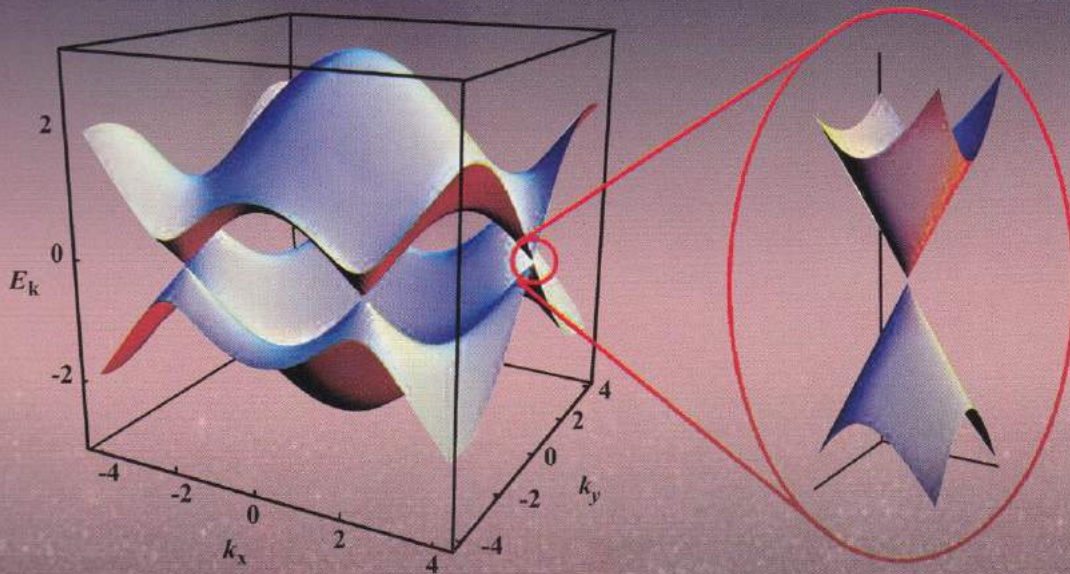


С В І Т

# ФІЗИКА

науково-популярний журнал

№3  
2010



*Дуже важливо знайти себе,  
коли змінюється форма існування*

*Ігор Юхновський*





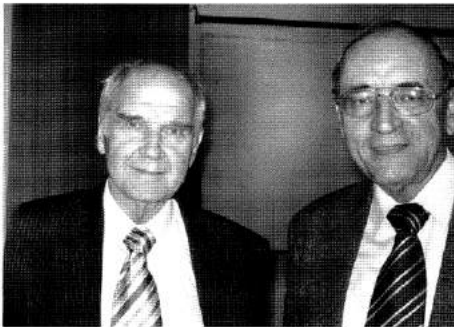


## *Вітаємо з ювілеєм ІГОРА ЮХНОВСЬКОГО*

У вересні 2010 року наукова громадськість України відзначила 85-річний ювілей відомого політичного діяча, видатного фізика, академіка Ігора Рафаїловича Юхновського. З нагоди ювілею 31 серпня 2010 р. в Інституті фізики конденсованих систем НАН України відбулися наукові читання, де виголосили свої доповіді відомі вчені, зокрема І. М. Мриглод, І. В. Стасюк, М. Ф. Головка, В. М. Локтев, М. М. Боголюбов (мол.), А. В. Свідзинський та інші.



*Презентація книжок  
під час святкування 85-річчя  
І. Р. Юхновського. Ліворуч – О. Л. Іванків.  
(Будинок вчених, Львів, 1 вересня 2010 р.)*



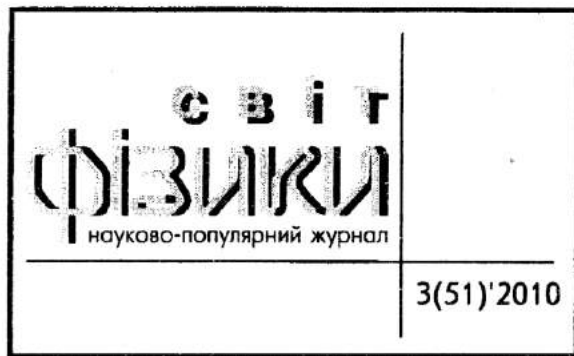
*Академік І. Р. Юхновський  
і член-кореспондент НАН України  
І. В. Стасюк (Інститут фізики  
конденсованих систем НАН України,  
Львів, 31 серпня 2010 р.)*

Під час святкувань відбулася презентація книжок академіка Юхновського: “Вибрані праці. Третій том: Політика”, “Становлення середнього класу: домінанта національної стратегії України”, “Бінарна функція розподілу для систем взаємодіючих заряджених частинок (за матеріалами кандидатської дисертації І. Р. Юхновського), серія “З джерел фізичної науки”.

*Редакційна колегія та читачі журналу “Світ фізики”  
щиро вітають з 85-річчям від дня народження  
відомого політичного діяча, видатного фізика, академіка*

*Ігора Рафаїловича ЮХНОВСЬКОГО.*

*Бажають йому міцного здоров'я, нових успішних здобутків  
у науковому, політичному та громадському житті.*



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:

**Ігор Анісімов**  
**Михайло Бродин**  
**Петро Голод**  
**Семен Гончаренко**  
**Ярослав Довгий**  
**Іван Климишин**  
**Юрій Ключковський**  
**Богдан Лукіянець**  
**Олег Орлянський**  
**Максим Стріха**  
**Юрій Ранюк**  
**Ярослав Яцків**

Художник **Володимир Гавло**

Літературний редактор  
**Мирослава Прихода**

Комп'ютерне макетування та друк  
СП "Євросвіт", наклад 1000 прим.

**Адреса редакції:**

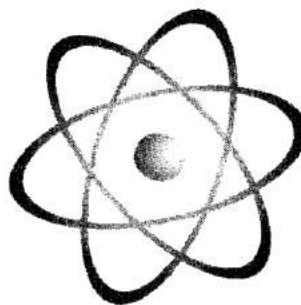
редакція журналу "Світ фізики"  
вул. Сакаганського, 1,  
м. Львів 79005, Україна

тел. у Львові 380 (0322) 39 46 73  
у Києві 380 (044) 416 60 68

phworld@franko.lviv.ua; sf@ktf.franko.lviv.ua  
www.franko.lviv.ua/publish/phworld

"...У минулому фізики домоглися вражаючих успіхів: ми були безпосередньо причетні до багатьох епохальних винаходів (телебачення, радіо, радар, рентген, транзистор, комп'ютер, лазер, атомна бомба), розкодування молекули ДНК, відкриття таких методів обстеження організму, як комп'ютерна томографія, магнетно-резонансна інтроскопія та позитронна емісійна томографія, і навіть до створення інтернету й глобальної павутини. Фізики у жодному разі не є пророками, які можуть передбачити майбутнє. Водночас правда й те, що деякі тонкі спостереження і блискучі здогадки провідних фізиків в історії науки відкрили абсолютно нові наукові сфери. Першою з революцій двадцятого сторіччя була квантова революція, найфундаментальніша з усіх. Саме квантова революція дола поштовх двом іншим великим науковим відкриттям – молекулярній і комп'ютерній. Пришвидшення розвитку науки і технологій у двадцять першому сторіччі неминуче позначиться на добробуті націй і на нашому рівні життя. Збагачуватимуться переважно ті держави, які повністю усвідомлять надзвичайну важливість цих трьох наукових революцій..."

**Мічіо Кайку**



*Не забудьте  
передплатити журнал  
"Світ фізики"*

**Передплатний індекс  
22577**

Передрук матеріалів дозволяється лише з письмової згоди редакції та з обов'язковим посиланням на журнал "Світ фізики"

© СП "Євросвіт"



# ЗМІСТ

## **1. Нові та маловідомі явища фізики**

*Стріха Максим.* Нова “фізика графену”: стан і перспективи 3

## **2. Фізика світу**

*Довгий Ярослав.* Фізик, що поєднав європейську фундаментальність з американським прагматизмом 11

## **3. Фізика України**

*Довгий Ярослав.* Епізод в історії фізики і доля людини 21

## **4. Університети світу**

*Мриглод Ігор.* Про Інститут фізики конденсованих систем НАН України 24

## **5. Олімпіади, турніри...**

Розв’язки задач IV етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики (2010 р., 8–10 класи) 35

## **6. Фізика світу**

*Ахіллес Манфред.* До пам’яті Йоахіма Тельтова 47







## НОВА “ФІЗИКА ГРАФЕНУ”: СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ

Максим Стріха,

доктор фізико-математичних наук, професор  
Київського національного університету імені Тараса Шевченка

### Знайомтеся: графен

Вперше зразки графену – моноатомного шару вуглецю, запакованого в гексагональну ґратку, – було отримано й досліджено 2004 року в Центрі мезоскопії й нанотехнологій Манчестерського університету (Велика Британія) [1] дослідницькою групою на чолі з Андрієм Геймом, основу якої становили російські вчені. Вигляд графену в електронному мікроскопі зображено на рис. 1. Відтоді розпочався справжній бум праць, присвячених графену (див., наприклад, огляди [2, 3]). Кажуть про появу “фізики графену” – нової інтердисциплінарної галузі досліджень на стикові фізики конденсованого середовища, фізики високих енергій і матеріалознавства.

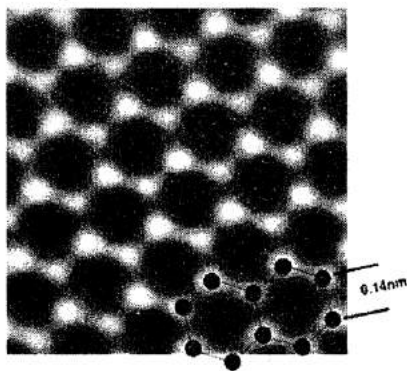


Рис. 1. Графен – вигляд в електронному мікроскопі

На те є щонайменше дві причини. По-перше, надто вже нетривіальні результати було отримано впродовж останніх років на цьому

напівметалі (чи безщілинному напівпровідникові), який виявився багатий на цілком унікальні фізичні характеристики. Причому йдеться не лише про значно вищу від сталі механічну жорсткість (модуль Юнга становить  $\sim 1$  ТПа) чи про дуже високу теплопровідність  $\sim 5 \times 10^3$  Вт  $\cdot$  м $^{-1}$   $\cdot$  К $^{-1}$ . Найприголомшливішою властивістю нового матеріалу є те, що, на відміну від усіх інших відомих науці напівметалів, електрони і дірки (ферміони!) мають у графені лінійний за імпульсом (а не квадратичний, як це має впливати з рівняння Шредінґера) енергетичний спектр. Такий спектр досі вважали притаманним лише для квазірелятивістських бозонів – фотонів і нейтрино.

По-друге, ці незвичайні ферміони мають дуже високу рухливість (теоретична верхня межа становить  $2 \times 10^6$  см $^2$   $\cdot$  В $^{-1}$   $\cdot$  с $^{-1}$ , що на чотири порядки перевищує рухливість носіїв у кремнії – основному матеріалі сучасної електроніки).

Як відомо, основним елементом електроніки сьогодні залишається транзистор металдіелектрик-напівпровідник (МДН) із ізольованим затвором. Гранична частота роботи такого транзистора  $f_t$  пов’язана з рухливістю носіїв  $\mu$  і довжиною каналу  $d$  простим співвідношенням  $f_t \sim \mu/d$ . Упродовж останніх 40 років швидкодію транзисторів підвищували зменшенням розмірів каналу (досягнуто робочі величини в кілька десятків нанометрів)



[4]. Проте тут, схоже, досягли принципової межі, й тому дальший поступ пов'язують із застосуванням нових матеріалів зі значно більшою, аніж у кремнію, рухливістю. Графен, на думку окремих експертів, може виявитися ідеальним кандидатом на таку роль.

Очевидно, на основі графену можуть бути створені також газові та біосенсори, світлодіоди та інші пристрої. А поява повідомлення про те, що вдалося виростити графеновий сенсорний екран з діагоналлю 75 см [5] (шість років тому все починалося зі зразків мікронного розміру) відразу ж призвела до оптимістичної заяви першовідкривача графену А. Гейма про те, що за пару років з'являться пристрої побутової електроніки на основі графену.

### Отримання графену

У певному сенсі графен було отримано задовго до 2004 року. Адже площини графену, пов'язані слабкими Ван-дер-Ваальсовими зв'язками, утворюють такий давно відомий людині кристал, як графіт (рис. 2). (Навіть саме слово “графен” вигадали ще у 1987-му на позначення однієї з площин, що творять графіт). А тому кожний художник, проводячи по папері олівцем, створював мікроплощинки, де залишався лише кілька-, а то й одноатомний шар вуглецю. Проте реально дослідити двовимірний (2D) вуглець (до того ж – підвести до нього електричні контакти) дало змогу лише створення в 1980-х роках атомного силового мікроскопа і розвиток нанотехнологій.

У 1980-ті спершу було отримано не 2D вуглець – графен, а 1D структури – вуглецеві нанотрубки, і 0D фулерен – молекулу  $C_{60}$ . І це не дивно – адже ще в 1930-ті Р. Пайерлс і Л. Ландау теоретично показали, що ідеальну двовимірну плівку отримати неможливо через її нестабільність щодо згортання або скручування [6]. Однак група А. Гейма знайшла

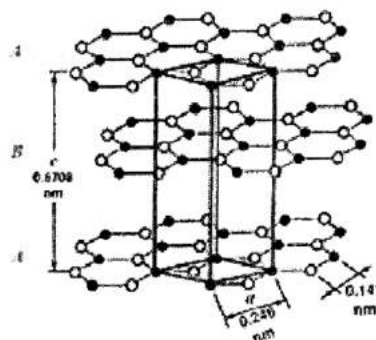


Рис. 2. Графіт ( $\alpha$ -модифікація). Кристал графіту складається з площин графену, утримуваних слабкими Ван-дер-Ваальсовими силами

вихід: графен було отримано не у вільному стані, а закріпленим на діелектричній підкладці!

Примітивну технологію перших робіт з отримання графену було названо “методом відлущування” (англ. “exfoliation”). До зразка графіту прикладали звичайний скотч. Далі його обережно віддирали – з налиплими фрагментами графіту, які в окремих місцях міг мати одноатомну товщину. Тоді скотч притискали до підкладки (нині як підкладку найчастіше використовують шар діелектрика  $SiO_2$ ). Далі скотч усували хемічними методами, а закріплений на підкладці вуглець залишався. За допомогою оптичного мікроскопа (одноатомний шар вуглецю можна бачити! – про це ми розповімо згодом) визначали ті фрагменти підкладки, на яких залишався моноатомний шар (вони мали розмір до 10 мікронів). Далі залишалася ювелірна робота підведення електричних контактів (це роблять методом електронної літографії й реактивного плазмового травлення).

Загалом у вертикальному розрізі отримана структура здебільшого має вигляд: шар графену, тоді шар діелектрика  $SiO_2$  завтовшки зазвичай у 300 нм (він закріплює графен і вод-





ночас електрично ізолює його); і, нарешті, під ним напівпровідник – кремній, який виконує роль електричного затвора: подаючи на нього позитивний чи негативний заряд, можна отримувати графен з електронною чи з дірковою провідністю.

Така технологія має очевидні недоліки: неможливо отримати плівку визначеного розміру й форми у визначеному наперед місці підкладки. Вартість перших зразків графену була астрономічна – порядку 100 000 000 \$/см<sup>2</sup>. Проте саме ця примітивна й витратна технологія дала змогу отримати революційні результати у фізиці конденсованого середовища.

Майже відразу розпочалися спроби удосконалення технології вироблення графену. Найефективнішим і придатним для промислового виробництва виявився метод, в основі якого є плазмохімічне осаджування з газової фази. Завдяки цьому методу 2009 року графен уже виробляли в світі тоннами, а його вартість знизилася до 100 \$/см<sup>2</sup>.

Нарешті, справді проривний ефект мала праця [6]. Хіміки з Японії та Південної Кореї вирошували графен на великих площинах мідної фольги осаджуванням з парової фази. Далі отримані мідно-графенові аркуші пропускали крізь валик, наносячи на них шар спеціального високоадгезивного полімеру. На наступному етапі мідь витравлювали, а графен з полімером також за допомогою валика наносили на кінцеву підкладку. На кінцевому етапі полімер усували нагріванням – й отримували листи графену на підкладці з діагоналлю 75 см.

Отримані аркуші було використано в сенсорному дисплеї, який, за висновками дослідників, не поступався стандартним дисплеям, створеним на основі провідних шарів з індіво-олов'яних оксидів.

### Хемічні зв'язки

Атом вуглецю має шість електронів, розподілених між орбіталями як  $1s^2 2s^2 2p^2$ . Внутрішні  $1s$  електрони інертні й не беруть участі у формуванні хемічних зв'язків. Натомість  $2s$ ,  $2p_x$ ,  $2p_y$  орбіталі гібридизуються та утворюють у площині  $xy$  три нові  $sp^2$  орбіталі, кожна з яких містить один електрон. Ці орбіталі зорієнтовані вздовж ліній, що виходять з ядра і розташовані під кутом 120 градусів одна від одної. Саме ці орбіталі сусідніх атомів формують міцні  $\sigma$ -зв'язки, що зумовлюють гексагональний вигляд ґратки графену. Ці зв'язки визначають зокрема механічні властивості графену з його унікальною жорсткістю.

