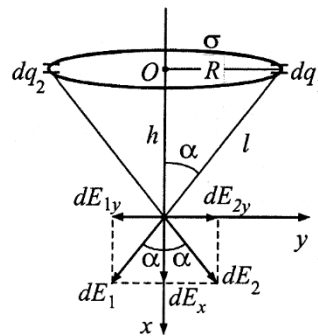
$$T_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{k}{m} + \frac{g}{l}}},$$

тоді:

$$T = \pi \sqrt{\frac{l}{g} \left(1 + \sqrt{\frac{mg}{kl + mg}}\right)}.$$

Задача 4.

Визначимо напруженість електричного поля на осі кільця на відстані h від площини кільця. Розбиймо



кільце на нескінченну кількість елементарних зарядів $dq = \sigma \cdot dl$. Тоді поле в потрібній точці дорівнюватиме векторній сумі полів від елементарних зарядів $dE = kdq/l^2$. Як видно з рисунка, для будь-якого заряду dq_1 , завжди знайдеться заряд dq_2 такий, що складові напруженості їхніх полів по горизонталі компенсуються. Це означає, що векторна сума напруженостей від елементарних зарядів напрямлена уздовж вісі OX , тоді:

$$E = \int dE_x = \int \frac{kdq}{l^2} \cos \alpha = \int \frac{kdq}{(R^2 + h^2)} \cdot \frac{h}{\sqrt{R^2 + h^2}} =$$

$$= \frac{kh}{(R^2 + h^2)^{3/2}} \int \sigma dl = \frac{kh\sigma}{(R^2 + h^2)^{3/2}} \cdot 2\pi R =$$

$$= \frac{h\sigma R}{2\epsilon_0 (R^2 + h^2)^{3/2}}$$

Прискорення тіла в цій точці визначатиметься за другим законом Ньютона:

$$OX: \quad ma = mg + qE .$$

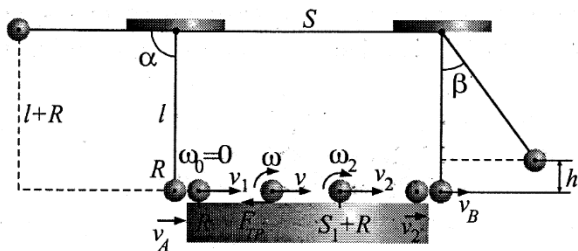
Звідси випливає:

$$a = g + \frac{\sigma Rhq}{2\varepsilon_0 m(R^2 + h^2)^{3/2}} = 11,2 \text{ м/с}^2 .$$

Умова задачі сформульована однозначно, тому розглядати випадок, що заряди кільця й тіла різномірні, не доцільно.

Задача 5.

Вважаймо, що кулі мають однакову масу, а удари – абсолютно пружні, прямі й центральні.



Із закону збереження енергії визначимо швидкість v_A кулі A перед ударом:

$$mgl = \frac{mv_A^2}{2} .$$

Звідси випливає:

$$v_A^2 = 2gl . \quad (1)$$

Швидкість кулі 1 після удару:

$$v_1 = v_A , \quad (2)$$

оскільки маси куль A і 1 однакові.

Це легко отримати на основі законів збереження енергії та імпульсу. Законом збереження імпульсу для горизонтальної осі користуватимемося за наявності сили тертя, тому що ударні сили набагато більші від сили тертя.

Після удару куля 1 почне ковзати по поверхні стола, швидкість центра мас буде зменшуватись за законом:

$$v = v_1 - at = v_1 - \mu gt \quad (3)$$

(врахуймо, що $ma = -\mu mg$), а кутова швидкість збільшуватиметься:

$$\varpi = \beta t ,$$

де β – кутове прискорення, яке визначимо із закону динаміки для обертального руху:

$$M = \beta I .$$

Звідси:

$$\mu mgR = bmR^2\beta , \quad \beta = \frac{\mu g}{bR} ,$$

тоді:

$$\omega = \frac{\mu gt}{bR} , \quad (4)$$

де $b = 0,4$.

Проковзування кулі припиниться за умови:

$$v_2 = \omega_2 R . \quad (5)$$

Розв'язавши систему рівнянь (3), (4), (5) за умов $v = v_2$, $\omega = \omega_2$, отримаємо:

$$t = \frac{bv_1}{\mu g(b+1)} , \quad (6)$$

$$v_2 = \frac{v_1}{b+1} . \quad (7)$$

Визначимо, яку відстань S пройде куля 1, проковзуючи:

$$S_1 = v_1 t - \frac{at^2}{2} = \frac{v_1^2 b(b+2)}{2\mu g(b+1)^2} = 1,08 \text{ м} .$$

Куля 1 припинить проковзування на відстані $S_1 + R = 1,13$ м від лівого краю стола. Далі куля рухатиметься рівномірно. При ударі куль 1 і B відбуватиметься обмін швидкостями $v_b = v_2$. Кут відхилення кулі B визначимо, скориставшись законом збереження енергії:

$$\frac{mv_b^2}{2} = mgh ,$$

$$\frac{mv_1^2}{2(b+1)^2} = mgl(1 - \cos \beta) ,$$

$$\frac{2gl}{2(b+1)^2} = gl(1 + \cos \beta) ,$$

$$\cos \beta = \frac{b(b+2)}{(b+1)^2} = \frac{24}{49} ,$$

$$\beta = \arccos \frac{24}{49} \approx \frac{\pi}{3} .$$

11-й клас

Задача 1.