Проте лишається ще  $p$  орбіталь, ортогональна до площини атомів вуглецю. Такі орбіталі різних атомів формують  $\pi$ -зв'язки, які в графіті відповідають за слабкі Ван-дер-Ваальсові сили між площинами. На кожному орбіталі припадає один електрон а, отже, в ізольованому шарі графену на кожен вузол ґратки припадає цей самий один електрон. Такі системи називають напівзаповненими (бо загалом в одному енергетичному стані можуть перебувати два електрони, які відрізняються спінами). Саме  $p$  орбіталі й зумовлюють дивовижні електронні властивості графену.

### Кристалічна ґратка і зонний спектр

Кристалічна ґратка графену є площиною, кінцями заповненою гексагональними комірками (рис. 3). В елементарній комірці (її трансляцією на вектор  $\vec{r}_A = m\vec{e}_1 + n\vec{e}_2$ , де  $m$  і  $n$  – цілі числа, можна вибудувати всю ґратку) містяться два атоми, позначені на рис. 3 як А і В. Відстань між найближчими атомами в



шестикутнику  $a_0 = 0,142$  нм. Як неважко бачити, стала ґратки дорівнює

$$a = \sqrt{3}a_0 = 0,246 \text{ нм.}$$

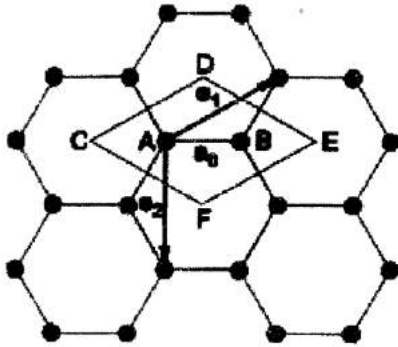


Рис. 3. Кристалічна ґратка графену. Зашифровано елементарну комірку

Оскільки елементарна комірка графену містить два атоми, енергетичний спектр, сформований  $\pi$ -орбіталями, включає дві зони: валентну (за нижчих енергій) і зону провідності (за вищих енергій). Оскільки графен є напівзаповненою системою, валентна зона за нульової температури повністю заповнена електронами, а зона провідності – повністю вільна.

Електронні властивості графену (як і кожного іншого напівметалу чи напівпровідника) визначаються виглядом енергетичного спектру в околі краю зони провідності і валентної зони. Задачу про електронний спектр графену фактично розв'язав задовго до отримання самого графену П. Воллес, розглядаючи графіт [7] і почавши вивчення саме з окремих атомних площин вуглецю. Він показав: взаємодія електронів з  $\pi$ -орбіталей з гексагональною ґраткою призводить до вельми незвичайного з погляду інших твердих тіл енергетичного спектру, який зображено на рис. 4.

По-перше, валентна зона і зона провідності дотикаються в двох точках зони Брілюєна (їх називають Діраківськими точками). Такий зонний спектр не має щілини заборонених

енергій, і цим з певного погляду нагадує давно відомий безщілинний напівпровідник типу HgTe.

Проте найцікавішим результатом П. Воллеса став сам вигляд залежності енергії носіїв  $E$  від модуля імпульса, відрахованого від Діраківської точки  $p$ , в околі цієї точки. З'ясувалося, що така залежність має конусоподібний лінійний вигляд:

$$E = \pm v_F p. \quad (1)$$

Тут знак “+” відповідає зоні провідності, знак “-” – валентній зоні; а числове значення коефіцієнта пропорційності (його прийнято називати швидкістю Фермі) дуже велике:  $v_F = 10^6$  м/с, що лише в 300 разів менше від значення швидкості світла  $c$ !

Нагадаємо: в усіх “звичайних” металах і напівпровідниках зонний спектр біля краю зони має квадратичний вигляд:

$$E_i = E_i^0 \pm \frac{p^2}{2m_i}. \quad (2)$$

Тут  $E_i^0$  – енергія екстремуму відповідної зони;  $m_i$  – ефективна маса носіїв (для різних зон вона різна). Знак “+” так само відповідає зоні провідності, а знак “-” – валентній зоні. Важливо те, що квадратичний спектр (2) є наслідком розв'язання рівняння Шредінґера для енергій біля краю відповідної зони в твердому тілі, яке має трансляційну симетрію.

Натомість лінійний спектр (1) характерний для ультрарелятивістських частинок (фотонів, нейтрино). Ці частинки позбавлені маси спокою. З'ясувалося, що електрони і дірки в графені теж мають “нульову” ефективну масу.

Часом кажуть, що рівняння Шредінґера в графені “не працює”. Це, звісно, не так. Повна система описується саме рівнянням Шредінґера, яке включає кінетичну енергію  $\pi$ -електронів і періодичний потенціал атомів вуглецю, “організованих” у гексагональну ґратку. Таке рівняння описує спектр при всіх значеннях



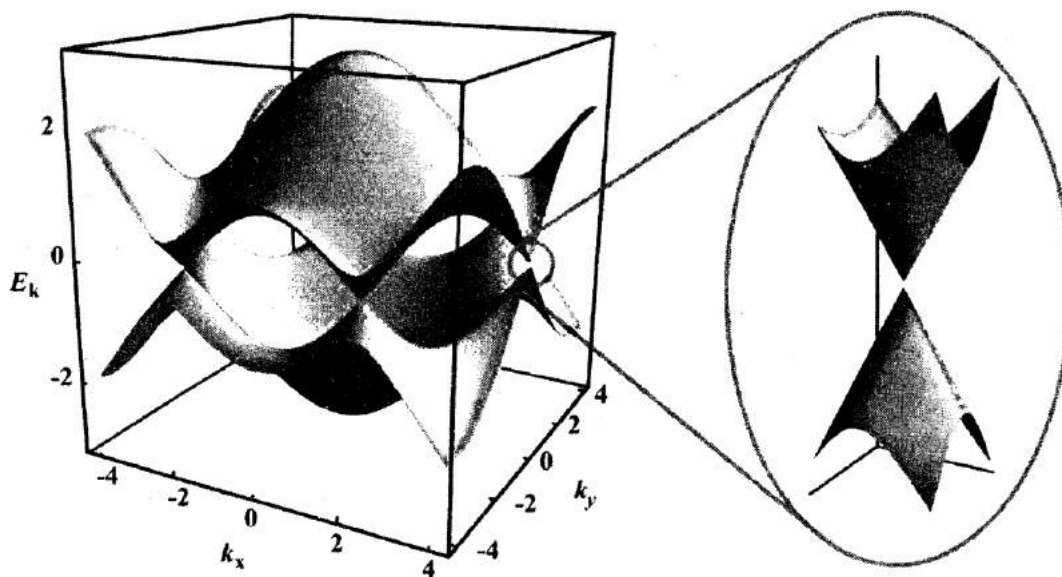


Рис. 4. Зонна структура графену.

На врізці – конічний лінійний спектр носіїв в околі однієї з точок Дірака

енергій (а не лише поблизу особливих Діраківських точок, див. рис. 4). Проте можна строго показати (див. [8]), що в околі точок Дірака спектр задається двовимірним рівнянням Дірака з нульовою ефективною масою, розв'язком якого є (1). Так відбувається дивовижний перехід від звичайних для фізики конденсованого середовища електронів, які взаємодіють з періодичним потенціалом ґратки і мають скінченну ефективну масу, до вільних Діраківських ферміонів з нульовою ефективною масою, які рухаються зі швидкістю Фермі  $v_F$  – фактично з перенормованою на  $1/300$  швидкістю світла!

#### Властивості електронного газу в графені

Звичайно, не всі дивовижні властивості графена визначаються лінійним виглядом зонного спектра поблизу точок Дірака. Вже згадувана надвисока, у 200 разів вища, ніж у сталі, жорсткість є наслідком великої міцності  $\sigma$ -зв'язків у площині  $xy$ . Ними ж визначається і висока хемічна стабільність графену.

Проте вже перша, присвячена вимірам польових ефектів у графені [1], показала й низку інших незвичайних властивостей. З'ясувалося, що графені можуть спостерігатися дуже великі густини струмів. Аж до субмікронних розмірів транспорт у графені має балістичний характер (носії рухаються без розсіювання і мають дуже високу рухливість). Провідність графену може мати і електронний, і дірковий характер.

Ця обставина є наслідком вигляду зонного спектра графену, який описується рівнянням (1). Прикладаючи до затвору (шару кремнію під підкладкою з діелектрика) напругу різної полярності, можемо зміщувати рівень Фермі (який без напруги проходить через точку Дірака). Якщо на затворі “плюс”, рівень Фермі розташований вище від точки Дірака, то маємо електронну провідність, якщо “мінус”, і рівень Фермі зміщується нижче – діркову. Зміну типу провідності легко виявити, вимірюючи знак ефекта Холла.

Перші вимірювання на графені, нанесеному на підкладку діелектрика, давали значення рухливості  $\mu \sim 10^4 \cdot \text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Такі значення



зумовлені розсіянням носіїв на коливаннях атомів (фононах) підкладки. Згодом, протравивши в шарі діелектрика яму завглибшки в 150 нм, вдаюся отримати над нею “підвішену” плівку графену (стабільність її зумовлена тим, що реальний графен не ідеальний: як показують картинки, отримані за допомогою атомного силового мікроскопа, його поверхня “збрижена” рельєфом з лінійними розмірами порядку 10 нм і висотою порядку 1 нм). Провідність у такому “підвішеному” графені суттєво вища – адже тут носії розсіюються тільки на дефектах самого графена. Цими дефектами можуть бути і неідеальності ґратки (поодинокі п’яти-, або семикутники, включені в масив шестикутників), і коливання атомів ґратки (власні фонони графена). В разі, якщо вдасться виготовити “майже ідеальну” плівку, де залишиться лише слабке розсіяння на власних фононах (якого уникнути принципово не можна), теоретична верхня межа рухливості становитиме  $2 \times 10^6 \cdot \text{см}^2 \cdot \text{В}^{-1} \cdot \text{с}^{-1}$ . Отже, графен проводитиме краще, ніж срібло – найкращий провідник за кімнатної температури.

Ще однією видатною рисою графену є наявність у нього мінімальної провідності. Здавалося б, коли напруги на затворі немає, то рівень Фермі проходить точно крізь точку Дірака, й жодної провідності бути не мусить, бо всі стани валентної зони заповнені, а всі стани зони провідності – вільні. Однак реально графен завжди виявляє мінімальну провідність порядку  $4e^2/h$ . Природа цієї мінімальної провідності очевидно пов’язана з неідеальностями реального графену, проте точну теорію цього явища досі не побудовано.

У великих магнетних полях у графені спостерігається незвичайний (англ. *unconventional*) квантовий ефект Холла, при якому квантування холлівської провідності визначається співвідношенням:

$$\sigma_{xy} = \pm \frac{4e^2}{h} \left( n + \frac{1}{2} \right); \quad n = 0, 1, 2, \dots \quad (3)$$

Тут  $e$  – заряд електрона;  $h$  – стала Планка.

Нагадаємо, що формула для звичайного цілочисельного квантового ефекта Холла (за його відкриття Клаус фон Клітцинґ отримав Нобелівську премію з фізики 1985 року – адже людство отримало високоточний квантовий еталон опору, до якого входять лише дві світлові константи  $e$  та  $h$ !) для площин кремнію (де рівні Ландау чотириразово вироджені за енергією) відрізняється від (3) відсутністю доданку  $1/2$  в дужках.

Ціле число  $n$  і у випадку звичайного, і у випадку незвичайного квантового ефекта Холла показує, носії зі скількох саме заповнених рівнів Ландау, на які кантується в сильному магнетному полі електронний спектр, беруть участь у перенесенні струму (якщо рівень Фермі знаходиться між рівнями Ландау, то на залежності  $\sigma_{xy}$  від інтенсивності магнетного поля спостерігається плато, висота якого визначається (3)). Множник “4” є наслідком виродження рівнів Ландау: двічі за спіном, ще двічі за двома точками Дірака (у графені) чи за двома еквівалентними долинами (у площині кремнію {001}). Натомість доданок  $1/2$  у дужках є наслідком Діраківської природи електронів з нульовою ефективною масою у графені.

Ще однією видатною рисою графену є те, що цей моноатомний шар вуглецю можна побачити неозброєним оком – бо він поглинає майже 2,3 % випромінювання, що падає на нього! У праці [10] було показано (і теоретично, і експериментально), що коефіцієнт поглинання одноатомного шару графену  $A$  визначається виключно сталою тонкої структури  $\alpha$  (і не залежить від характеристик самого графену, як-от концентрації носіїв у ньому, сталої його ґратки тощо):

$$A = \pi \alpha = \frac{\pi e^2}{hc} \approx 0,023. \quad (4)$$





Коефіцієнт пропускання графену становить  $T = 1 - A \approx 0,98$ .

Два шари графену поглинають удвічі більше світла, три – втричі і т. д. Це й було експериментально підтверджено в [10].

Варто зазначити: у фізиці конденсованого середовища вкрай нечасто трапляється ситуація, коли певна характеристика середовища залежить не від інших характеристик цього ж середовища, а від фундаментальних констант. Є лише нечисленні винятки на кшталт кванта провідності в квантовому ефекті Холла чи кванта магнетного потоку через коло надпровідника.

Загалом висока прозорість графену (98 %) разом із його металічною поведінкою відкриває можливості для його використання в промисловості фотовольтаїчних сонячних елементів чи дисплеїв як прозорого металевого електрода (звичайні метали непрозорі).

Нарешті, варто зупинитися на ще одному вартовому уваги явищі у графені, а саме на парадоксі Клейна. Ми вже згадували, що носії у графені поблизу точок Дірака описуються тим самим гамільтоніаном Дірака, що описує й ультрарелятивістські частинки, наприклад, нейтрино. Для нейтрино існує величина, що називається спіральністю (або ж хіральністю) – проекція спіну на напрям руху, і ця величина зберігається. Хіральність має зберігатися і в графені.

Збереження хіральності призводить у квантовій механіці до явища, що називається парадоксом Клейна – ультрарелятивістській частинці легше подолати вищий потенціальний бар'єр! У графені парадокс Клейна виявляється в тому, що діраківський електрон проходить з ймовірністю одиниця будь-який потенціальний бар'єр (за умови нормального падіння; під час падіння під кутом існує ненульова ймовірність відбиття) [11]. Отже, носії в графені важко локалізувати – що в свою чергу є фактором підвищення їхньої рухливості.

### Можливі застосування

Через свої унікальні фізичні характеристики графен може стати ідеальним матеріалом для газових сенсорів. У праці [12] було показано, що приєднання навіть однієї молекули газу до поверхні мініатюрного сенсора мікронного розміру призводить до суттєвої зміни його електричного опору. Фізика явища полягає в тому, що різні молекули, приєднавшись до графенової поверхні, привносять до зонного спектра резонансні рівні (донорні або акцепторні; молекула  $\text{NO}_2$  є, наприклад, яскравим акцептором), на яких носії розсіюються. Невеличке підігрівання звільнює поверхню від адсорбованої молекули, і сенсор готовий до поновного використання. Нині на основі графену вже створено різні сенсори, серед них біосенсори для клітин і молекул ДНК.

Проте створення на основі графену польового транзистора наражається на труднощі принципового характеру. Відсутність у графені забороненої зони призводить до того, що за будь-яких прикладених до затвору напруг складно домогтися суттєвої зміни опору, потрібної для створення двох станів: провідного і непровідного, на яких ґрунтується двійкова логіка. Отже, проблемою є створити в графені заборонену зону такої ширини, щоб термічно збуджені носії при робочій температурі давали малий внесок у провідність.

Один із можливих способів полягає в створенні графенових нанострічок, де квантово-розмірні ефекти дають змогу отримати заборонену зону потрібної ширини (ширині стрічки в 20 нм відповідає заборонена зона, еквівалентна кімнатній температурі в енергетичних одиницях) [13]. Інший можливий підхід полягає в гідрогенізації поверхні графену й утворення так званого графану, в якому існує заборонена зона [14]. Перевагою підходу є те, що нанесення атомів водню в строго визначених місцях дає змогу отримати чергування областей з забороненою зоною і без неї, і може



стати прообразом промислових методів виготовлення нової графенової електроніки.

У лютому 2010 року фахівці IBM повідомили про створення польового транзистора на основі графену зі швидкодією в 100 ГГц, що перевищує швидкодію кремнієвого транзистора.

Іншими перспективними сферами застосування графену можуть стати створення електродів для іоністорів (суперконденсаторів) для використання їх як перезаряджуваних джерел струму, створення світлодіодів, а також спінтроніка.

### Висновки

Сьогодні важко з певністю сказати, чи реалізуються оптимістичні прогнози щодо появи упродовж ближчих двох років побутової електроніки на основі графену. Але вже можна з певністю сказати, що упродовж останніх років сформувалося нове інтердисциплінарне поле досліджень – фізика графену. Вона вже дала низку блискучих фундаментальних результатів, і тисячі людей в усьому світі працюють над можливими застосуваннями моноатомного вуглецю в електроніці.

Творець цієї фізики графену, Андрій Гейм, 2007 року був нагороджений престижною медаллю Мотта за “відкриття нового класу матеріалів”, 2008 року його (разом з Костянтином Новосьоловим) було вшановано Єврофізичною премією, у 2008 і 2009 роках його розглядали як одного з найреальніших кандидатів на Нобелівську премію з фізики.

Чи призведе фізика графену до революційних змін в електроніці, а чи залишиться полем академічних досліджень, нехай і дуже цікавих (як це сталося спершу з “токамаками” й керованим термоядерним синтезом, а згодом з високотемпературною надпровідністю) – покаже найближче майбутнє.