а. Дивись задачу 5 (10-й клас).

б. Для того, щоб кут β_1 відхилення кулі В був мінімальним, потрібно, щоб куля 2 мала мінімальну швидкість. Швидкість кулі 2 мінімальна, якщо швидкість кулі 1 перед ударом буде мінімальною і дорівнюватиме:

$$v_2 = \frac{v_1}{b+1}$$

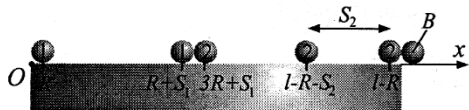
(див. задачу 5, 10-й клас, формули (1) і (7)). Після удару куля 2 проковзує. Дією сили тертя (μmg) при ударі можна знехтувати, адже удар абсолютно пружний, час удару мізерно малий $t \sim 10^{-4}$ с, і ударні сили набагато більші від зовнішніх неударних сил.

$$v_3 = v_2 - \mu g t_1, \quad \omega_3 = \beta t_1, \quad \tau_2 = \omega_3 R.$$

Звідси випливає:

$$t_1 = \frac{bv_2}{\mu g(b+1)}, \tag{8}$$

$$v_3 = \frac{v_2}{b+1} = \frac{v_1}{(b+1)^2}. \tag{9}$$



Визначимо шлях, який пройде куля 2, ковзаючи:

$$\begin{aligned} S_2 &= v_2 t_1 - \frac{at_1^2}{2} = \frac{bv_2^2}{\mu g(b+1)} - \frac{b^2 v_2^2}{2\mu g(b+1)^2} = \\ &= \frac{bv_2^2(b+2)}{2\mu g(b+1)^2} = \frac{bv_1^2(b+2)}{2\mu g(b+1)^4} = \\ &= \frac{bl(b+2)}{\mu(b+1)^4} = 0,55 \text{ м} \end{aligned}$$

Щоб куля 2 мала мінімальну швидкість до удару, вона має знаходитись на відстані, більшій від

$$x_1 = 3R + S_1 = 1,23 \text{ м}$$

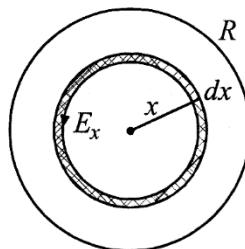
і меншій від

$$x_2 = l - R - S_2 = 1,4 \text{ м},$$

тобто $1,23 < x < 1,4 \text{ м}.$

Отже, $\beta_1 \approx 42^\circ.$

Задача 2.



Зі зміною магнетного поля у просторі за законом електромагнетної індукції виникає вихрове електричне поле, величина якого згідно із законом Фарадея буде:

$$|e.p.c.| = E_x l_x = \frac{d\Phi_x}{dt} = \frac{d(\pi x^2 B)}{dt}.$$

Звідси,

$$E_x = \frac{\pi x^2 dB}{l_x dt} = \frac{\pi x^2 dB}{2\pi x dt} = \frac{x dB}{2 dt}$$

– напруженість вихрового електричного поля на відстані x від осі диску. Це поле діє на заряд і створюватиме момент сил на диск. У диску виділімо кільце радіуса x і товщиною dx . Кільце матиме заряд:

$$dq_x = \frac{Q \cdot 2\pi x dx}{\pi R^2} = \frac{Q 2x dx}{R^2}.$$

Елементарний момент сил, що діятиме на кільце буде:

$$dM_x = dq_x E_x x. \tag{1}$$

Визначимо момент сил, що діє на диск:

$$\begin{aligned} M &= \int_0^R dM_x = \int_0^R dq_x E_x x = \int_0^R \frac{Q \cdot 2x dx}{R^2} \cdot \frac{x dB}{2 dt} x = \\ &= \frac{Q}{R^2} \cdot \frac{dB}{dt} \int_0^R x^3 dx = \frac{Q dB}{R^2 dt} \cdot \frac{R^4}{4} = \frac{Q R^2}{4} \cdot \frac{dB}{dt} \end{aligned}$$

Згідно із законом динаміки обертального руху імпульс моменту сили, що діє на диск, дорівнює зміні моменту імпульсу диску:

$$M dt = I d\omega,$$

$$d\omega = \frac{M dt}{I}. \tag{2}$$

Проінтегруймо вираз (2):

$$\omega = \int_0^{\omega} d\omega = \int_0^B \frac{QR^2 dB}{4I} = \frac{QR^2 B}{4I} = \frac{QR^2 B}{4 \cdot 0,5mR^2} = \frac{QB}{2m}$$

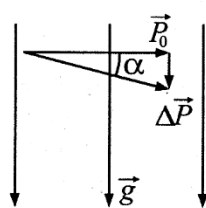
Напрямок обертання диску нас не цікавить, тому межі інтегрування взято від 0 до B, враховано, що момент інерції диску:

$$I = \frac{1}{2}mR^2.$$

Задача 3.