### Література

1. Novoselov K. S., Geim A.K., Morozov S.V., Jiang D., Zhang Y., Dubonos S.V., Grigorieva I.V.,

and Firsov A. A. *Electric Field Effect in Atomically Thin Carbon Films*// Science, 2004. – 306. – P. 666.

2. Geim A. *Graphene: Status and Prospects*// Science, 2009. – 324. – P. 1530.

3. Peres N. M. R. *Graphene, new physics in two dimensions*// Europhysics News, 2009. – 40. – P. 17.

4. Драгунов В. П., Неизвестный И. Г. *Наноструктуры: физика, технология, применения*. – Новосибирск: НГТУ, 2008.

5. Sukang Bae et al. *Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes*// Nature Nanotechnology, Published online: 20 June 2010.

6. Shioyama H. *Cleavage of graphite to graphene*// J. Mat. Sci. Lett., 2001. – 20. – P. 499.

7. Wallace P. R. *The Band Theory of Graphite*// Phys. Rev., 1947. – 71. – P. 622.

8. Castro Neto A. H., Guinea F., Peres N. M. R., Novoselov K. S. and Geim A. K. *The electronic properties of graphene*// Review of Modern Physics, 2009. – 81. – P. 109.

9. Novoselov K. S., Geim A. K., Morozov S. V., Jiang D., Katsnelson M. I., Grigorieva I. V., Dubonos S. V. and Firsov A. A. *Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene*// Nature, 2005. – 438. – P. 197.

10. Nair R. R., Blake P., Grigorenko A. N., Novoselov K. S., Brooth T. J., Stauber T, Peres N. M. R., and Geim A. K. *Fine Structure Constant Defines Visual Transparency of Graphene*// Science, 2008. – 320. – P. 5881.

11. Katsnelson M. I., Novoselov K. S., Geim A. K. *Chiral tunnelling and the Klein paradox in graphene*// Nature Physics, 2006. – 2. – P. 620.

12. Schedin F., Geim A. K., Morozov S.V., Hill E. W., Blake P., Katsnelson M. I., Novoselov K. S. *Detection of Individual Gas Molecules Absorbed on Graphene*// Nature Materials, 2007. – 6. – 652.

13. Chen Zh., Lin Y. M., Rooks M. J., Avouris P. *Graphene Nano-Ribbon Electronics*// Physica E., 2007. – 40. – P. 228.

14. D. C. Elias et al. *Control of Graphene's Properties by Reversible Hydrogenation: Evidence for Graphane*// Science, 2009. – 323. – 5914.



До 110-річчя від дня народження  
Олександра СМАКУЛИ

## ФІЗИК, ЩО ПОЄДНАВ ЄВРОПЕЙСЬКУ ФУНДАМЕНТАЛЬНІСТЬ

### 3

## АМЕРИКАНСЬКИМ ПРАГМАТИЗМОМ

Ярослав Довгий,

заслужений професор

Львівського національного університету імені Івана Франка

Дев'ятого вересня цього року виповнилося 110 років від дня народження славетного українського фізика, дійсного члена НТШ, професора Олександра Смакули (1900–1983), вченого, який своїми винаходами та відкриттями зумів поєднати європейський теоретичний підхід з американським технологічним стилем сучасної науки.

### 1. Про фізику експериментальну й теоретичну

Фізика є передовсім наукою експериментальною. Як відомо, експериментальний метод Галілея започаткував класичну фізику. Нині кожен професор вищої школи знає, що без постановки демонстраційних дослідів викладання фізики (і загального курсу, і окремих спеціальних курсів) не можна вважати повноцінним.

Експеримент у фізиці – це запрограмоване відтворення певного явища з вимірюванням параметрів явища та визначенням відповідних функціональних залежностей або закономірностей.

Як розуміти вислів “визначення закономірностей”? Насамперед – це первісне експериментальне виявлення параметричних залежностей, що адекватно описують явище, себто відкриття фізичного закону чи емпірич-

ного правила. Окрім того, це також може бути перевірка (підтвердження або спростування) теоретично передбачуваної закономірності, моделі.

То що ж тоді первинне – експеримент чи теорія?

Запитання, звісно, на кшталт – “курка чи яйце?”...

Загальноновизнано, що теоретична фізика (і класична, основоположні засади якої були закладені Ньютоном і Кеплером як принципи аналітичної теоретичної механіки, і модерна теоретична фізика з її основними теоріями – квантовою механікою і теорією відносності) є базою наукового світобачення або, як кажуть, наукової картини світу.

Поділ фізики на експериментальну і теоретичну став звичним до такої міри, що він впливає на формування структур відповідних академічних інститутів, університетських кафедр, на напрями підготовки фахівців та політику комплектування наукових кадрів.

### 2. Технології – новий аспект експериментальної фізики

Метою цієї статті є висвітлення нової, дещо затіненої грані у погляді на експериментальну фізику, а саме, сучасного акцентування її *технологічних* аспектів. Можливо,





за деякий час це спричиниться й до зміни парадигми...

Одним із фундаторів технологічного напрямку експериментальної фізики був славетний український фізик Олександр Смакула [1].

Що таке “технологія”?

Мовознавці цей термін витлумачують як “сукупність способів переробки матеріалів, виготовлення виробів і процеси, що супроводять ці види робіт”.

Нині вельми актуальними є т. зв. високі технології, нанотехнології, комп’ютерні технології тощо [2]. Ключовим словом усякої технології є “ноу-гау” (“знаю, як”), тобто знання всіх тонкощів процесів, що забезпечують її реалізацію. Звичайно, у цьому розумінні можна говорити й про технологію постановки демонстраційного експерименту, будь-якого оригінального фізичного досліду. Але тут доречнішим буде вживати термін “методика”, оскільки він є твердо усталеним у науковій та методичній літературі.

Найголовніше у технологіях – одержання матеріалів та виробів з наперед заданими, очікуваними властивостями.

Отже, технології – це:

1. Цілеспрямоване керування властивостями матеріалів, функціональних елементів та пристроїв;

2. Програма та засоби реалізації відповідних процесів.

Одна річ – висунути нову фізико-технічну ідею, інша – забезпечити їхнє технологічне втілення. Якби О. Смакула 1935 року лише обнародував ідею просвітлення оптики, а не запропонував та не продемонстрував на фірмі “Цайс-Єна” технологію просвітлення фотографічних об’єктивів, то хто знає, чи його патент знайшов би світове визнання.

Афоризм “Пануватиме той, хто володіє інформацією” належить доповнити: “і техно-

логіями”. Бо, окрім технологічного алгоритму (інформації), потрібні засоби реалізації запрограмованих процесів. У сучасних високих технологіях це дуже складне, автоматизоване і високоточне обладнання, яке доступне небагатьом. Недарма відомий польський письменник Станіслав Лем (до речі, уродженець Львова та гімназійний учень професора Мирона Зарицького) одну із найцікавіших своїх футурологічних книжок (1964) щодо майбутньої ролі кібернетики і космонавтики так і назвав – “Сума технологій”...

### 3. Хто перший запатентував спосіб просвітлення оптики?

Потреба просвітлення оптики (або підвищення прозорості оптичних об’єктів, призм чи вікон за рахунок зменшення відбивної здатності оптичних поверхонь) зумовлена двома причинами. По-перше, якщо оптична система складається з елементів з високими показниками заломлення або ж якщо кількість елементів велика, втрати світла через відбивання можуть стати надто великими (понад 80 %). По-друге, в результаті багатократних відбивань на фотоприймач попадатиме дифузний світловий потік (дифузне тло), що призведе до зменшення контрасту та чіткості зображення.

Майже сторіччя після винайдення фотографії (1840) на ці обставини не звертали увагу, оскільки фотооб’єктиви були однолінзові або не вельми складні.

Перший патент на спосіб виготовлення просвітленої оптики одержав Олександр Смакула.

Спосіб просвітлення оптики, який розробив О. Смакула, було запатентовано 1 листопада 1935 року [3]. Хоч патент понад рік був засекречений [4], пріоритет О. Смакули загально визнаний [5, 6].



REICHSPATENTAMT  
PATENTSCHRIFT

№ 685767  
KLASSE 42h GRUPPE 1a1  
Z 22836 IX/42h

Firma Carl Zeiss in Jena

Verfahren zur Erhöhung der Lichtdurchlässigkeit optischer Teile durch Erniedrigung des Brechungsindex an den Grenzflächen dieser optischen Teile

Patentiert im Deutschen Reich vom 1. November 1915 ab  
Patenterteilung bekanntgemacht am 30. November 1919

An jeder Grenze zwischen zwei Medien, deren Brechungsindizes verschieden sind, tritt eine Reflexion des Lichtes auf. Das vom ersten in das zweite Medium einfallende Licht wird hierbei in einem das zweite Medium durchsetzenden und in einem an der Grenzfläche der beiden Medien reflektierten Anteil aufgespalten. Das Verhältnis des reflektierten Lichtes zum gesamten einfallenden Licht  $T$  nennt man den Reflexionsfaktor  $R$ . Das durchgelassene Licht ist dann

$$T = T \cdot (1 - R). \quad (1)$$

Um die Schwächung des einfallenden Lichtstrahles um den reflektierten Lichtanteil möglichst zu verringern, um die Differenz  $1 - R$  nicht zu klein werden zu lassen, sollte also der reflektierte Lichtanteil  $R$  so klein wie möglich sein. Bei senkrechtem Strahleneinfall, bei welchem unter sonst gleichen Bedingungen der Reflexionsfaktor ein Minimum erreicht, gilt für  $R$  die Formel von Fresnel:

$$R = \left( \frac{n - 1}{n + 1} \right)^2 \quad (2)$$

worin  $n$  der Brechungsindex des dichteren Mediums ist. Diese Formel gilt sowohl für den Strahlengang aus Luft (oder Vakuum) in das dichtere Medium als auch für den umgekehrten Strahlengang.

Da nun Reflexion nicht nur an der Vorderfläche, sondern mit dem gleichen Betrag auch an der Rückfläche jeder Linse eintritt, da ferner kompliziertere optische Instrumente oft aus einer großen Zahl reflektierender Einzelteile zusammengesetzt sind, kann die durch Reflexion verursachte Schwächung des einfallenden Lichtstrahles beträchtliche Werte erreichen und mehr als 50% betragen. Abgesehen von der Schwächung des einfallenden Lichtes um den Betrag des reflektierten Lichtes kann dieses reflektierte Licht aber auch unerwünschtes Licht zum regulären Strahlungsverlauf des Instrumentes hinzubringen. In photographischen Apparaten kann z. B. das reflektierte und wieder zurückreflektierte Licht Verwackelungen des Negatives verursachen.

Taylor, britische Patentschrift 20561, 1904, hat nun, veranlaßt durch die zufällige Beobachtung an alten Linsen mit teilweise verwitterter Oberfläche, welche in der Durchsicht gegen einen hellen Hintergrund an den verwitterten Stellen lichtdurchlässiger erschienen als an den gut erhaltenen Stellen der polierten Flächen, bereits darauf hingewiesen, daß man durch Veränderungen im Material der Oberflächenschicht einer Linse eine erhöhte Lichtdurchlässigkeit erreichen kann, und hat durch Anführung der Fresnel'schen

Титульна сторінка патенту О.Смакули

4. Технологія просвітлення оптики

Процес виготовлення просвітленої оптики зводиться до програмованого нанесення тонкоплівкових просвітлюючих покриттів. Серед розмаїття методів нанесення плівок, найголовніший – термічне напилення у високому вакуумі. Останнім часом застосовують також технології лазерного напилення. Покриття виходять довговічні й високоефективні.

Домогтися ахроматичного просвітлення, тобто просвітлення в широкій ділянці спектра, та ще й за умови різних кутів падіння світлових променів – це складна багатопараметрична задача. Адже для цього потрібні багаточислові тонкоплівкові покриття з нанесенням шарів змінної товщини. Олександр Смакула розробив технологію та апаратуру для



одержання таких багатошаровиків за умови, що в процесі нанесення шарів товщину плівок можна регулювати від центра до країв оптичної деталі за будь-якої бажаної закономірності [7].

Загалом, проблема синтезу просвітлювальних покриттів зводиться до мінімізації функціоналу  $F$ , який для діапазону хвильових чисел  $[k_1, k_2]$  у випадку падіння світла на оптичну поверхню під довільним кутом  $\gamma$  має вигляд:

$$F = \int_{k_1}^{k_2} \{ \beta R_s[k, \gamma, n(x)] + (1 - \beta) R_p[k, \gamma, n(x)] \} dk \quad (1)$$

де  $\beta = \sin^2 \alpha$ ;  $\alpha$  – кут між площиною падіння та площиною поляризації;  $R_s$  і  $R_p$  – френелеві енергетичні коефіцієнти відбивання для  $s$ - і  $p$ -поляризованих хвиль;  $n(x)$  – функція розподілу показника заломлення по нормалі до поверхні просвітлення (т. зв. профільна функція);  $k = 2\pi/\lambda$ .

На рис. 1 і 2 зображено результати комп'ютерних обчислень коефіцієнтів відбивання  $R(\lambda)$ .

$$R(\lambda) = \beta R_s + (1 - \beta) R_p \quad (2)$$

для довільної поляризації [8].

Як бачимо, зміна структури багатошарового тонкоплівкового покриття суттєво впливає на спектри відбивання  $R(\lambda)$  та пропускання  $T(\lambda) = 1 - R(\lambda)$ . У випадку рис. 1 функціонал (1) мінімізований у широкому діапазоні спектра (ахроматичне просвітлення), тоді як композиція, яку характеризує рис. 2, для просвітлення менш придатна.

Із поданого вище легко зрозуміти також (рис. 1 і 2), чому візуально просвітлені об'єкти у відбитому світлі характеризуються фіолетовим відтінком.

Для найпростішого випадку одношарового покриття під час нормального падіння моно-

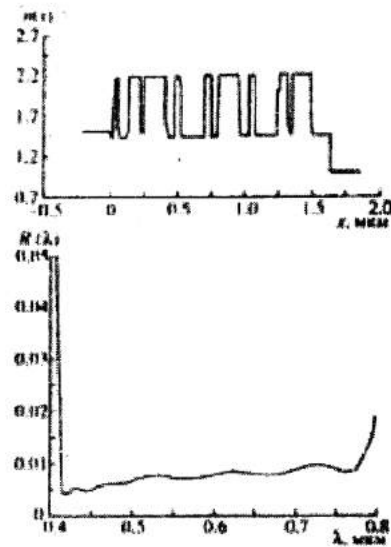


Рис. 1. Профіль показника заломлення  $n(x)$  і спектр відбивання  $R(\lambda)$  для багатошарового покриття при  $\gamma = 45^\circ$ ,  $n_{\min} = 1,45$ ,  $n_{\max} = 2,20$  та  $n_0 = 1,52$

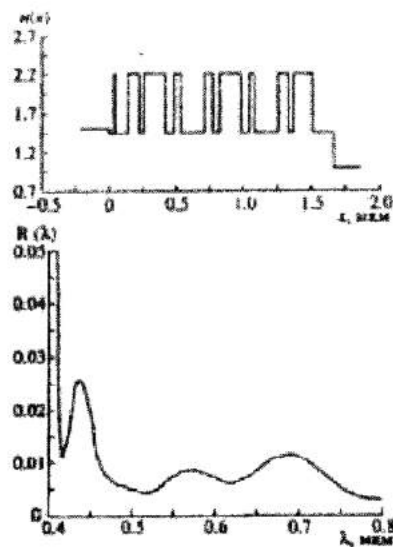


Рис. 2. Зміна спектра відбивання за іншого профілю  $n(x)$  і попередніх параметрах





хроматичного світла мінімізація відбивної здатності, як вперше показав О. Смакула [3], пов'язана з виконанням двох фізичних вимог:

а) фазова умова:

$$nd = \frac{\lambda}{4}(2m + 1), \quad (3)$$

де  $n$  і  $d$  – показник заломлення і товщина плівки;  $m = 0, 1, 2, 3, \dots$

б) умова амплітуд:

$$n = \sqrt{n_0}, \quad (4)$$

де  $n_0$  – показник заломлення підкладки (оптичної деталі).

Щоб добитися мінімального відбивання променів, які падають на поверхню під прямим кутом, плівка мусить мати у всіх місцях однакову товщину. Якщо ж світловий промінь падає на поверхню не під прямим кутом, мінімальне відбивання досягається тільки у випадку неоднакової товщини нанесеної плівки. У цьому випадку рівняння (3) переходить у рівняння [7]

$$d = \frac{\lambda}{4}(2m + 1) \frac{1}{\sqrt{n^2 - \sin^2 \varphi}}, \quad (5)$$

де  $\varphi$  – змінний кут падіння світлового променя.

О. Смакула писав [4]: “Перехід від винаходу до конвеєрного виробництва вимагав розв’язання різних проблем, які були подолані за відносно короткий час, так що конвеєрне виробництво змогло розпочатися ще 1936 року. Одним з найважливіших чинників був підбір матеріалу. Вже попередні дослідження показали, що поряд із показником заломлення суттєвий вплив на зменшення відбивання має товщина шару і що йдеться про явище інтерференції. Дотримання товщини шару досягається шляхом випаровування певної кількості речовини в таких заздалегідь експериментально знайдених умовах, як рівень вакууму, швид-

кість випаровування, віддаль між джерелом випаровування і поверхнею скла, а також температура поверхні скла. Безпосередній контроль за виготовленими плівками здійснюють шляхом візуального порівняння кольору світла, відбитого від плівки та від еталонних скляних зразків. Рівномірність товщини шару на всій оптичній поверхні досягається шляхом особливого розміщення просвітлюваних оптичних елементів відносно випарників. Відхилення становило в більшості випадків декілька відсотків. Особливих зусиль вимагають малі, сильно випуклі поверхні лінз мікроскопів.