а)

$\Delta \vec{P}$ – зміну імпульсу фотона визначимо з другого закону Ньютона:



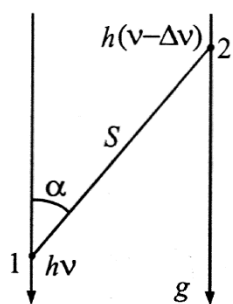
$$\Delta P = F \Delta t = mg \frac{S}{c} = \frac{hv}{c^2} g \frac{S}{c}$$

$$P_0 = \frac{hv}{c} \text{ – початковий імпульс фотона.}$$

Визначимо кут відхилення фотона враховуючи, що $\alpha \ll 1$:

$$\alpha = \text{tg} \alpha = \frac{\Delta P}{P_0} = \frac{gS}{c^2}$$

б)



Гравітаційне поле – потенціальне, однорідне. Скористайтесь законом збереження енергії:

$$hv = h(v - \Delta v) + \frac{h(v - \Delta v)}{c^2} gS \cos \alpha,$$

Звідси:

$$\left(1 - \frac{\Delta v}{v}\right) \left(1 + \frac{gS \cos \alpha}{c^2}\right) = 1,$$

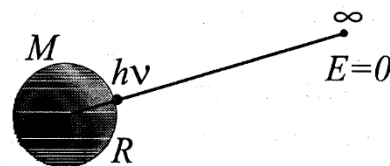
$$\frac{\Delta v}{v} = 1 - \frac{1}{1 + (gS \cos \alpha)/c^2}.$$

За умови, що $\frac{gS \cos \alpha}{c^2} \ll 1$ маємо:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{gS \cos \alpha}{c^2}$$

при $\alpha = 0$ $\frac{\Delta v}{v} = \frac{gS}{c^2} \approx 10^{-15}$.

в)



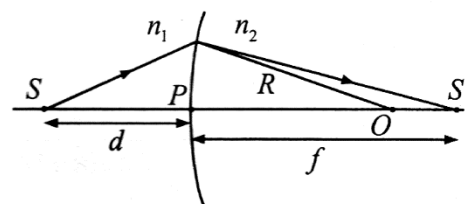
Оскільки зоря – „чорна діра”, то фотон, що на поверхні зорі має енергію hv , на нескінченності повинен зникнути $E = 0$. Застосуємо закон збереження енергії:

$$hv - \gamma \frac{M(hv/c^2)}{R} = 0,$$

$$R = \frac{\gamma M}{c^2}.$$

Для маси Сонця: $R = 1$ км.

Задача 4.



Лінза симетрична $R_1 = R_2 = R$, але її фокуси розташовані несиметрично. Виведемо формулу для лінз в обох випадках, для цього скористайтесь формулою сферичної поверхні. R – радіус сферичної поверхні, що є межею двох середовищ з показниками заломлення n_1, n_2 ; d – відстань від предмета до сферичної поверхні; f – відстань від сферичної поверхні до зображення.

Запишемо формулу сферичної поверхні:

$$\frac{n_1}{d} - \frac{n_2}{f} = \frac{n_1 - n_2}{R} \quad (1)$$

Усі відстані виміряні від т. P (за променем – додатні відстані, проти променя – від’ємні).
 Для виведення формули лінзи, розглянемо проходження променя послідовно через дві сферичні поверхні (система сферичних поверхонь). Нехай перша поверхня дає зображення на відстані f' від P_1 , тоді це зображення є предметом для другої сферичної поверхні. Лінза тонка, а отже, $P_1P_2 \approx 0$.

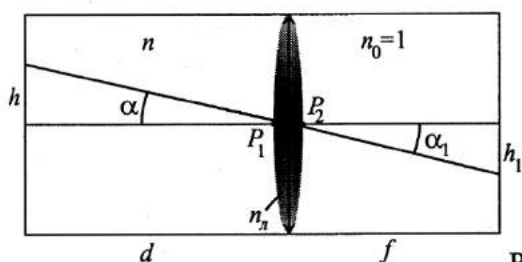


Рис. 1.

$$\frac{n}{-d} - \frac{n_2}{f'} = \frac{n - n_2}{R},$$

$$\frac{n_2}{f'} - \frac{1}{f} = \frac{n_2 - 1}{-R},$$

де f' – відстань від зображення у першій поверхні до P_2 .

Звідси отримаймо формулу лінзи у першому випадку:

$$\frac{n}{d} + \frac{1}{f} = \frac{2n_2 - n - 1}{R}. \quad (2)$$

У другому випадку матимемо:

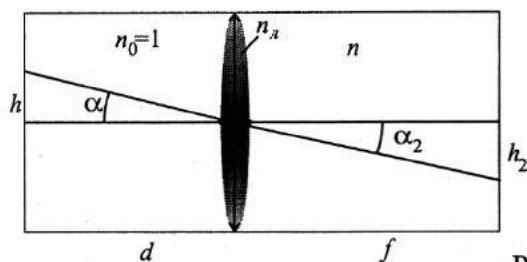


Рис. 2.

$$\frac{1}{-d} - \frac{n_2}{f''} = \frac{1 - n_2}{R}, \quad \frac{n_2}{f''} - \frac{n}{f} = \frac{n_2 - n}{-R},$$

звідси формула лінзи у другому випадку:

$$\frac{1}{d} + \frac{n}{f} = \frac{2n_2 - n - 1}{R}. \quad (3)$$

Віднімемо (3) від (2):

$$\frac{n-1}{d} + \frac{1-n}{f} = 0.$$

$$d = f = \frac{L}{2} = 0,25 \text{ м}. \quad (4)$$

Як видно з рис. 1 і 2:

$$\alpha = \frac{h}{d}, \quad \alpha_1 = \frac{h_1}{f}, \quad \alpha_2 = \frac{h_2}{f}. \quad (5)$$

Знайдемо співвідношення між кутами $\alpha, \alpha_1, \alpha_2$. Розглянемо хід параксильних променів через оптичний центр лінзи. Він збігатиметься з ходом променів через плоскопаралельну пластинку.