Для серійного виробництва елементів з просвітленою оптикою треба було розробити високопродуктивне обладнання, яке було б простим в експлуатації, але працювало б надійно і швидко. Були сконструйовані подвійні вакуумні установки, два скляні ковпаки яких були вміщені в одній відкачній системі. У той час, коли один скляний ковпак відкачується, інший може наповнюватися оптичними елементами. Цією установкою можна було здійснювати щопівгодини нове нанесення плівок.

На підставі цих результатів Цайс отримав патент № 685767 від 1 листопада 1935 року. Моє прізвище не було названо, тому що відповідно до тодішнього закону про патенти фірма не мала права називати прізвище винахідника. З військових міркувань патент тримали у таємниці. Лише 1938 року, після публікації Картврігта і Тарнера [9], заборону на публікацію патента було знято”.

Винаходи і розробки професора О. Смакули з просвітлення оптики увійшли в історію фізики. Це золота сторінка в історії фотографічної, кінематографічної та іншої відеотехніки. Цей здобуток нашого вченого відносять до найважливіших винаходів ХХ століття поряд з винаходами транзистора, лазера, інтегральної схеми.



### 5. Заслужена слава винахідника

У листі до брата Андрія, датованому 19 вересня 1966 року, О. Смакула писав: "На 26 вересня я лечу з жінкою до Німеччини. Там запросили мене; дадуть мені культурну премію за мої наукові праці. Буде там наукова конференція фотографічного товариства та інтернаціональна виставка фотографічних і кінових апаратів. Там буде телевізійна передача і всякі промови, де будуть славити мої заслуги для науки. Як вернусь звідти, то напишу Тобі більше як там було".

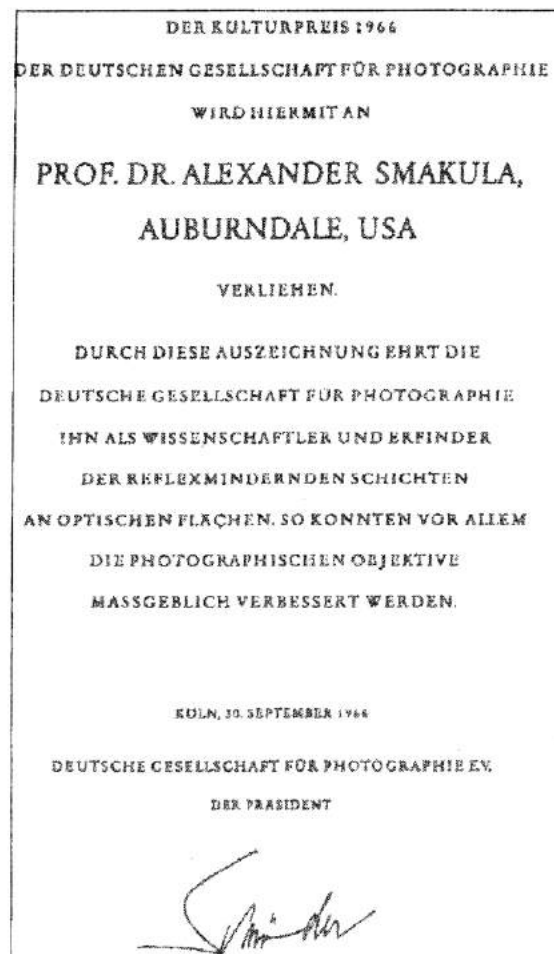
Нагороду Німецького фотографічного товариства Олександрові Смакулі в м. Кельні вручав тодішній міністр закордонних справ ФРН п. Герхард Шредер. Було це дня 30 вересня 1966 року. У дипломі було написано:

"Цією відзнакою Німецьке фотографічне товариство вшановує проф., д-ра Олександра Смакулу (США) як науковця і винахідника способу просвітлення оптики, завдяки якому вдалося покращити характеристики фотографічних об'єктивів".

Після повернення, у листі від 19 жовтня 1966 року вчений ділиться з родиною у Доброводах враженнями від щойно здійсненого турне в Європу:

"...Тому кілька днів ми вернули з Німеччини. Були ми там несповна три тижні. Величали там мене, радіо передавало вістки про мої наукові досягнення, навіть була телевізія. Дали мені нагороду, погостили таки добре й багато часописей подало різні статті про мене, а то й знімки були. А я зі свої сторони мусів дати декілька доповідей і висловити подяку... І так час минув досить приємно, а тепер знова треба братися до праці, а її в мене доволі..."

29 травня 1968 р. американське Товариство журнальних фотографій також відзначило заслуги О. Смакули.



*Почесний диплом від Німецького фотографічного товариства, що його одержав О. Смакула 1966 року*

### 6. Патенти проф. О. Смакули

Патенти на винаходи проф. О. Смакули зареєстровані у десятках країн світу. Ось декілька прикладів, одержаних недавно з мережі Інтернет (табл. 1).

Проанотуємо деякі первинні патенти О. Смакули (табл. 2).



Таблиця 1.

| КРАЇНА     | Патент №                                | КРАЇНА    | Патент №         |
|------------|---|-----------|------------------|
| Данія      | 58874<br>59467                          | Норвегія  | 64259<br>65043   |
| Іспанія    | 147700<br>147901<br>147902              | Угорщина  | 124425<br>125289 |
| Італія     | 381514<br>386241                        | Швейцарія | 213946<br>217282 |
| Нідерланди | 53154                                   | Швеція    | 103060           |
| Німеччина  | 685767<br>883063 *<br>6731**<br>939604* | Японія    | 140766           |

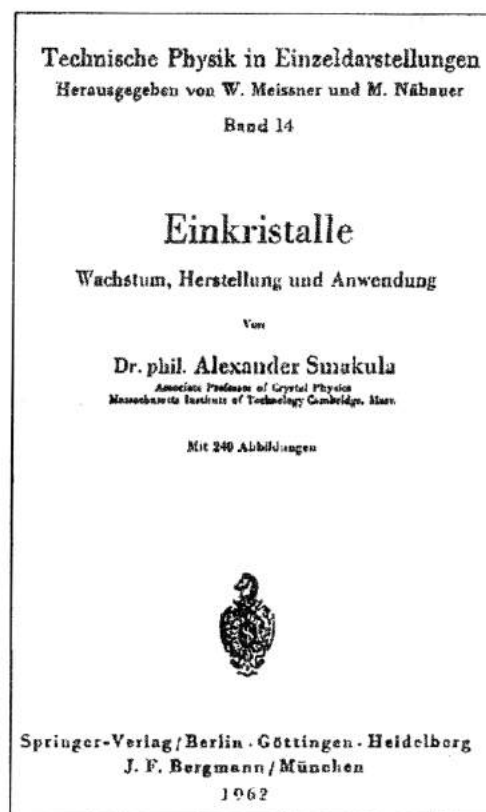
\* – патенти ФРН;

\*\* – патет НДР

### 7. Комерційні монокристали лабораторії Олександра Смакули. Американський стиль: наука і бізнес

Те, що прийнято іменувати “американським стилем” в організації науки, використовуючи звичну нині термінологію, можна назвати організацією науки в умовах ринкових відносин. Ось одна із типових схем поведінки за таких умов: автор нового винаходу або нової технології засновує свою фірму, налагоджує мережу ділових контактів і здійснює наукову рекламу (конференції, виставки тощо), знаходить зацікавлених інвесторів і залучає висококласних фахівців (зокрема у міжнародному масштабі)... Прикладів знаємо чимало: лазерні, комп’ютерні фірми.

У фізиці твердого тіла одним з основоположників нового стилю, що включає тісну співпрацю технологів, експериментаторів, теоретиків, інженерів-конструкторів, був професор Массачусетського технологічного інституту Олександр Смакула. Маючи глибоку фундаментальну підготовку (європейська школа),



Титульна сторінка монографії О. Смакули





Таблиця 2.

Анотації деяких первинних патентів О. Смакули, зареєстрованих у Німеччині

| Патент № | Дата реєстрації | Назва патента  | Анотація  |
|----------|-----------------|--|---|
| 685767   | 1.XI.1935       | Verfahren zur Erhöhung der Lichtdurchlässigkeit optischer Teile durch Erniedrigung des Brechindexexponenten an den Grenzflächen dieser optischen Teile.<br>Спосіб підвищення пропускання світла оптичними елементами за рахунок зменшення відбивної здатності на межах розділу цих оптичних елементів. | Зменшення втрат світла, зумовлених його відбиванням на межі розділу двох середовищ методом нанесення тонких просвітлюючих шарів товщиною $\frac{1}{4}$ довжини хвилі, а також спосіб одержання цих покриттів.   |
| 883063   | 31.VIII.1953    | Verfahren zur Veränderung der Reflexion von Körpern aus organischem Kunststoff.<br>Спосіб зміни відбивної здатності предметів з органічних матеріалів.   | Для підвищення відбивної здатності предмет підключають у вигляді анода і піддають дії тліючого розряду. Для зменшення відбивної здатності на шар з високою відбивною здатністю наносять шар речовини з нижчою відбивною здатністю, ніж має шар, що піддавався дії розряду, напр., шар $MgF_2$ .   |
| 6731     | 4.III.1954      | Auf einen optischen Körper aufzubringende Schicht.<br>Нанесення поверхнього шару на оптичне скло.  | Для зміни фізичних властивостей оптичного скла на нього наносяться декілька (звичайно два) шари з близькими показниками заломлення. Застосовують, напр., $MgF_2$ ( $n = 1,38$ ) і $LiF_2$ ( $n = 1,39$ ). Шар товщиною 1 мкм кожної з цих речовин зокрема одержується мутним, та якщо наносити поперемінно 5 шарів першої речовини і 5 шарів другої (по 0,1 мкм), то одержимо прозорий шар 1 мкм. Можна застосовувати також криоліт ( $n = 1,34$ ) з $MgF_2$ або $LiF_2$ з $CaF_2$ ( $n = 1,43$ ), а також $ZnS$ ( $n=2,4$ ) з $TiO_2$ ( $n=2,5$ ).   |
| 939604   | 23.II.1956      | Verfahren zur Erzeugung einer die Reflexion vermindernenden Schicht auf der Oberfläche eines optischen Elementes und Gerät zur Ausübung des Verfahrens.<br>Спосіб і апаратура для виготовлення плівки, що зменшує відбивання на поверхні оптичної деталі.  | Спосіб і апаратура для нанесення методом випаровування у вакуумі на поверхні оптичної деталі плівки, яка зменшує відбивання. Товщину при нанесенні можна регулювати від центра до країв деталі за будь-якої бажаної закономірності. Подається схема апаратури, яка складається з відкачаного скляного ковпака, у верхній частині якого міститься тримач оброблюваної оптичної деталі, а в нижній частині розміщуються на спеціальній підставці нагрівники та комірки у вигляді вольфрамових чашечок для випаровуваної речовини. Вказаний тримач обертається навколо оптичної осі, а комірки разом з підставкою можуть переміщуватися уздовж цієї осі вгору і вниз. Змінюючи відстань комірок з випаровуваною речовиною від поверхні обертової деталі, можна в процесі випаровування дістати на оброблюваній поверхні плівку, товщина якої змінюватиметься від центра до країв лінзи за будь-яким довільним законом, необхідним для одержання мінімального відбивання. |



*Професор Олександр СМАКУЛА.  
Лабораторія фізики кристалів  
Массачусетського технологічного  
інституту (США, 1966)*

він одним з перших у США налагодив технологію комерційних синтетичних монокристалів для електронної техніки (напівпровідникова електроніка, мікроелектроніка, мазерна та лазерна техніка). Широке уявлення про рівень цієї технології дає монографія О. Смакули [10]. Про характер ділових контактів із замовниками можна судити з чисельних технічних звітів лабораторії О. Смакули, а також на підставі опублікованих ними оглядових статей.

Про технологію яких матеріалів йде мова? Це найперше оптичні матеріали (кристали, нові скла, пресовані композиції, тонкі плівки [11, 12]), низка напівпровідникових кристалів, передовсім, кремнію. Окремо потрібно сказати про матеріали для інфрачервоної техніки, електрооптичні кристали, катодохромні матеріали тощо [13]. Цікаво зазначити, що деякі монокристали, синтезовані у спеціальних

умовах, за своєю комерційною вартістю набагато перевищують такі матеріали як золото і платина.

Лабораторія з фізики кристалів, яку заснував у Массачусетському технологічному інституті Олександр Смакула, стала зародком своєрідного інноваційного центра. Потреби виготовлення кремнієвих інтегральних схем і мікропроцесорної техніки вимагали об'єднання зусиль науковців, інженерів і технологів. Це спонукало до створення технопарків.

Технопарки або технополіси як комплексні науково-дослідні та інженерно-технологічні структури, що об'єднують науково-дослідні інститути, вищі заклади освіти і промислові підприємства, – це витвір якраз середини ХХ ст., коли успіхи твердотільної електроніки дали початок високим, науковмістким технологіям і по суті зумовили перехід найрозвиненіших країн від індустріального до постіндустріального етапів із все виразнішим виявом прикмет глобалізації у різних сферах буття. Нині у світі вже налічується понад 400 технопарків. Серед них широко відомі технопарки “Кремнієва долина” (США) і “Кремнієвий острів” на о. Кюсю в Японії, які завоювали ключові позиції на ринку комп'ютерних технологій. Їхні обсяги виробництва і прибутків досягли масштабів  $10^{10}$  доларів щорічно.

На завершення хочеться з приємністю констатувати, що останніми роками досвід О. Смакули успішно переймають й українські фізики у власній державі. Як приклад можна згадати Харківський концерн “Інститут монокристалів” НАН України, де налагоджено синтез високоякісних і конкурентноздатних комерційних монокристалів з вигідними параметрами для таких пристроїв як томографи, установки інтроскопії, приймачів випромінювання різних енергетичних діапазонів та ін.

Щодо технопарків, то в Україні вони почали формуватися лише недавно. Розробляється відповідне законодавче підґрунтя. Один з пер-



ших українських технопарків виник у Харкові якраз на базі концерну “Інститут монокристалів”. У столиці нашої держави функції технопарку вже десятки років виконує науково-виробничий комплекс під назвою “Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона”. На базі Інституту фізики напівпровідників НАН України створюється технопарк з напівпровідникових технологій і матеріалів, оптоелектроніки і сенсорної техніки. Цей технопарк береться за розроблення і доведення до серійного виробництва приладів для радіаційного та екологічного моніторингу довкілля, біосенсорних систем, лазерів інфрачервоного та зеленого випромінювання, світлодіодних світлофорів, оптронів, мікролазерів тощо.

Є ще одна галузь – молекулярна біологія та біофізика, де досвід О. Смакули важко переоцінити (наприклад, відкриття деяких важливих вітамінів). Але це тема окремої розмови.

Праці О. Смакули у перекладі українською мовою публікував “Вісник Фонду О. Смакули”, що видається в Тернополі, а до 100-річного ювілею вченого започатковано видання його “Наукових праць” у 3-х томах. Наразі вишло два томи [14, 15].

## Література

1. Довгий Я. Наукова школа професора Смакули/ Фіз. зб. НТШ, 1996. – Т. 2. – С. 148–157.
2. Довгий Я. Актуальні проблеми фізики/ Вісник Львівського університету. Серія фізична. 1993. – Вип. 26. – С. 25–28.
3. Smakula A. Verfahren zur Erhöhung der Lichtdurchlässigkeit optischer Teile durch Erniedrigung des Brechungsindex an den Grenzflächen dieser optischen Teile. Patentschrift № 685767, Klasse 42h, Gruppe 1<sub>01</sub>.
4. Smakula A. Über die Erfindung der Reflexminderung. – Kinotechnik, 1967. – Bd. 21, N 2.
5. Переклад українською мовою. Вісник Фонду О. Смакули, 1998. – № 2 (4). – 14 с. (Переклад і наукова редакція Михайла Медюха).
5. Физика тонких пленок. Том 2. – М.: Мир, 1967. – С. 186–253.
6. Біланюк О. Противідбивний шар: дарунок Олександра Смакули людству/ Фіз. зб. НТШ, 1996. – Т. 2. – С. 21–34.
7. Smakula A. Verfahren zur Erzeugung einer die Reflexion vermindern-dernden Schicht auf der Oberfläche eines optischen Elementes und Gerät zur Ausübung des Verfahrens. Patent a 939604.
8. Попов К. В., Тихонравов А. В. Синтез просветляющих покрытий для работы в широких спектральных и угловых диапазонах/ Оптика и спектроскопия, 1996. – Т. 80, № 6. – С. 1031.
9. Cartwright C. H., Turner A. F. Bull/ Amer. Phys. Soc., 1938. – Vol. 13. – P. 10.
10. Smakula A. Einkristalle. Wachstum, Herstellung und Anwendung. – Springer-Verlag, Berlin-Göttingen-Heidelberg, 1962. – 431 s.
11. Smakula A. Synthetic crystals and polarising materials/ Optica Acta, 1962. – Vol. 9, № 3. – S. 205.
12. Smakula A., Kalnajs J., Redman J. Optical materials and their preparation/ Applied Optics, 1964. – Vol. 3, № 3. – P. 323. Переклад українською мовою: Вісник фонду О. Смакули, 1998, № 1(3)б. 9. (Переклад Анатолія Кушніра, наукова редакція Андрія Пундика).
13. Epstein D. J., Smakula A., Warde C. Crystal physics and optical electronics research./ Res. Nat. Annu. Rep., 1977. Cambridge, Mass. 86.
14. Олександр Смакула. Наукові праці. Видання у 3-х томах. Том 1. – Тернопіль: Фонд Олександра Смакули, 2000. 404 с.
15. Олександр Смакула. Монокристали: виробництва, виготовлення та застосування. Переклад з німецької. – К.: Рада, 2000. 428 с.