Перший випадок. Скористайтесь законом заломлення світла:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{n_2}{n}, \quad (6)$$

$$\frac{\beta}{\alpha_1} = \frac{1}{n_2}. \quad (7)$$

З (6) і (7) випливає:

$$\frac{\alpha}{\alpha_1} = \frac{1}{n}. \quad (8)$$

Другий випадок:

$$\frac{\alpha}{\beta_1} = \frac{n_2}{1},$$

$$\frac{\beta_1}{\alpha_2} = \frac{n}{n_2},$$

тобто:

$$\frac{\alpha}{\alpha_2} = n. \quad (9)$$

Враховуючи (4) (5) (8) і (9), отримаємо:

$$n = \sqrt{\frac{h_1}{h_2}} = 1,5.$$

$$h = \sqrt{h_1 h_2} = 3 \text{ мм}.$$

Задача 5.

Нехай у цей момент часу центри Сонця, Місяця і Землі знаходяться на одній прямій, а тінь Місяця потрапляє на екватор. Відомо, що Сонце і Місяць переміщуються відносно зір із заходу на схід. Перейдімо у систему відліку, прив'язану до центра Землі. Тоді

$$v_C = \omega_C R_C = \frac{2\pi}{T_C} R_C \text{ – швидкість Сонця, } R_C =$$

$1,5 \cdot 10^8$ км – відстань від Землі до Сонця, $T_C = 365$ діб – період обертання Сонця навколо Землі;

$$v_M = \frac{2\pi}{T_M} R_M \text{ – швидкість Місяця, } R_M = 3,8 \cdot 10^5 \text{ км}$$

– відстань від Землі до Місяця, $T_M = 27,3$ доби – період обертання Місяця навколо Землі. Рух тіні Місяця по поверхні Землі зумовлений трьома факторами: рухом Сонця, рухом Місяця, рухом

поверхні Землі ($v_3 = \frac{2\pi}{T_3} R_3$ – швидкість руху по-

верхні Землі, $T_3 = 1$ доба – період обертання Землі, $R_3 = 6,4 \cdot 10^3$ км – радіус Землі).

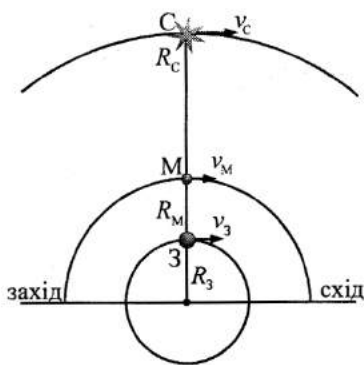


Рис. 1.

Розгляньмо ці фактори незалежно. Нехай рухається тільки Сонце, тоді за час t Сонце пройде відстань $v_C t$, а тінь $v_{TC} t$ (v_{TC} – швидкість тіні, що зумовлена рухом тільки Сонця). З подібності трикутників (див. рис. 2) отримаємо:

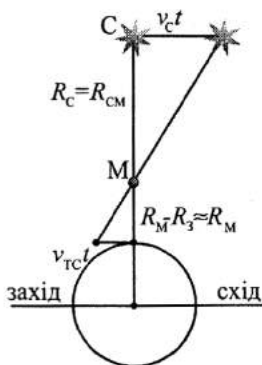


Рис. 2.

$$\frac{v_{TC} \cdot t}{R_M} = \frac{v_C \cdot t}{R_C},$$

$$v_{TC} = v_C \frac{R_M}{R_C} = \frac{2\pi}{T_C} R_C \frac{R_M}{R_C} = \frac{2\pi}{T_C} R_M. \quad (1)$$

Тінь рухається на захід.

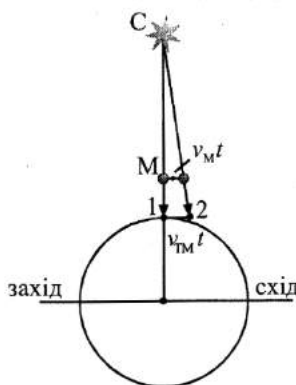


Рис. 3.