До 80-річчя від дня народження  
радіофізика Мирона Плетінки

## ЕПІЗОД В ІСТОРІЇ ФІЗИКИ І ДОЛЯ ЛЮДИНИ

Ярослав Довгий,

Львівський національний університет імені Івана Франка



Радіофізик  
Мирон Плетінка  
(16.IX.1930–18.XII.1976)

**Р**адіофізика, яка вже упродовж сторіччя позиціонує себе як окрема потужна наукова галузь, є все-таки “донькою” класичної електродинаміки а, отже, є галуззю фізики. Доля талановитого науковця-радіофізика Мирона Плетінки є настільки показовою і повчальною, що вона не може пройти повз увагу нас, фізиків. Цьогоріч йому виповнилося б 80 років від дня народження.

Річ ось у чому. Вже у Першій світовій війні застосування авіації було б неможливим без

радіозв'язку. У 30-х роках минулого століття нагальна потреба удосконалення радіопристроїв і антен диктувалася не лише вимогами військовиків, а й на побутовому рівні. Вміти сконструювати найпростіший ламповий радіоприймач, а тим паче радіопередавач – це було дуже цікаво й престижно. Молодь прагнула опанувати цей фах. У Галичині така спеціалізація була у Львівській політехніці. Хоч відомі дискримінаційні квоти польської влади не допускали українців до навчання у вишах, все ж одиниці домагалися свого завдяки талантові й винятковій настирності. У Львівському університеті таким був фізик Василь Міліянчук, у Львівській політехніці – радіофізик Юрій Величко.

Професор Ю. Величко був такий популярний серед технічної молоді, як проф. Мар'ян Панчишин у царині медицини.

Ю. Величко заснував, по суті, наукову школу з радіотехніки і радіофізики.

Після Другої світової війни для радіофізики і радіотехніки настав новий етап у зв'язку з розвитком таких нових напрямів, як радіолокація і телебачення, радіорелейні лінії зв'язку і телеуправління, радіоспектроскопія, космічний зв'язок тощо. Все це вимагало переходу на коротші довжини хвиль, оскільки зі зменшенням  $\lambda$  суттєво зростає обсяг передаваної інформації, зростає напрямленість радіозв'язку, а звідси й дальність цього зв'язку



за тієї ж потужності передавача, зменшуються розміри антенних пристроїв, що має неабияке практичне значення, нарешті, зменшується вплив зовнішніх завад (промислових, атмосферних та взаємних). У наш час кожен переконується в цьому, використовуючи мобільні телефони.

Звуження діаграми напрямленості в радіолокаторах уможливорює збільшення локаційних відстаней, підвищення точності визначення кутових координат і збільшення роздільної здатності.

Якщо у перші роки війни радіолокатори, що працювали на метрових хвилях, були малоефективними, то вже наприкінці війни були розроблені радари сантиметрового діапазону. З настанням космічної ери потреби телекомунікацій вимагали переходу до ще менших  $\lambda$ . Для цього розроблялися удосконалені магнетрони і клістри, інша потрібна апаратура. Саме цим і займався науковець Мирон Плетінка. Як це було?

Мирон Плетінка 1951 року закінчив з відзнакою електротехнічний факультет Львівської політехнічного інституту (ЛПІ), 1953 року вступив до аспірантури до проф. С. Тетельбаума у Київський політехнічний інститут (КПІ). Членкор АН УРСР Семен Тетельбаум (1910–1958) був відомим фахівцем у царині радіолокації. Кандидатську дисертацію М. Плетінка захистив у червні 1957 року на спеціалізованій вченій раді КПІ. Тема дисертації якраз стосувалася розроблення високостабільних генераторів НВЧ. На той час (1950-і роки) такі дослідження засекречувалися, тож тема була, як тоді казали, “закритою”. Повернувшись до Львова, він на кафедрі конструювання і виробництва радіоапаратури в ЛПІ успішно розвинув цей напрям досліджень та розробок, залучаючи здібних студентів та молодих співпрацівників. За 1956–1966 роки він опублікував 34 наукові праці, виступав на багатьох конференціях, виконав декілька важливих завдань

за договірною тематикою. Будучи доцентом кафедри, він з 1965 року очолив нову наукову лабораторію (НДЛ-16), що спеціалізувалася на проблематиці НВЧ-техніки та вимірюваннях параметрів феритів. Колектив лабораторії набув високого авторитету в інституті та поза його межами. Про це свідчать експертні оцінки та численні відгуки. Формується нова наукова школа ЛПІ. Доцент М. Плетінка завершує докторську дисертацію. Вона стосується нових підходів щодо стабілізації параметрів (найперше – частот) НВЧ-генераторів. Тема дисертації: “Стабілізація частоти надвисокочастотних генераторів методами автоматичного підстроювання”. Йдеться про розроблений і сконструйований трисантиметровий ( $\lambda_{\text{вч}} = 3$  см) високостабільний НВЧ-генератор (ВГ-3) з флуктуаціями частоти  $< 10^{-9}$ , що працює у безперервному режимі, й занесений до державного реєстру.

Про доцента М. К. Плетінку як педагога студенти відгукувалися так: “Він – один з найвимогливіших викладачів факультету. Однак на екзаменах створював доброзичливу атмосферу, був завжди справедливим і ображених на нього, зазвичай, не було.”

Про різнобічні уподобання, патріотизм, душевність і християнську моральність, про шкільні роки, сім'ю та предків Мирона Плетінки розповів мені його син – шановний п. Юрій. Я ж хочу акцентувати на одному: це був високоталановитий дослідник, одержимий наукою. Він поєднував талант вченого у наймодернішій галузі радіофізики (НВЧ-радіофізиці і радіотехніці) і хист педагога вищої школи. Він створював наукову школу. Годі й уявити, щоб таким людям хтось міг би чинити зло...

Тепер переходимо до іншого сюжету.

Кирило Плетінка, батько Мирона, працював до війни у відомому львів'янам страховому товаристві “Дністер”, одним із засновників якого був адвокат, колишній голова уряду



ЗУНР, почесний член НТШ, д-р Кость Левицький, іменем якого нині названа одна з вулиць нашого міста. Сім'я Плетінків мешкала на вул. Мучній. Це було по сусідству з будинком, де мешкала сім'я К. Левицького. Стосунки були дружні. У нелегкі часи Левицькі підтримували Плетінків. Тож людська приязнь і добра пам'ять збереглися надовго. За нашою гарною християнською традицією п. Мирон завше 1 листопада відвідував могилу К. Левицького на Янівському цвинтарі. Покладав квіти і на могилу генерала Мирона Тарнавського. І ось, 1 листопада 1967 року "обсерватори" зазнимкували це... І завітлася дияволяда тоталітарного режиму. Талановитого вченого за наперед підготовленим рішенням ради факультету було звільнено з інституту. Перекреслено всі надбання, сплюндровано людську долю вченого. У 1976 році науковець М. Плетінка помер, маючи лише 46 років...

Нині, коли на 20-ому році Незалежності підступні сили прагнуть реваншу, мусимо пам'ятати, як тоталітарний режим знущався не лише над науковцями гуманітарної сфери, а й над фізиками.

Висловлю подяку п. Юрію Плетінці, синові Мирона Кириловича, який піклується тим, щоб внесок батька в українську науку не загубився і щоб добра пам'ять про нього була збережена. Фізична комісія НТШ вважає своїм обов'язком сприяти поверненню доброго імені в науці.

Відаючи належне науковим здобуткам Мирона Плетінки, я у контексті цієї проблематики мушу зазначити, що розробки нових НВЧ-генераторів привели фізиків до винайдення мазерів, а далі до епохи квантової електроніки. Річ ось у чому. Фізики, домагаючись зменшення  $\lambda$  та збільшення стабільності генераторів і підсилювачів сантиметрових та міліметрових довжин хвиль, зіткнулись з нездо-

ланними для класичної радіофізики труднощами технічного і, зрештою, принципового характеру. Як відомо, найважливіша деталь генератора, котра під час виготовлення потребує прецизійного виконання і наладки, а саме резонатор, мусить мати розміри співвимірні з довжиною хвилі генерованого випромінювання. Як наслідок, при зменшенні  $\lambda$ , окрім технічних труднощів виготовлення резонаторів, виникає ще більша проблема – суттєве зменшення генерованої потужності та погіршення параметра стабільності частоти генерації. Так радіофізики зіткнулися з принциповим протиріччям, коли опанування діапазону все коротших довжин хвиль стало неможливим для реалізації на базі традиційних радіофізичних принципів та засобів. Як завше, нездоланне протиріччя в науці і техніці врешті-решт вимагає принципово нових підходів. Визріла потреба винайдення нового способу підсилення та генерації електромагнетних хвиль. Цей новий спосіб і був знайдений. Він ґрунтується на явищі стимульованого випромінювання, завбаченого Айнштайном ще 1916 року. Якщо генератор М. Плетінки забезпечував рівень відносних флуктуацій частоти  $\sim 10^{-9}$ , то у мазерах на аміаку цей параметр на два порядки менший, а у мазерах на атомах водню він порядку  $10^{-13}$ . Квантова електроніка відкрила новий етап у телекомунікаціях, у техніці вимірювання часу тощо.

Той факт, що квантова електроніка зародилася саме в ділянці НВЧ-діапазону (мазери), а не в оптичній, зумовлений відчайдушними намаганнями і нездоланими перешкодами в лабораторіях радіофізиків. Однією з таких лабораторій була НДЛ-16 у Львівській політехніці, а одним з таких відчайдухів-радіофізиків був світлої пам'яті Мирон Плетінка.





## Про Інститут фізики конденсованих систем НАН України

**Ігор Миронович Мриггод,**  
*член-кореспондент НАН України,  
директор Інституту фізики конденсованих  
систем НАН України*

Львів здавна славився своїми традиціями у точних науках. Так тут у передвоєнний період працювали такі видатні вчені як Маріян Смолюховський – один із творців теорії броунівського руху, Стефан Банах – засновник функціонального аналізу і творець усесвітньо званої Львівської школи математики, Леопольд Інфельд – один із співавторів Альберта Айнштейна з загальної теорії відносності і фахівець із нелінійної електродинаміки та інші. Проте в повоєнні роки майже все довелося розпочинати з чистого аркуша. Про історію та здобутки одного із таких наукових колективів, що виникли уже в другій половині ХХ століття, і йдеться у цій статті.

### Коротка історична довідка.

У вересні 2010 року виповнилося 20 років з часу створення у Львові Інституту фізики конденсованих систем (ІФКС) Національної академії наук України, який став фактично першим академічним інститутом у Західній Україні, що спеціалізується у сфері фундамен-



Рис. 1. Організатор і перший директор (1966–1971) Інституту теоретичної фізики АН УРСР академік Микола Боголюбов (праворуч) із своїм заступником В. П. Шелестом (по центру) та завідувачем відділу СТєКС професором І. Р. Юхновським (ліворуч) (Київ, 1970)

тальних фізичних досліджень. Проте історія становлення цього колективу розпочалася значно раніше – понад 40 років тому, коли в травні 1969 року було відкрито відділ статистичної теорії конденсованих станів<sup>1</sup> (СТєКС)

<sup>1</sup>Цікаво зауважити, що термін конденсована речовина на той момент був ще цілком новим. Є підстави вважати, що вперше офіційно його використав відомий американський фізик-теоретик, Нобелівський лавреат з фізики 1977 року Філіп Андерсен, який 1967 року перейменував свою дослідницьку групу в Кавендішській лабораторії Кембриджського університету і використав термін “теорія конденсованої речовини”. Фізика конденсованої речовини – це велика ділянка, що вивчає макроскопічні та мікроскопічні властивості систем, які складаються із надзвичайно великої кількості окремих складових частинок із сильними взаємодіями, у конденсованих фазах. Найпростіші приклади конденсованих фаз – це тверді тіла і рідини. Екзотичніші – надпровідна фаза чи фаза Босе-конденсату у деяких матеріалах за низьких температур, магнетні чи сегнетовпорядковані фази у твердих тілах тощо.



київського Інституту теоретичної фізики (ІТФ) АН УРСР. Відділ було засновано ще молодим тоді завідувачем кафедри теоретичної фізики Львівського державного університету (ЛДУ) імені Івана Франка, професором Ігорем Юхновським. Ідея створення відділу стала природним продовженням плідної наукової співпраці Ігора Рафаїловича з академіком Миколою Миколайовичем Боголюбовим – видатним математиком, механіком і фізиком-теоретиком, який очолював на той час ІТФ. Так, Микола Миколайович, за доброї підтримки якого утворився відділ СТеКС, став “хресним батьком” Інституту та його наукові поради ще впродовж багатьох років визначали наукову тематику цього колективу.

Слід сказати, що завдання, яке поставив перед собою Ігор Юхновський було далеко непростим. Спочатку штат новоствореного відділу складався із двох осіб – завідувача і старшого лаборанта – і тому першочергова задача полягала у формуванні (фактично створенні) конкурентного наукового колективу. До роботи у відділі почала активно залучатися талановита студентська молодь і випускники ЛДУ імені Івана Франка. Згодом це стало доброю традицією, яка має продовження і донині. Розпочав Ігор Рафаїлович із щоденної і кропіткої роботи з студентами та аспірантами. Саме тоді закладалися певні принципи взаємин учителя і учнів, апробувалися механізми взаємодії і підходи до критеріїв успіху наукового пошуку. З тих часів беруть початок, зокрема, знамениті “прослуховування” Юхновського, коли він разом із своїми молодшими колегами з певною періодичністю давав змогу кожному розповісти в деталях про результати роботи і проблеми, які виникли при цьому. І далеко не просто було проходити такі публічні усні звіти... До місця згадати, що таку методику роботи зі своїми колегами Ігор Рафаїлович використовував і пізніше, коли працював у Верховній Раді України чи в Кабінеті мініст-



Рис. 2. Обговорення наукових результатів: академік О. С. Давидов та член-кореспондент І. Р. Юхновський (Львів, 1973)

рів України. При цьому треба було продемонструвати чітке розуміння проблеми (так звана “постановка задачі”), показати зрозумілий алгоритм її розв’язання і переконати, що вже зроблені кроки є дієвими і перспективними.

Тоді ж вироблялися і вимоги до задач, які ставилися молодим науковцям. Деякі з цих вимог уже у вигляді афоризмів використовуються досі тодішніми аспірантами, а нині докторами наук, під час роботи зі своїми учнями. Один із них каже: “Задача має бути важкою, щоб треба було багато напрацюватися. Тоді і задоволення від результатів роботи буде великим, і майбутнє окресленим”. Не усім вдавалося “пробитися” через труднощі, але ті, хто з ними справлявся ставали самостійними вченими, які здатні проаналізувати будь-яку проблему і запропонувати оригінальний шлях до її розв’язання.

Упродовж наступних десяти років відділ суттєво зріс і зміцнів: тут з’явилися свої кандидати і доктори наук, результати досліджень пройшли добру апробацію на численних семінарах та конференціях, сформувалася своя добре впізнана наукова тематика. Львівські фізики розпочали практику проведення регулярних (тоді всесоюзних) робочих нарад із



статистичної фізики. Усе це дало змогу утворити 1980 року ще два наукові підрозділи – відділ теорії розчинів (завідувач д-р фіз.-мат. наук Мирослав Головка) та відділ квантової статистики (завідувач д-р фіз.-мат. наук Іван Вакарчук) – та відкрити того ж року Львівське відділення статистичної фізики ІТФ АН УРСР.

Розпочався новий період напруженої і цікавої роботи. З легкої руки Ігора Рафаїловича у 1980-х роках почали розвиватися дослідження, що мали поєднати аналітичні теоретичні підходи із щораз більшими можливостями комп'ютерного моделювання.<sup>2</sup> Зауважимо, що перші системні застосування методів комп'ютерного моделювання до багаточастинкових задач статистичної фізики розпочалися у 1950-х роках. Виконання таких робіт вимагало наявності надзвичайно дорогих у ті часи електронно-обчислювальних машин, які за своєю продуктивністю не можуть нині йти в жодне порівняння із звичайними персональними комп'ютерами. Водночас, тенденція розвитку була цілком очевидною і зрозумілою – нові унікальні можливості вивчення фізичних об'єктів зростали щороку поряд із швидким ростом продуктивності і падінням відносної ціни комп'ютерної техніки. Тоді ж у світі почали формуватися цілі лабораторії і наукові



Рис. 3. Науковий семінар відділу СТеКС (Львів, 1976)

групи, які вірили, що майбутнє однозначно за комп'ютерним моделюванням, а деякі дослідники навіть пророкували швидкий крах для аналітичної теорії. Візія Юхновського була іншою: “Треба конче розвивати підходи, які дають змогу поєднати переваги теорії і комп'ютерного експерименту”. Час переконав у справедливості цього погляду.

Тоді ж почали інтенсивно розвиватися міжнародні контакти, що в умовах СРСР було зовсім непросто, а часом навіть загрозово. Це дало змогу отримати перший досвід комп'ютерних симуляцій у Німеччині, Угорщині, а згодом і в США. Налагодилися зв'язки з фізиками з Санкт-Петербурга (тоді Ленінграда), які моделювали системи із дипольними взаємодіями. Частіше у Львові почали бувати вчені з країн Європи та Америки, а також з Японії. Все більше результатів публікувалося у міжнародно-визнаних наукових виданнях за кордоном, зростав авторитет львівських фізиків.

7 вересня 1990 року постановою Президії Академії наук УРСР на базі Львівського відділення ІТФ АН УРСР створюється Інститут фізики конденсованих систем та визначаються його основні напрями досліджень, до яких входять розробка аналітичних методів статистичної фізики і їх застосування до опису конденсованої речовини та комп'ютерне моде-

<sup>2</sup>Методи комп'ютерного моделювання почали розвиватися паралельно з швидким розвитком комп'ютерної техніки. Вважається, що одним із перших прикладів їх застосування до багаточастинкових систем стало моделювання процесу ядерного вибуху для цілей “Мангеттенського проєкту” в США під час Другої світової війни. При цьому досліджувалася поведінка 12 твердих сфер з використанням методу Монте Карло. Основне завдання у фізиці полягає у моделюванні поведінки конденсованих систем, що складаються із екстремально великої кількості окремих взаємодіючих частинок. Мета – вивчити можливі макростани системи залежно від зовнішніх параметрів та дослідити їх відповідні властивості.





Рис. 4. Боголюбівські читання у Львові  
(Стрийський парк, 1999)

лювання фізичних процесів і явищ у конденсованих системах. Директором Інституту став академік І. Р. Юхновський, який на той час був уже обраний депутатом Верховної Ради УРСР, де очолив опозиційну Народну Раду.

Тут доречно буде згадати і про інший аспект, що важливий для формування цільного і здорового колективу. Впродовж усіх цих років Ігор Рафаїлович, якому 1 вересня 2010 року виповнилося 85 років, багато зусиль покладав на те, щоб його молодші колеги були патріотами своєї країни і вміли відстоювати свої переконання. Щоб вони знаходили час для змістовного відпочинку та спорту, щоб вміли цінувати родинні цінності і знали свою історію, щоб розуміли, що працювати в колективі цікаво і відповідально водночас. Із самих початків у практику ввійшли колективні походи вихідного дня по околицях Львова і в Карпати, де можна було поспілкуватися на різні теми, показати свої кулінарні здібності та заспівати гарну пісню. Він завжди особисто цікавився тим, у яких умовах проживають науковці і намагався підтримати в хвилини скрути. Сім'я Юхновського була тоді і залишається досі для нас – його учнів – свого роду взірцем, який явно чи неявно кожний з нас співставляв із взаєминами у своїх родинах. Його особистий

приклад здорового способу життя та щоденних пробіжок і донині стимулює та заохочує. Багато чого з того досвіду прижилося в Інституті та перейшло в розряд незмінних традицій. Тут і щорічні походи в Карпати на Покрови, і передноворічні сімейні зустрічі в Інституті, і футбольні матчі чи забіги друзів. Не менший перелік займе те, що кожний з нас ще планує перебрати від свого Вчителя. Бо бігати щоранку добре, але непросто почати; щоденно працювати в напрузі важко, а поєднувати різні напрями роботи (часом непослудувані в очах інших) і зовсім складно. Але час іще є і кожний із нас сподівається коли-небудь та й розпочати...

#### Інститут сьогодні.

До складу Інституту входять нині сім наукових відділів, а саме: відділ статистичної теорії конденсованих систем (зав. відділу – д-р фіз.-мат. наук М. П. Козловський); відділ квантової статистики (зав. відділу – чл.-кор. НАН України І. В. Стасюк); відділ теорії розчинів (зав. відділу – чл.-кор. НАН України М. Ф. Головка); відділ теорії нерівноважних процесів (зав. відділу – д-р фіз.-мат. наук М. В. Токарчук); відділ комп'ютерного моделювання багато-частинкових систем (зав. відділу – д-р фіз.-мат. наук Т. М. Брик); відділ теорії модельних спінових систем (зав. відділу – д-р фіз.-мат. наук О. В. Держко); відділ квантово-статистичної теорії процесів каталізу (зав. відділу – чл.-кор. НАН України І. М. Мриггод). У складі відділу СТеКС нещодавно сформовано лабораторію фізики складних систем (керівник – д-р фіз.-мат. наук Ю. В. Головач).

Загалом в Інституті працює майже 100 осіб, переважна більшість з яких (75 осіб) – це наукові працівники. У науковому колективі Інституту 18 докторів і майже 40 кандидатів наук; один академік НАН України (І. Р. Юхновський) та три члени-кореспонденти НАН України (М. Ф. Головка, І. М. Мриггод,



І. В. Стасюк). Середній вік наукових працівників ІФКС НАН України становить майже 40 років (докторів наук – 55, кандидатів наук – 41), що є одним із кращих показників у системі НАН України. За практично незмінної чисельності працівників кількість кандидатів та докторів наук за останні 15 років зростає у 1,5 рази. Крім того, в аспірантурі при Інституті навчається 9 осіб, а в докторантурі – 3 науковці. Майже 40 % дослідників в Інституті – це молоді вчені віком до 35 років, серед яких чимало стипендіатів та отримувачів грантів, зокрема стипендій Президента України та Президента НАН України для молодих учених, грантів Міжнародних фондів імені Гумбольдта та імені Марії Кюрі, стипендіатів міжнародної асоціації ІНТАС тощо. Вже чотири роки поспіль серед молодих науковців визначається стипендіат Юхновського, який за вимогами Ігора Рафаїловича має бути успішним в науці (щонайменше кандидат наук) і обов'язково одруженим (а ще краще має маленьких дітей). Переможець отримує спеціальний диплом і винагороду з власних заощаджень Ігора Рафаїловича.

У 1992 році започатковано проект UARNet – Українська академічна і дослідницька мережа, в межах якого в лютому 1993 року здійснено перше в Україні під'єднання до глобального Інтернету некомутуваними лініями зв'язку. Згодом (1995) в Інституті було створено окрему лабораторію інформаційних технологій та комп'ютерних мереж, яка з 1999 року діє як окреме Державне підприємство “Науково-телекомунікаційний центр “Українська академічна і дослідницька мережа” ІФКС НАН України (директор – І. А. Процикевич).

Ще одним із досягнень ІФКС став запуск у дію першого в структурі Національної академії наук України (січень 2002 року) високопродуктивного розрахункового кластера, що мав тоді 16 ядер із робочою продуктивністю 12,5 Gflops. Після його модернізації у наступні роки

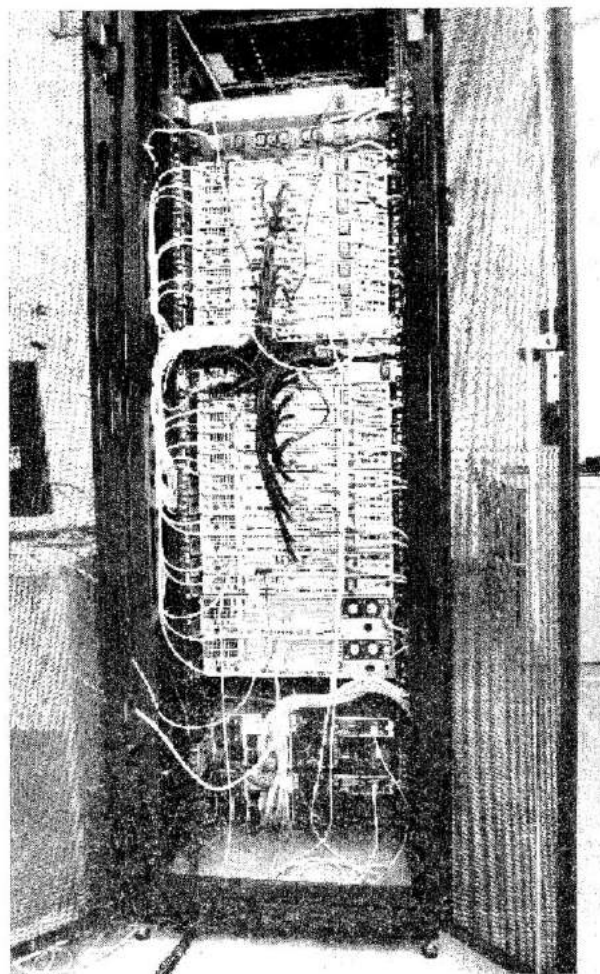


Рис. 5. Кластер ІФКС НАН України (2006)

він і досі залишається одним із найпотужніших в Україні. У 2007 році кластер приєднано до GRID мережі НАН України, що відкрило нові можливості для комп'ютерного моделювання складних об'єктів. Постійна робота з модернізації кластера і розробки ефективних методів комп'ютерного моделювання має на меті, зокрема, створення провідного регіонального GRID-вузла та зміцнення позицій Інституту в цьому напрямі.

Від 1993 року Інститут видає журнал “Condensed Matter Physics”, у якому публікуються оригінальні та оглядові статті зі статистичної фізики та теорії конденсованої речо-



вини. Цей щоквартальний журнал визнано Європейським фізичним товариством, з 2005 року він включений до міжнародного списку основних наукових видань, що ведеться американським Інститутом наукової інформації, і він став першим за часи незалежної України науковим періодичним виданням, яке отримало свій імпаکت-фактор. При журналі працює міжнародна редколегія, до складу якої входять провідні фахівці десь з десяти країн світу. Світовою також є географія авторів, що надсилають свої рукописи для опублікування у цьому журналі.

Інститут тісно співпрацює із провідними дослідницькими центрами світу, серед яких: Інститут молекулярної фізики та Інститут фізичної хімії ПАН (Польща), Інститут теоретичної фізики Університету м. Лінц (Австрія), Університет імені П'єра і Марії Кюрі (Франція), Університет імені Генрі Пуанкаре (Франція), Університет м. Джорджтаун (США), Університет м. Дортмунд (Німеччина), Королівський технологічний інститут (Швеція), Інститут хімічних процесів АН ЧР (Чеська Республіка), Університет м. Любляна (Словенія), Університет Парі-Сют (Франція), Університетом "La Sapienza" (Італія) та багато інших. Щорічно майже чверть співпрацівників Інституту перебувають із науковими візитами (30–35 відряджень на рік) або ж виконують програми стажувань (майже 10 щорічно) в іноземних наукових центрах. У свою чергу ІФКС НАН України щороку приймає майже 10 науковців із-за кордону. Для їх перебування в Інституті створена необхідна інфраструктура. Результатами міжнародної співпраці стають спільні наукові публікації у провідних світових журналах, можливості доступу до сучасних суперкомп'ютерів та інформаційних ресурсів, актуалізація тематики та участь у міжнародних конференціях.

Інститут має один із найвищих у НАН України показників щодо кількості друкованої



Рис. 6. Школа-семинар молодих учених зі статистичної фізики і теорії конденсованої речовини (Львів, 2002)

продукції та її цитувань на одного працівника. Щорічно за результатами досліджень науковці Інституту публікують майже 200 наукових праць, більшість з яких – це статті в провідних фахових виданнях, переважно в іноземних журналах.

На регулярній основі працює науковий семінар ІФКС НАН України, що має великий авторитет у науковій спільноті і цікаві традиції, започатковані ще в 1970-х роках. За цей час організовано більше тисячі таких семінарів (1000-й відбувся у грудні 2005 року), де свої результати мали змогу представити сотні вчених із десятків країн світу. Традиційними стали щорічні тематичні конференції і школи-семінари. Так, зокрема, з 1997 року проводяться Ізингівські читання, де обговорюються сучасні проблеми теорії фазових переходів і критичних явищ. За матеріалами читань у видавництві World Scientific започатковано серію "Order, Disorder and Criticality", редактором якої є організатор читань Ю. В. Головач. З 2001 року щорічно проводиться Всеукраїнська школа-семинар і конкурс молодих вчених зі статистичної фізики та теорії конденсованої речовини, що приурочені до річниці створення відділу СТЄКС. Уже традицією стало





проведення на початку року Йорданських читань, де представляються кращі наукові здобутки працівників Інституту, та Робочої наради з актуальних проблем фізики м'якої речовини, що організовується наприкінці року Науковою радою НАН України з цієї проблематики, яка працює при Інституті.

ІФКС НАН України виступає також організатором і співорганізатором міжнародних та всеукраїнських наукових конференцій, що проводяться раз у 2–3 роки і присвячені певним актуальним напрямам досліджень. Зокрема, регулярно за участю Інституту проводяться Українсько-польські та Східно-європейські конференції із фізики сегнетоелектриків; Чорнобильські читання, де обговорюються результати досліджень фізико-хімічних властивостей паливовмісних матеріалів об'єкту "Укриття"; традиційними стали конференції із статистичної фізики і теорії конденсованої речовини, що організовуються у Львові з 1970-х років.

Понад 15 років при Інституті працює спеціалізована рада із захистів докторських та кандидатських дисертацій за трьома спеціальностями: 01.04.02 – "теоретична фізика", 01.04.07 – "фізика твердого тіла", 01.04.24 – "фізика колоїдних систем". При Інституті активно працює Рада молодих вчених, що координує роботу молодих науковців, спільно з дирекцією та профспілковим комітетом організовує цікаві туристичні подорожі, тематичні вечори та бере активну участь в організації усіх науково-конференційних заходів, що відбуваються в Інституті.

Важливе місце в роботі Інституту займає підготовка молодих фахівців і викладацька праця. При ІФКС НАН України працюють філії кафедр прикладної математики і інженерного матеріалознавства та прикладної фізики Національного університету "Львівська політехніка", що структурно входять до нещодавно створеного Науково-навчального центру ЗНЦ НАН і МОН України, який діє на правах Від-



Рис. 7. Наукове відрядження до об'єкту "Укриття" (2001). Зліва направо: Ігор Мриглод, Річард Стоун (кореспондент журналу "Science"), Мирослав Головка

ділення цільової підготовки при Національному університеті "Львівська політехніка". В Інституті створено спеціалізований комп'ютерний клас для навчання студентів, що дає змогу на практиці опановувати методи виконання складних кластерних розрахунків. Працівники Інституту керують курсовими та магістерськими роботами і викладають спецкурси у Львівському національному університеті імені Івана Франка (кафедра теоретичної фізики), у Національному університеті "Львівська політехніка" (кафедри прикладної математики і інженерного матеріалознавства та прикладної фізики), в Українській академії друкарства (кафедра додрукарських процесів) та в Українському католицькому університеті (ка-



федра загальної історії). Загалом до викладацької роботи у вищих навчальних закладах м. Львова, а також до читання лекцій в університетах за кордоном, щороку залучається понад 10 вчених Інституту.

### **Наукові здобутки та напрями перспективних досліджень.**

За час становлення та розвитку Інституту тут сформувалась Львівська школа статистичної фізики, добре знана нині не лише в Україні, а й далеко за її межами. Засновником та ідейним натхненником цієї школи став академік НАН України І. Р. Юхновський. Хронологічно серед найзначиміших досягнень фундаментального характеру, що отримані її представниками, можна згадати таке:

“Наприкінці 50-х – початку 60-х років ХХ століття сформульовано основні ідеї методу колективних змінних (І. Р. Юхновський) – підходу, що дав змогу розвинути згодом цілу низку мікроскопічних теорій, які ґрунтувалися на функціональних методах, для опису властивостей конденсованої речовини, зокрема розробити статистичну теорію класичних (Юхновський І. Р., Головка М. Ф. Статистическая теория классических равновесных систем. – Київ: Наукова думка, 1980) та квантових систем взаємодіючих частинок (Юхновський І. Р., Гурський З. А. Квантово-статистическая теория неупорядоченных систем. – Київ: Наукова думка, 1991), теорію фазових переходів (Юхновський І. Р. Фазовые переходы второго рода. Метод коллективных переменных. – Київ: Наукова думка, 1985) тощо. Ці роботи відзначені премією АН УРСР імені М. М. Крилова (І. Р. Юхновський, 1986) та Державною премією УРСР (З. О. Гурський, 1983). Вони стали засадничими при формуванні Львівської школи статистичної фізики.

“На початку 1970-х років побудовано мікроскопічну теорію розчинів електролітів. Завдяки явному врахуванню взаємодій із мо-

лекулами розчинника став можливим кількісний опис явищ екранування, йонної сольватації, електролітичної дисоціації молекул електроліту та інші властивості, зумовлені природою розчинника (Holvko M. F., Yukhnovsky I. R. Approaches to the many-body theory of dense ion-dipole plasma. Application to ionic solvation. – In: Chem. Phys. Solvation, Par. A. – Elsevier, Amsterdam, 1985. – Ch. 6. – P. 207–262). Ця теорія була узагальнена згодом на опис асоціативних ефектів та процесів кластерування у складних рідинах, що дало змогу пояснити аномальні низькотемпературні особливості подвійного електричного шару, зрозуміти роль електроліту в явищах внутрімолекулярного електронного переносу тощо.