Нехай рухається тільки Місяць (див. рис. 3). У цьому випадку тінь переміщується на схід. Враховуючи, що Сонце знаходиться дуже далеко, промені 1 та 2 вважаймо паралельними (час t малий), тоді:

$$v_{TM} = v_M = \frac{2\pi}{T_M} R_M \quad (2)$$

– швидкість тіні, що зумовлена рухом Місяця. З рухом тільки поверхні Землі, тінь рухається зі швидкістю $v_{T3} = v_3$ поверхні Землі на захід (див. рис. 4). (Точка 1 була в тіні, через час t вона буде в положенні 1', тобто на схід від тіні)

$$v_{T3} = \frac{2\pi}{T_3} R_3. \quad (3)$$

Додаймо ці три швидкості руху тіні, вважаючи додатним напрям на схід:

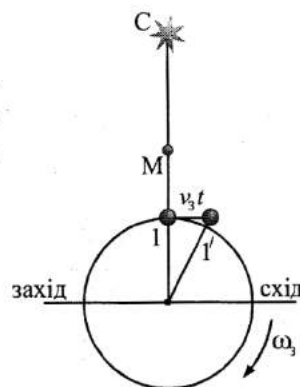


Рис. 4.

$$v_T = v_{TM} - v_{TC} - v_{T3} = \frac{2\pi}{T_M} R_M - \frac{2\pi}{T_C} R_M - \frac{2\pi}{T_3} R_3 = 0,47 \text{ км/с.}$$

Тінь рухається на схід. Очевидно, спостерігаючи затемнення Сонця у місцевостях, які не лежать на прямій центр Сонця – центр Землі, швидкість тіні буде значно більшою.

Розв'язки підготував
Володимир АЛЕКСЕЙЧУК

НОВІ КАФЕДРИ ...

КАФЕДРА ФІЗИКИ ЗЕМЛІ

У розвитку наук про Землю в провідних університетах та наукових центрах Європи, США та Канади власне геофізика, або наука – фізика Землі є надзвичайно цікавим науковим інструментом для вивчення фізичних явищ, що супроводжують всі процеси у нашій планеті та довкола неї у космічному просторі. Суттєвою особливістю фізики Землі є складність тих явищ, що вивчаються. Багато чинників, які впливають на ці явища, ще навіть невідомі. Тому і при математичному дослідженні геофізичних явищ доводиться робити різні ймовірні припущення. Інша особливість геофізики – надзвичайно утруднений експеримент. Однак висновки геофізики мають надзвичайно важливе значення для суміжних галузей природничих наук.

Земля перебуває у постійному русі й у взаємодії з усіма космічними тілами, на неї діють чинники різноманітних процесів, що відбуваються в космосі. Вивчення балансу променистої енергії в атмосфері, йонізованого стану висотних шарів атмосфери, магнетних бур, знаходиться у нерозривному зв'язку із процесами на Сонці. Важливим чинником є також те, що геофізичні дані у майбутньому можуть пролити світло на проблему щодо походження Землі та всієї Сонячної системи.

Створити кафедру для проведення міждисциплінарних досліджень у галузі наук про Землю запропонував професор Іван Вакарчук 1999 року. Організований з його ініціативи семінар „Проблеми фізики Землі” 25 лютого 1999 року разом із Інститутом геології і геохімії горючих копалин НАН України та Українським державним геологорозвідувальним інститутом дав змогу по-новому підійти до цієї проблеми. Тематика семінару та доповіді однозначно визначали напрями майбутньої роботи: „Міждисциплінарні дослідження та їх впровадження у навчальний процес у Львівському національному університеті імені Івана Франка”, „Роль

фундаментальних геофізичних досліджень у навчальному процесі на геологічному факультеті”, „Проблеми фізики Землі”, „Проблеми сейсмології та їх розв'язання за допомогою вивчення геофізичних полів”, „Проблеми фізики пласта в геотехнологіях”, „Прикладні аспекти геофізики”. Актуальною проблемою є організація і проведення фундаментальних та прикладних науководослідних робіт з питань створення фізичних основ нових геофізичних методів, дослідження фізичних властивостей гірських порід для вдосконалення інтерпретаційних основ геофізичних даних, а також надання науково-методичної допомоги для розв'язання окремих практичних завдань нафтогазової та вугільної промисловості.

Забезпечення глибокими знаннями з фундаментальних питань фізики Землі, фізичних основ теоретичних та прикладних геофізичних методів досліджень земної кори та фізичних принципів геотехнологій вимагало створення спеціалізованої кафедри фізики Землі. У березні 2000 року на геологічному факультеті Львівського національного університету імені Івана Франка така кафедра створена.

Кафедра фізики Землі є навчально-науковим підрозділом Львівського національного університету імені Івана Франка, який об'єднуватиме професорсько-викладацький і навчально-допоміжний персонал для підготовки висококваліфікованих спеціалістів геофізичних досліджень, пов'язаних з проблемами фізичних процесів в атмосфері, корі і мантії Землі: гірських порід, прогнозування, розвідки і розробки метановугільних та нафто-газових родовищ, дослідження сейсмічної активності Землі.

Основним завданням кафедри фізики Землі є підготовка студентів геологічного факультету з питань фізики процесів у геосферах Землі, фізичних основ теоретичних та прикладних геофізичних методів, комплексної інтерпретації даних геофізичних досліджень, промислової та польової геофізики, прогнозування фізичних процесів впливу діяльності людини на геосфери Землі, фізичного, математичного та комп'ютерного моделювання геологічних, геохімічних та екологічних процесів. Для забезпечення навчального процесу та належного рівня підготовки спеціалістів зі спеціальностей: *геологія, геохімія, екологія*, а пізніше нової спеціальності *геофізика*, розпочато підготовку таких дисциплін:

Теоретичні основи геофізики

Фізика Землі. Сонячна система і Земля. Моделі виникнення і розвитку Землі. Фізичні основи методів досліджень структури та складових оболонок Землі. Будова Землі: фізичні процеси в геосферах. Значення атмосфери. Походження та еволюція магнетного поля Землі. Тектонічні процеси, основи сейсмології, вулканічні процеси.