“Наприкінці 1970-х років запропоновано нові функціональні представлення для квантової статистичної суми багаточастинкових бозе- та фермі-систем, що дало змогу отримати низку нових результатів для бозе-рідин у низькотемпературній ділянці та в ділянці фазового переходу в надплинний стан (І. О. Вакрчук) та провести розрахунки ефективних нелокальних багаточастинкових потенціалів електрон-йонних взаємодій для металів (М. В. Ваврух).

“На підставі статистико-механічного підходу, що ґрунтується на запропонованих у 1970-х роках І. В. Стасюком та Р. Р. Левицьким мікроскопічних моделях, розвинуто теорію, що з єдиних позицій описує низку індукованих зовнішніми полями оптичних та деформаційних ефектів у діелектричних кристалах та сегнетоелектриках з водневими зв’язками (Stasyuk I. V., Kotsur S. S. The microscopic theory of the gyration and electrogyration in dielectric crystals// Phys. Stat. Sol (b), 1983. – 117. – P. 557–568); вперше запропоновано теоретичне пояснення ефектів електро- та п’єзогірації.

“У 1980-х роках запропоновано нове формулювання геометричної концепції форм релативістичної динаміки. На цій підставі роз-



винують послідовну схему лагранжевого опису системи частинок, що використовує вищі похідні коваріантних координат, досліджено зв'язок з нелокальними лагранжіанами, характерними для формалізму типу Фоккера, проведено перехід до гамільтонового опису та різних реалізацій квантування (Гайда Р. П. Квазирелятивістские системы взаимодействующих частиц// Физ. элемен. част. и атом. ядра, 1982. – Т. 13, вып. 2. – С. 427–493).

“У 1990-х роках запропоновано нову концепцію узгодженого опису кінетики та гідродинаміки для густих плинів і рідин (М. В. Токарчук). Розвинуто оригінальний метод розв'язку рівнянь узагальненої гідродинаміки (І. М. Мриглод), що ґрунтується на формалізмі колективних збуджень. Уперше проведено самоузгоджені розрахунки часових кореляційних функцій, спектрів колективних збуджень та узагальнених коефіцієнтів переносу в широкій області зміни просторових та часових масштабів для багатьох систем – від густих інертних газів та рідких металів до магнітних і полярних рідин та їх сумішей. Результати цих досліджень опубліковано у понад 60 статтях, вони відзначені премією НАН України імені С. І. Пекаря (І. М. Мриглод, Ю. К. Рудавський, М. В. Токарчук, 2003).

Сьогодні в Інституті виконуються фундаментальні дослідження за кількома основними напрямками, серед яких: квантова теорія твердих тіл, магнетиків і сегнетоелектриків, а також систем з водневими зв'язками та сильними кореляціями (чл.-кор. НАН України І. В. Стасюк, Р. Р. Левицький, М. А. Кориневський, О. В. Держко, А. М. Швайка, А. П. Моїна, С. І. Сороков та інші); рівноважна теорія рідин, розчинів електролітів та багатокомпонентних плинів, а також об'єктів фізики м'якої речовини (полімери, колоїди, рідкокристалічні системи) (чл.-кор. НАН України М. Ф. Головка, Ю. В. Калюжний, А. Д. Трохимчук, О. В. Пацаган, Я. М. Ільницький та інші);

теорія фазових переходів і критичних явищ у статистичній фізиці та складних системах (М. П. Козловський, Ю. В. Головач, І. В. Пилюк, М. Дудка, В. Блавацька та інші); нерівноважна статистична фізика, явища переносу, фізика поверхні і механізми каталізу (чл.-кор. НАН України І. М. Мриглод, М. В. Токарчук, Н. І. Павленко, В. В. Ігнатюк та інші); розвиток методів комп'ютерного моделювання багаточастинкових систем (Т. М. Брик, І. П. Омелян, А. Б. Баумкетнер та інші); теорія релятивістичних систем (В. І. Третяк, А. А. Дувіряк, Ю. Г. Яремко).

В Інституті виконуються також дослідження прикладного характеру, зокрема у напрямках розвитку комп'ютерних та інформаційних технологій, вивчення властивостей паливовмісних матеріалів в об'єкті “Укриття”, розробки оптичних елементів систем розпізнавання образів та захисту інформації, гетерогенного каталізу. Серед робіт прикладного спрямування слід, насамперед, виділити таке:

“Починаючи з 90-х років минулого століття, в ІФКС НАН України активно виконуються дослідження, спрямовані на вивчення фізико-хімічних властивостей і стану паливовмісних матеріалів (ПВМ) в об'єкті “Укриття” та їх зміну в часі. Проведені дослідження дали змогу виділити основні чинники (пилоутворення, вилуговування, комплексоутворення, радіаційне дефектоутворення тощо), які треба враховувати при довгостроковому прогнозуванні поведінки ПВМ в об'єкті Укриття”. Запропоновано низку моделей для їх врахування і розвинуто кілька нових перспективних підходів до розв'язання проблем моніторингу стану ПВМ та технологій їх вилучення.

“Наприкінці 1990-х розроблено новий метод кодування зображень для захисту цінних паперів на основі використання матриць Адамара. Технологія оптичного захисту цінних паперів випробувана в умовах комбінату “Україна” та Національного банку України, а також демонструвалася на виставках в Украї-





ні та США (Патент України № 64836 (2004); USA № 20050179955 (2005); WO 03/019483, международная заявка PCT/UA01/00031 (2003)// М. В. Шовгенюк, В. С. Білорус, М. П. Козловський, Т. С. Крохмальський).

Представники Львівської школи статистичної фізики – учні академіка Ігора Юхновського – успішно працюють нині не лише в академічних установах, а й у стінах багатьох вищих навчальних закладів. Так, для прикладу, у Львівському національному університеті імені Івана Франка великий авторитет у студентів мають професори В. С. Височанський, Л. Ф. Блажівський, М. В. Ваврух, В. М. Ткачук; у Національному університеті “Львівська політехніка” працюють П. П. Костробій, Г. В. Понеділок, І. Й. Куриляк, В. О. Коломієць, а професор І. О. Вакарчук, який на момент захисту докторської дисертації 1980 року став одним із наймолодших докторів наук у колишньому СРСР, очолює нині Львівський національний університет імені Івана Франка. Надзвичайно великий внесок у становлення і розвиток Національного університету “Львівська політехніка” привніс ректор, професор Ю. К. Рудацький (1946–2007) – ще один учень Ігора Рафаїловича. Впродовж багатьох років у Львівському відділенні статистичної фізики працював І. М. Копич, який очолює нині Львівську комерційну академію. Вихованці цієї школи працюють на імідж української науки і в інших навчальних закладах України, а також в університетах США, Канади, Німеччини, Великої Британії, Польщі, Франції, Японії, Австрії, Мексики.

В останні роки тематика досліджень, що тут виконуються, значно розширилася. Цікаві результати отримані, зокрема, з біофізики, нанофізики, властивостей хімічно-активних систем, теорії складних мереж тощо. Нові перспективи відкриваються тепер через можливості ширшого застосування методів комп’ютерного моделювання мультимасштабних процесів у складних системах і появою в

Україні високопродуктивних розрахункових кластерів. Значним залишається потенціал Інституту, який міг би бути використаний в освітній діяльності.

### Післяслово

Завершуючи цю статтю про один із академічних фізичних інститутів, хочеться звернутися, насамперед, до тебе, шановний Читачу. Основною мотивацією у її написанні стали роздуми про тих молодих людей, які незабаром завершують навчання у середній школі і роздумують над тим, який вибір зробити далі, які науки опанувати і на яку професію орієнтуватися. Пригадую ті часи, коли ці питання турбували мене і розумію, що зараз, мабуть, зробити свій вибір значно складніше. Складніше не тому, що якісно змінилася сама людина чи середовище, яке нас оточує. Змінилися обставини, коли стало більше можливостей для вибору, бо живемо у суспільстві демократичному і відкритому, в умовах світу тісно зв’язаного інформаційно. Водночас, наявність ширших можливостей ускладнює вибір, особливо, коли “попсові” назви спеціальностей затьмарюють зміст, який за ними стоїть; коли на це працюють сотні іміджмейкерів і мас-медіа, які пропагують “гламурне” та безтурботне життя “олігархів” чи то “депутатів” і “суддів” та розповідають про віщунів, чаклунів і знахарів; коли вибір робить на основі ефемерного поняття престижності, а за тим забувається те, що професія – то не лише гроші (часто нечисті), а вибір надовго і професійна робота має приносити задоволення та бути затребуваною суспільством.

То ж одна із альтернатив – це наука, де можна отримувати відповіді на запитання, що супроводжують Вас з дитинства:

- Чому небо блакитне?
- Як народжується вітер?
- Чому метал холодний, а дерево тепле?
- Як виникає веселка? ...

А далі до складнішого:



– Як конструювати матеріали із наперед заданими властивостями?

– Як виникла Земля і Всесвіт?

– Чи можна миттєво переміститися в просторі?

– Як повернутися в минуле? ...

Таких запитань безліч, деякі з них досі без відповіді, а відповіді на інші дали змогу прийти до важливих технічних знахідок, що активно використовуються сьогодні вже на побутовому рівні. Інтернет, мобільний телефон, сучасний фотоапарат чи відеокамера не могли б бути спроектовані без досягнень фундаментальної і прикладної науки.

Заняття наукою ніколи не належало до переліку професій, що приносили великі доходи. Тому тим, для кого це є пріоритетом номер

один, такий вибір категорично не рекомендується. Водночас, то є дорога творення, важкого пошуку і величезної насолоди в разі успіху. То є шлях для тих, хто не втратив цікавості і здатність до пошуку, хто хоче конче знайти вихід “з лабіринту”, бо лише так можна вгамувати “спрагу” пізнання.

І сучасна фізика – як основа природознавства загалом – дає тут широке поле для діяльності. Не на останніх ролях тут фізики в Україні. Отож, прохання до тих, хто цікавиться незвіданим – добре подумайте про свій вибір.

І якщо ця стаття хоча б частково цьому сприятиме, то ми вважатимемо, що своє завдання виконали.

У добру путь!

12 серпня 2010,

Львів

## НОБЕЛІВСЬКІ ЛАВРЕАТИ З ФІЗИКИ 2010 РОКУ

Нобелівську премію з фізики 2010 року одержали вихідці з колишнього Радянського Союзу Андрій Гейм і Костянтин Новосьолов “за інноваційні експерименти з двомірним матеріалом графеном”.

**Андрій Гейм** народився 1958 року в Сочі (колишньому Радянському Союзі, нині Російська Федерація), 1975 року закінчив школу із золотою медаллю. Далі навчався в Московському фізико-механічному інституті (МФТІ), згодом виїхав за кордон.

**Костянтин Новосьолов** народився 1974 року в Нижньому Тагілі (колишньому Радянському Союзі, нині Російська Федерація). Закінчивши школу 1991 року, він поїхав до Москви, де вступив до МФТІ. Після інституту, він працював у Чернооголовці поблизу Москви, згодом виїхав до Великої Британії. Дисертацію захищав у нідерландському університеті Неймегена.

Нині науковці працюють у Великій Британії в університеті Манчестера.

“Нам ніхто не вірив”, – згадував проф. Гейм. – Ми посилали статті і в журнали *Nature*, і *Applied Physics Letters*, але ніхто їх не хотів публікувати. Багато із тих колег, кому доручили перевірити наші результати, навіть не ховали недовіри. Нині вони частенько навідуються до мене, щоб докладніше дізнатися про технологію одержання нового матеріалу: найефективніше розшарувати графіт, щоб одержати найтонший зі всіх можливих – атомний – шар вуглецю”.

Графен перспективний для використання у комп’ютерній галузі, також ведеться робота над створенням електропровідних покриттів для дисплеїв мобільних телефонів, елементів сонячних батарей і високоточних сенсорів для хемічного аналізу рідин і газів на основі графена. Професор Гейм переконаний, що невдовзі графен змінить життя людини не менш радикально, ніж це колись зробили полімери. Так само вважає й Костянтин Новосьолов. Він вважає, що хоча багато незвичайних властивостей графену використовуватимуть ще не скоро, надшвидкі транзистори, мікромеханічні пристрої і наносенсори на основі графена з’являться вже невдовзі.

## РОЗВ'ЯЗКИ ЗАДАЧ ІV ЕТАПУ ВСЕУКРАЇНСЬКОЇ ОЛІМПІАДИ З ФІЗИКИ (Чернігів, 2010)

*Умови задач ІV етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики  
читайте в журналі "Світ фізики" (2010, № 2, с. 30–35)*

### 8 клас

#### Задача 1

При підвішуванні першого вантажу пружина розтягується на величину:

$$mg = k\Delta l.$$

Звідси випливає, що

$$\Delta l = \frac{mg}{k}.$$

Можна вважати, що половина пружини розтягнеться на

$$\Delta l_{1/2} = \frac{mg}{2k}.$$

Звідси можна сказати, що коефіцієнт жорсткості половини пружини удвічі більший від коефіцієнта цілої пружини.

Тому при підвішування до середини пружини ще одного вантажу, видовження другої її половини не зміниться, а першої збільшиться на величину

$$\Delta l'_{1/2} = \frac{mg}{2k},$$

тоді повне видовження цієї частини дорівнює:

$$\Delta l'_{1/2} = \frac{mg}{2k} + \frac{mg}{2k} = \frac{mg}{k},$$

а довжина всієї розтягнутої пружини дорівнює:

$$\begin{aligned} L &= l_0 + \Delta l_{1/2} + \Delta l'_{1/2} = \\ &= l_0 + \frac{mg}{2k} + \frac{mg}{k} = l_0 + \frac{3mg}{2k} \end{aligned}$$

#### Задача 2

Умова занурення у воду крижинки з дробинкою визначається рівністю сили тяжіння і виштовхувальної сили:

$$(M_x + m)g = g\rho_v V,$$

де  $M_x$  – маса крижинки під час занурення, а загальний об'єм дробинки та крижинки становить

$$V = \frac{m}{\rho_c} + \frac{M_x}{\rho_l}.$$

З цієї умови отримуємо кількість льоду, яка зануриться разом з дробинкою:

$$M_x + m = \rho_v \left( \frac{m}{\rho_c} + \frac{M_x}{\rho_l} \right),$$

$$\begin{aligned} M_x &= \frac{m\rho_l}{\rho_c} \cdot \frac{(\rho_c - \rho_v)}{\rho_v - \rho_l} = \\ &= 5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{900}{11320} \cdot \frac{(11300 - 1000)}{1000 - 900} = \\ &= 5 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{900 \cdot 10300}{11320 \cdot 100} = 41 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \end{aligned}$$

Маса льоду, що розтане дорівнює:

$$\Delta M = M - M_x = 100 - 41 = 59 \text{ г},$$

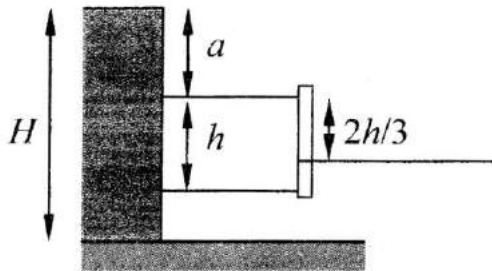
а потрібна для цього кількість теплоти дорівнює

$$Q = \lambda \Delta M = 59 \cdot 330 \cdot 10^{-3} \cdot 10^3 = 19,47 \text{ кДж}.$$



### Задача 3

По-перше, зазначимо, що сила, яку треба прикласти до нитки, щоб її витягувати, пропорційна до маси, а, отже, й товщини паперу, який знаходиться зверху. По-друге, обкладинки енциклопедії майже не впливають на точність відповіді, оскільки зроблені знову ж таки з паперу і мають відповідну до своєї маси товщину.



Тоді з умови рівноваги сірника відношення сил натягу нижньої нитки до верхньої дорівнює:

$$\frac{F_n}{F_6} = \frac{a+h}{a} = \frac{\frac{2h}{3}}{\frac{h}{3}} = \frac{2}{1}.$$

Звідси знаходимо, що відстань від верхньої нитки до верхнього краю енциклопедії (див. рис.) буде:

$$a = h = 4 \text{ см.}$$

Коли зверху кладуть ще два томи завтовжки  $H$ , відношення сил натягу нижньої нитки до верхньої має аналогічний вигляд:

$$\frac{F'_n}{F'_6} = \frac{a+h+2H}{a+2H} = \frac{\frac{2h}{3} - x}{\frac{h}{3} + x},$$

де  $x = \frac{h}{8}$  – відстань, на яку піднімають третю нитку, щоб зберегти рівновагу сірника.

$$\frac{a+h+2H}{a+2H} = \frac{\frac{2h}{3} - \frac{h}{8}}{\frac{h}{3} + \frac{h}{8}},$$

$$\frac{2h+2H}{h+2H} = \frac{13}{11}.$$

Розв'язуючи рівняння, знаходимо

$$H = \frac{9}{4}h = 9 \text{ см.}$$

Для зважування інших тіл, треба, по-перше, щоб навантаження від них, рівномірно розподілялося по площині аркуша (чому сприяє картон обкладинки). По-друге, треба або знати масу енциклопедії, або мати тіло відомої маси, щоб провести контрольне вимірювання. Звісно, маси, які ми зважуємо за змінами положення третьої нитки, не можуть бути ані дуже великими, ані малими. Для збільшення точності замість сірника можна використати паличку з більшою відстанню між нитками.