Наукові та навчальні напрями кафедри фізики Землі

Вибрані розділи теоретичної фізики. Механіка суцільних середовищ, гідродинаміка, термодинаміка. Електродинаміка, квантова механіка, теорія розсіяння. Основи космології та гравітації. Теорія гідромагнетного динамо і земний магнетизм.

Теорія коливань та поширення хвиль. Поширення хвиль у суцільних, шаруватих та пористих середовищах, рідинах, газах, електромагнетне випромінювання, акустичні хвилі. Розсіяння світла в атмосфері.

Теорія кінетичних явищ. Процеси переносу в оболонках Землі.

Інверсна теорія розсіяння. Методи розв'язку обернених задач розсіяння.

Прикладна геофізика

Інтерпретація даних геофізичних досліджень. Фізичні основи вияву спостережуваних явищ в атмосфері, корі та мантії Землі. Комплексний підхід до аналізу геофізичних процесів.

Сучасні методи виявлення та пошуку корисних копалин за даними геофізичних досліджень. Фізичні основи і методи вимірювання даних спостережень тектонічних процесів, сейсмологічний аналіз, радіонуклеаційний аналіз. Методи геоелектричних і геомагнетних досліджень, спектроскопічні спостереження.

Фізика екологічних проблем атмосфери Землі. Проблеми наслідків діяльності людства в атмосфері Землі: парниковий ефект, озонова проблема. Методи досліджень та прогнозування виявів екологічних проблем.

Фізика методів аналізу забруднення навколишнього середовища. Фізичні основи і методи вимірювання даних спостережень. Радіоактиваційний аналіз, спектрометричні методи радіоізотопного аналізу.

Обернені задачі у дослідженні фізичних процесів Землі. Атмосферні явища, тектонічні процеси, сейсмологія, земний магнетизм, електричні явища в атмосфері, електричні явища в корі та мантії Землі.

Комп'ютерна обробка результатів геофізичних досліджень. Методика інженерного експерименту в геоології. Методи обчислювальної математики та ма-

тематичної статистики з обробки геологічних вимірювань. Комп'ютерне моделювання геофізичних досліджень.

Необхідно також удосконалити методику обробки й аналізу геофізичних даних для інформативнішого і точнішого вивчення структури, густини та складу геологічних шарів Карпат, а також теоретичних досліджень оберненої задачі гравіметрії та даних сейсмологічних вимірювань для їхньої комплексної інтерпретації. Актуальність проведення фундаментальних досліджень зумовлена недостатнім рівнем теоретичного забезпечення методів розв'язку як прямих, так й інверсних задач у сейсморозвідці, магнеторозвідці і гравіторозвідці.

На сучасному етапі проблема тектоно-фізичного аналізу геопотенціальних полів України не дає змоги проводити комплексну інтерпретацію геофізичних даних для розв'язання геофізичних, геологічних та інженерно-геологічних задач у вивченні глибинної структури, пошуку родовищ корисних копалин і перспективності їхнього використання, визначення карстових порожнин та причин екологічних катастроф як наслідків впливу техногенних процесів на природу України та атмосферу.

Це вимагає розпочати ґрунтовні дослідження з міждисциплінарної науково-дослідної роботи кафедр теоретичної фізики та фізики Землі для розробки нових теоретичних підходів з урахуванням прямого й опосередкованого впливу внутрішніх і зовнішніх полів Землі на фізичні властивості досліджуваних геологічних проблем, щоб виробити рекомендації до створення нових способів як аналізу, так і пошуку корисних копалин.

Роман ЛЕЩУХ,

професор,

декан геологічного факультету

Львівського національного

університету імені Івана Франка

Віталій ФУРМАН,

доцент кафедри фізики Землі

канд. фіз.-мат. наук,

НОВІ НАВЧАЛЬНІ ЗАКЛАДИ . . .

ПРИРОДНИЧИЙ КОЛЕДЖ

Згідно з Положенням про державний вищий заклад освіти, затвердженим постановою Кабінету Міністрів України від 5 вересня 1996 р. № 1074 та наказом Міністра освіти і науки України № 158 від 26 травня 2000 р. у Львівському національному університеті імені Івана Франка створено Природничий коледж. Здійснено прийом студентів на перший курс для отримання вищої освіти за освітньо-професійними програмами молодшого спеціаліста із спеціальностей:

- прикладна екологія,
- аналітичний контроль якості хімічних сполук,
- конструювання, виробництво і технічне обслуговування виробів електронної техніки,
- експлуатація систем обробки інформації і прийняття рішень.

Чи знаєте Ви, що ...

Національна академія наук України щорічно оголошує конкурс на здобуття премій імені видатних учених України

1. **Премія імені М. П. Барабаша** – за видатні роботи в галузі астрофізики (Відділення фізики і астрономії НАН України).
2. **Премія імені В. І. Вернадського** – за видатні наукові роботи в галузі геології, геофізики і гідрофізики (Відділення наук про Землю НАН України).
3. **Премія імені В. М. Глушкова** – за видатні досягнення в галузі кібернетики, загальної теорії обчислювальних машин і систем (Відділення інформатики НАН України).
4. **Премія імені Г. В. Курдюмова** – за видатні наукові роботи в галузі фізики металів і матеріалознавства (Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України).
5. **Премія імені З. І. Некрасова** – за видатні наукові роботи в галузі металургії (Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України).
6. **Премія імені С. І. Пекаря** – за видатні наукові роботи в галузі теорії твердого тіла (Відділення фізики і астрономії НАН України).
7. **Премія імені І. Пулюя** – за видатні наукові роботи в галузі експериментальної фізики (Відділення фізики і астрономії НАН України).
8. **Премія імені К. Д. Синельникова** – за видатні наукові роботи в галузі фізики (Відділення фізики і астрономії НАН України).
9. **Премія імені В. І. Толубинського** – за видатні досягнення в галузі теплофізики і теплотехніки (Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України).
10. **Премія імені І. М. Францевича** – за видатні наукові роботи в галузі фізичного матеріалознавства (Відділення фізико-технічних проблем матеріалознавства НАН України).
11. **Премія імені В. М. Хрушова** – за видатні наукові роботи в галузі електроенергетики та електротехніки (Відділення фізико-технічних проблем енергетики НАН України).
12. **Премія імені М. К. Янгеля** – за видатні досягнення в галузі прикладної і технічної механіки та ракетно-космічної техніки (Відділення механіки НАН України).

Чи знаєте Ви, що ...

Талант не має вікових меж

Блез Паскаль. Коли йому було чотири роки, навчився читати і писати, у шестирічному віці почав вивчати іноземні мови. Десятирічний Паскаль, досліджуючи звукові явища, встановив основні закономірності поширення звуку у повітрі. Б. Паскалеві було лише 12 років, коли він написав першу наукову працю „Трактат про звуки”.

Джеймс Максвелл (видатний англійський фізик) написав першу наукову працю „Про властивості овалів і кривих з багатьма фокусами”, коли йому було 14 років.

Норберт Вінер (батько кібернетики) у трирічному віці розмовляв і читав трьома мовами. У 14 років здобув вищу математичну освіту, а у 18 – став доктором філософії Гарвардського університету.

Микола Боголюбов, не маючи закінченої середньої та вищої освіти, був прийнятий до аспірантури у 15-річному віці, у 19 – захистив кандидатську дисертацію,

а в 21 рік йому надали учений ступінь доктора наук. Першу наукову працю він опублікував у 15 років, у 17 – М. Боголюбов був удостоєний премії Болонської академії.

Лев Ландау (лауреат Нобелівської премії, академік) закінчив середню школу, коли мав 13 років і вступив до Бакинського університету, де навчався одночасно на двох факультетах. У 26 років йому було присвоєно ступінь доктора фізико-математичних наук, а за рік – звання професора.

Макс Планк та Вольфганг Паулі* (знамениті фізики-теоретики) захистили докторську дисертацію, коли їм виповнилося лише 21 рік.

У науці відомі приклади творчого довголіття. Так **Архімед** винайшов запалювальні (вгнуті) дзеркала у 75 років.

* Детальніше про декого з цих учених читайте в журналі „Світ фізики”. 1999. № 4; 2000. № 2.



Магнетна

У 1950-х роках нашого сторіччя у Нідерландах, був започаткований новий метод боротьби з накипом у парових котлах. А явище це полягає ось у чому. Під час кипіння на стінках усе товстішим шаром осідають солі, які є теплоізолятором. У зв'язку з цим доводиться значно збільшувати кількість палива, щоб довести воду до кипіння. Майже двісті років йшла боротьба з накипом. Успіхи були незначні. І раптом з'явився дуже простий засіб – воду, яку спрямовують у котел, почали пропускати між полюсами постійного магнету. І відбулося справжнє диво – накип перестав утворюватися. Так виникло зацікавлення новим різновидом води – т. зв. магнетною водою.

Багато учених та інженерів почали вивчати цей феномен. Вони з'ясували, що:

- замішування бетону на магнетній воді змінює здатність розчину до кристалізації і зміцнює бетон;
- дамби, які укладають гідравлічним способом і греблі з пульпи (суміш води з піском, пропущена через постійне магнетне поле), стають міцнішими (стійкішими).

Використання для підливання рослин магнетної води збільшує їхню врожайність. Є матеріали, які свідчать, що за допомогою магнетної води вдалося поліпшити якість синтетичного каучуку, підвищити інтенсивність та якість очищення промислових стоків тощо.

Тіло людини на дві третини складається з води, тому цілком природно припустити, що магнетне поле впливатиме і на стан здоров'я людини. І справді, за матеріалами кандидата медичних наук В. Савельєва штучні магнетні поля успішно можна використовувати для стимулювання багатьох життєво важливих процесів: поліпшення кровообігу, лікування захворювань судин, зменшення або повне припинення запальних процесів.

Пропускання води у магнетному полі приводить до зміни багатьох її властивостей: щільності, електропровідності, здатності до розчинення солей, швидкості осідання в ній твердих частинок. Дивною є і магнетна пам'ять води: набуті властивості (залишкова магнетність) зберігаються протягом доби.

Чи не ці зміни є причиною „чародійних” властивостей магнетної води?



Якщо бути цілком відвертим, то загадка магнетної води досі остаточно не з'ясована. Йде пошук. Учені намагаються пояснити цей феномен зміною структури води. Одні науковці вважають, що в магнетному полі змінюється орієнтація ядерних спінів (обертання) водню в молекулі води. Інші пояснюють особливості магнетної води наявністю в природних розчинах оксидів заліза та їхніх гідратів, що і зумовлює виникнення її „чудо-дійних” властивостей під впливом магнетного поля. Точної відповіді на це запитання поки що немає. Мабуть тому деякі вчені і досі скептично ставляться до магнетної води.

А що Ви, шановні Читачі, знаєте про це?

Ростислав ВОВЧЕНКО,

*доцент кафедри
фізики Землі геологічного факультету
Львівського національного університету
імені Івана Франка*



Нові серії книг видавництва „ЄВРОСВІТ”:

БІБЛІОТЕКА МОЛОДОГО НАУКОВЦЯ

та

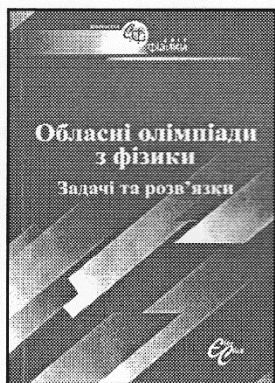
БІБЛІОТЕКА „СВІТ ФІЗИКИ”

ЗАПРОШУЄМО АВТОРІВ ДРУКУВАТИ СВОЇ КНИГИ У ЦИХ СЕРІЯХ !

МЕЦЕНАТІВ ПРОСИМО ПІДТРИМАТИ НАШІ ПРОЕКТИ !

Адреса: видавництво „Євросвіт”, м. Львів, 79005, а/с 6700

В.Алексейчук, О.Гальчинський, Г.Шопа. Обласні олімпіади з фізики. Задачі та розв’язки. – Львів: Євросвіт, 2000. – 168 с.



Книга містить умови та розв’язки III (обласного) етапу Всеукраїнських олімпіад з фізики (1993 – 2000). У книзі – 160 задач та їхні розв’язки, подано також рисунки, графіки, коментарі. У додатках наведені методи наближеного обчислення фізичних величин, математичні формули, таблиці фізичних величин тощо.

Книга рекомендується для вдосконалення навичок самостійного розв’язування задач з фізики, підготовки до олімпіад та інших творчих змагань школярів.

Б.Кремінський, І.Пінкевич. Задачі міжнародних фізичних олімпіад. 1987 – 1999 рр. Випуск 3. – Тернопіль: Навчальна книга – Богдан, 2000. – 152 с.

У збірнику подано умови задач теоретичних турів Міжнародних фізичних олімпіад 1987 – 1999 рр. та їхні розв’язки. Мета посібника – допомогти учням та учителям у поглибленому вивченні фізики, зорієнтувати їх на міжнародний рівень фізичних знань та вмінь, сприяти залученню до олімпійського руху ширшого кола талановитих школярів через ознайомлення їх з програмою, вимогами та завданнями Міжнародних фізичних олімпіад.

О.С.Нагорняк, М.Медюх. Фізико-технічні ідеї Івана Пулюя. – Тернопіль: Джура, 1999. – 212 с.

Іван Пулюй був не тільки світового виміру фізиком та електротехніком, але й видатним винахідником свого часу, творцем української науково-технічної термінології. Тому автори поряд із сучасними термінами подають терміни, якими користувався Іван Пулюй у своїх україномовних працях.

Книга присвячена технічній творчості Івана Пулюя. В ній описано фізико-технічні ідеї, що лягли в основу його винаходів, проведено їхній системний аналіз і складено формули згідно з нормами сучасного патентознавства. Щоб полегшити читання книги іноземним читачам вона містить переклад англійською мовою.

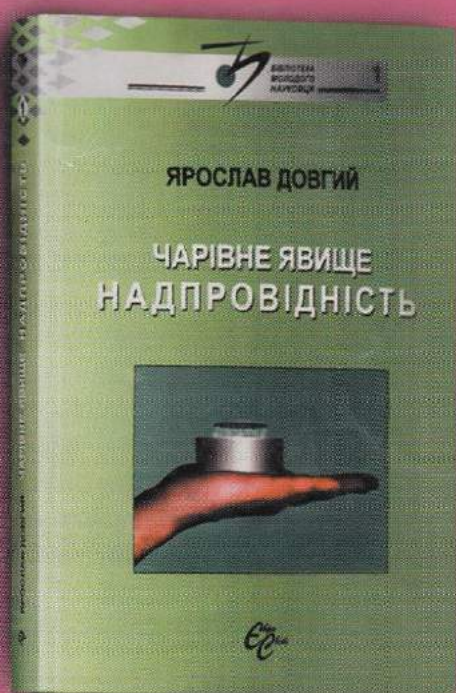
Книга адресується фахівцям та всім, хто цікавиться творчістю Івана Пулюя.



МИСТЕЦЬКА
СТОРІНКА
ЖУРНАЛУ
"СВІТ ФІЗИКИ"



*Олекса Новаківський.
Юр. Поема Світової війни.
1924. О., ф. 41,5 × 55,5*



*У новій серії «Бібліотека
молодого науковця»
видавництво «Євросвіт»
пропонує монографію
Ярослава Довгого
«Чарівне явище надпровідність»*

*Звертайтеся за адресою:
СП «Євросвіт»,
а/с 6700, м. Львів, 79005*