### Задача 4

#### I варіант

Знайдімо мінімальну силу, яку треба прикласти до тіла, щоб підняти його у воді. Вона дорівнює:

$$F = F_A - mg.$$

Сила Архімеда дорівнює:

$$F_A = \rho g V = 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot g,$$

а сила тяжіння буде:

$$mg = (m_1 + m_2)g = (1,3 + 0,2)g = 1,5g.$$

Отже, сила  $F = 0$  – це виконана робота, щоб підняти пляшку у воді, яка теж дорівнює нулеві, і повна робота дорівнює виконаній роботі, щоб підняти тіло у повітрі на висоту  $h$

$$A = mgh = 1,5 \cdot 9,8 \cdot 3 = 44,1 \text{ Дж.}$$

#### II варіант

Оскільки середня густина пляшки

$$\rho = \frac{m_1 + m_2}{V} = \frac{1,3 + 0,2}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 1000 \text{ кг/м}^3,$$

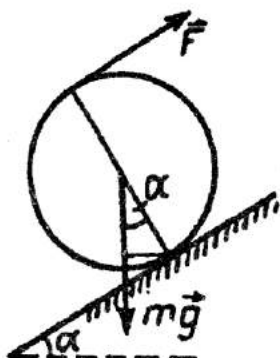
дорівнює густині води, то пляшка не спливає і не тоне, рівнодійна сил, які на неї діють, дорівнює нулеві. Тому при підйманні її з дна во-

дойми до поверхні води робота не виконується.

Для підймання над поверхнею води роботу можна обчислити за формулою:

$$A = mgh = 1,5 \cdot 9,8 \cdot 3 = 44,1 \text{ Дж.}$$

### Задача 5



Оскільки вантажник котить бочку повільно, момент сили тяжіння відносно точки дотику бочки до схилу зрівноважується з моментом сили  $F$ , плече якої дорівнює  $2R$ , а плече сили тяжіння дорівнює  $1/2 R$ , оскільки катет, який лежить навпроти кута  $\alpha = 30^\circ$  удвічі менший від гіпотенузи.

Отже,

$$2RF = \frac{1}{2}mgR,$$

звідси,

$$m = 4 \frac{F}{g} = 120 \text{ кг.}$$

### 9 клас

#### Задача 1

1. Нехай товщина крижини –  $H$ , і вона виступає над водою на висоту  $x$  (без додаткової маси).

Умова плавання ( $S$  – площа крижини):

$$\rho_{\text{льоду}}gHS = \rho_{\text{води}}g(H-x)S,$$

звідси

$$\frac{\rho_{\text{льоду}}}{\rho_{\text{води}}} = 1 - \frac{x}{H},$$

$$\frac{x}{H} = 1 - \frac{\rho_{\text{льоду}}}{\rho_{\text{води}}} = 0,1,$$

$$x = \frac{H}{10}.$$

З іншого боку,

$$\rho_{\text{льоду}}g xS = Mg,$$

звідси маса крижини

$$M_{\text{льоду}} = \rho_{\text{льоду}}SH = 10M.$$

2. Умова плавання крижини з масою  $m$  посередині ( $h$  – додаткова зміна висоти, зумовлена масою  $m$ ):

$$\rho_{\text{води}}g hS = gm,$$

звідси

$$h = \frac{m}{\rho_{\text{води}}S}.$$

Якщо  $m = M$ , то  $h = x$ , звідси

$$h = \frac{m}{M}x = \frac{m}{M} \frac{H}{10}.$$

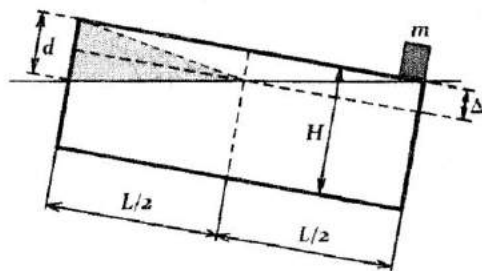
У цьому випадку висота поверхні крижини над водою буде

$$\Delta = x - h,$$

тобто

$$\Delta = \frac{H}{10} \left( 1 - \frac{m}{M} \right).$$

3.



Якщо маса  $m$  розташована на краю крижини, на середині ребра, крижина нахилиється на малий кут (Вважаємо, що  $H$  значно менше від інших характерних розмірів крижини). Виходячи з умови, що  $m \ll M_{\text{льоду}}$ , вважаємо, що центр мас крижини не змінив свого положення. Тоді момент сили  $mgL/2$ , створений масою  $m$ , має урівноважитися моментом, зумовленим вагою заштрихованої (в перерізі) частини крижини. Маса цієї частини буде пропорційна до відношення площі заштрихованого трикутника до площі перерізу крижини:

$$M' = M_{\text{льоду}} \frac{\frac{1}{2} d \frac{L}{2}}{HL} = M_{\text{льоду}} \frac{d}{4H} = \frac{5}{2} \frac{d}{H} M.$$

4. Знайдемо тепер, на якій віддалі від вершини знаходиться центр ваги зображеного трикутника. Центр ваги трикутника – це точка перетину його медіан. Ця точка ділить кожну з медіан у відношенні 2:1. Отже, центр мас заштрихованого трикутника лежить на віддалі

$$\frac{2}{3} \frac{L}{2} = \frac{L}{3}$$

від осі симетрії перерізу крижини.

5. Отже, умова рівноваги крижини набуває вигляду:

$$M'g \frac{L}{3} = \frac{5}{6} \frac{dL}{H} M = m \frac{L}{2}.$$

Враховавши, що  $d = 2\Delta$ , отримуємо:

$$\frac{m}{M} = \frac{5}{3} \frac{d}{H} = \frac{10}{3} \frac{\Delta}{H} = \frac{1}{3} \left( 1 - \frac{m}{M} \right),$$

звідси

$$\frac{4}{3} \frac{m}{M} = \frac{1}{3},$$

$$\frac{m}{M} = \frac{1}{4}.$$

Видно, що умова  $m \ll M_{\text{льоду}}$  добре виконується.

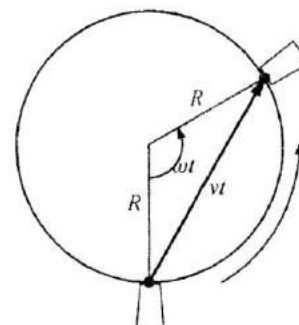
### Задача 2

Щоб зрозуміти, чому не можна відразу повернутися з платформи, знайдемо швидкість її зовнішніх частин:

$$\omega R = \frac{2\pi R}{T} = \pi \frac{M}{c} \approx 3,14 \frac{M}{c}.$$

Це в 1,57 разів більше, ніж  $v = 2$  м/с. Тому намагатися бігти проти руху платформи біля входу – марна справа.

Оскільки швидкість  $v = 2$  м/с задана відносно платформи, спробуємо розглянути задачу в системі відліку, що обертається разом з платформою. Платформа нерухома, а вхід на неї (разом із басейном) рухається навколо центру у напрямку, протилежному до напрямку обертання платформи. Потрібно за найменший час перестріти цей вхід. Найкоротша лінія – це пряма, отже, і найшвидшим буде рух по прямій відносно платформи (рис. 1).





З рівнобедреного трикутника, утвореного хордою, вздовж якої слід рухатись по поверхні платформи (довжина  $\nu t$ ), і двома радіусами, які спираються на дугу повороту місця входу, отримуємо рівняння, що визначає потрібний нам час:

$$2R \sin \frac{\omega t}{2} = \nu t.$$

Для зручності перепишімо це рівняння в системі SI:

$$\sin \frac{\pi t}{8} = \frac{t}{4}$$

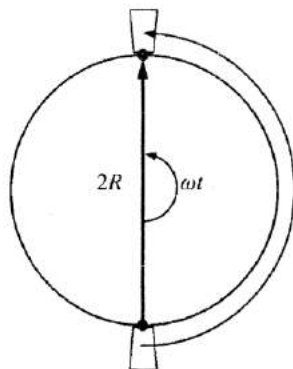
і знайдемо його розв'язок:

$$t = 4 \text{ с.}$$

З'ясувалося, кут

$$\omega t = \pi,$$

тобто, переміщатися слід уздовж діаметра (рис. 2), про що можна було й здогадатися, оскільки швидкість руху 3,14 м/с вздовж дуги кола у стільки ж разів більша від швидкості 2 м/с, у скільки довжина півкола більша від діаметра.



Отже, першу половину часу (2 с) учасник змагання має рухатись у напрямку до центра платформи, а другу половину – продовжувати свій рух, тільки тепер вже від центра.

Оскільки переможець змагання весь час рухався відносно платформи в напрямку до її центра зі сталою швидкістю  $\nu$ , а платформа

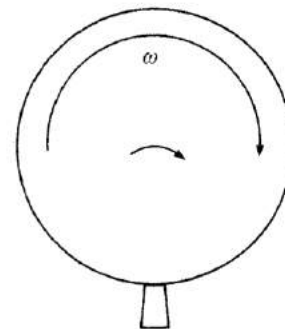
весь час поверталася разом з ним зі сталою кутовою швидкістю  $\omega$ , залежності від часу відстані  $r$  до центра платформи і кута повороту  $\varphi$  будуть лінійними:

$$\begin{cases} r = R - \nu t \\ \varphi = \omega t \end{cases}$$

Подана система рівнянь і є рівнянням траєкторії у полярній системі координат для першої половини подорожі.

Траєкторія другої половини буде симетричною. Підставляючи  $t$  з другого рівняння системи у перше, отримуємо:

$$r = R \left( 1 - \frac{2\varphi}{\pi} \right) \text{ – частина спіралі Архімеда.}$$



### Задача 3.

Побудуємо зображення трубки (рис. 1). Промінь, зображений паралельним до головної оптичної осі, міг би належати і точці  $A$ , і точці  $B$ , тому зображення  $A'B'$  відрізка  $AB$  буде лежати на лінії цього променя після його заломлення у лінзі й проходження фокусу.

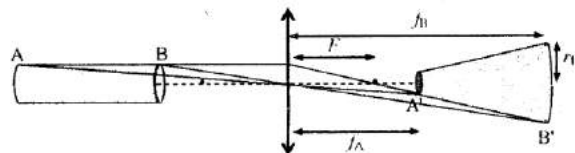


Рис. 1.

З'ясувалося, що у своєму зображенні трубка не тільки деформується, а й наче вивертає-

тсья. Екран слід зробити у вигляді усіченого конуса, і тоді, його зовнішня частина буде жовтою, а внутрішня – блакитною. Відстані до зображень точок  $A$  і  $B$  знаходимо з формули тонкої лінзи.

$$f = \frac{dF}{d-F},$$

$$f_A = \frac{(l+L)F}{l+L-F} = 30 \text{ см},$$

$$f_B = \frac{LF}{L-F} = 60 \text{ см}.$$

Радіуси основ цього конуса знайдемо з виразу для лінійного збільшення:

$$\frac{r_A}{r} = \frac{f_A}{l+L} = \frac{1}{2},$$

$$\frac{r_B}{r} = \frac{f_B}{L} = 2,$$

Отже,

$$r_A = \frac{Fr}{l+L-F} = \frac{1}{2}r,$$

$$r_B = \frac{Fr}{L-F} = 2r.$$

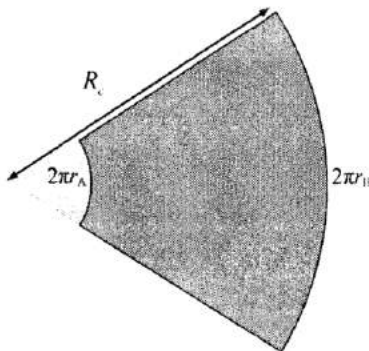


Рис. 2.

Викрійка усіченого конуса має вигляд частини кола, а її площа – різниця площ двох подібних секторів (рис. 2). Оскільки лінійні

розміри секторів відрізняються у 4 рази, їхні площі відрізнятимуться у 16 разів.

Отже, площа усіченого конуса, дорівнює 15/16 від площі великого сектора, радіус якого за теоремою Піфагора (рис. 1) буде:

$$R_c = \sqrt{(f_B - F)^2 + r_B^2} = \frac{F}{L-F} \sqrt{r^2 + F^2} = 41 \text{ см}.$$

Площа цього сектора менша від площі кола радіуса  $F_c$  у стільки разів, у скільки довжина дуги  $2\pi r_B$  менша від довжини кола  $2\pi R_c$ . Тобто,

$$S = \frac{15}{16} \frac{r_B}{R_c} \pi R_c^2 = \frac{15}{16} \pi \left( \frac{F}{L-F} \right)^2 r \sqrt{r^2 + F^2}.$$

Оскільки зображення знаходиться по обидва боки екрана, його загальна площа дорівнює:

$$S_{\text{зобр}} = 2S = \frac{15}{8} \pi \left( \frac{F}{L-F} \right)^2 r \sqrt{r^2 + F^2} \approx 2200 \text{ см}^2.$$

Для збільшення освітленості зображення потрібно просто збільшувати радіус лінзи, доки не почнуть накладатись кольори. Зазначимо, що коли б лінза була меншою від радіуса трубки, ми б взагалі не побачили блакитного кольору на зображенні. Зі збільшенням радіуса лінзи може виникнути ситуація, коли блакитним променям, які утворюють зображення поблизу  $B'$ , стане заважати поверхня екрану поблизу  $A'$ . Вони освітлять зовнішню жовту поверхню біля вузької частини усіченого конуса, так і не доставшись до місць свого фокусування.

Граничний випадок зображено на рис. 3.

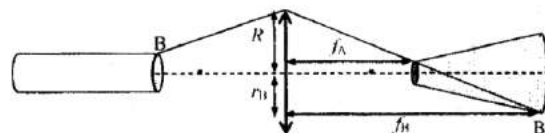


Рис. 3.

Із подібності трикутників знаходимо:

$$\frac{R+r_B}{f_B} = \frac{R-r_A}{f_A},$$

звідси

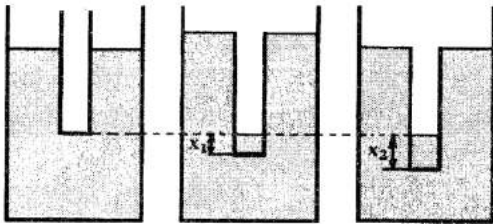
$$R = \frac{r_A f_B + r_B f_A}{f_B - f_A} = 3r = 13,5 \text{ см.}$$

#### Задача 4

Розгляньмо процеси, намалюємо графік. Очевидно, що  $x_2 = h$ .

Робота змінної сили

$$A = \frac{1}{2} F_m x_2 = \frac{1}{2} F_m h.$$



Знайдімо  $h$ . Умова плавання:

$$m = \rho S(H - h),$$

$$M = \rho SH,$$

$$\rho S = \frac{M}{H},$$

$$h = \frac{H(M - m)}{M}.$$

Максимальна сила буде тоді, коли вода дійшла до верху пробірки

$$F_m = Mg - mg,$$

$$A = \frac{1}{2} (M - m)g \frac{H(M - m)}{M},$$

$$A = \frac{1}{2} MgH \left(1 - \frac{m}{M}\right)^2.$$

#### Задача 5

З умови статичної рівноваги

$$m_{Al} \cdot \frac{L}{2} = m_{Cu} \cdot \frac{l}{2}$$

або

$$\rho_{Al} L^2 S = \rho_{Cu} l^2 S.$$

Звідси знаходимо:

$$l = L \sqrt{\frac{\rho_{Al}}{\rho_{Cu}}} \approx 11 \text{ см.}$$

Знайдемо, на яку відстань  $x$  у горизонтальному напрямку зміститься центр мас всієї конструкції після її нагрівання на

$$\Delta t = t - 20 \text{ }^\circ\text{C}$$

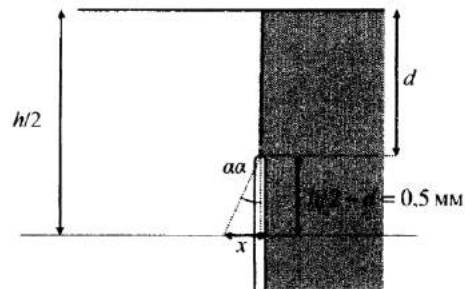
градусів (див. рис.). Довжини алюмінієвої та мідної смужок під час нагрівання на  $\Delta t$  збільшаться і стануть  $L(1 + \alpha_{Al} \Delta t)$  і  $l(1 + \alpha_{Cu} \Delta t)$ , відповідно.

З умови рівноваги відносно нового центра мас маємо:

$$m_{Al} \cdot \left( \frac{L(1 + \alpha_{Al} \Delta t)}{2} - x \right) = m_{Cu} \cdot \left( \frac{l(1 + \alpha_{Cu} \Delta t)}{2} + x \right).$$

Звідси знаходимо, що

$$x = \frac{lL(\alpha_{Al} - \alpha_{Cu})\Delta t}{2(l + L)} \approx 2,1 \cdot 10^{-5} \Delta t \text{ см/}^\circ\text{C}.$$



Для збільшення температури на  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ , кут  $\alpha$  відхилення центру мас від попереднього напрямку буде дуже малим,

$$\text{tg } \alpha = \frac{x}{h/2 - d} = 2,1 \cdot 10^{-3}.$$





На цей кут повернеться вся конструкція (алюмінієвою частиною донизу, мідною догори), оскільки її центр мас перебуватиме у найнижчому положенні, на одній вертикалі з точкою підвісу. За умовою задачі зі зміною температури на  $5\text{ }^\circ\text{C}$  алюмінієва смужка може зміститися рівно на одну позначку. З подібного трикутника знаходимо приблизне значення відстані між рисками  $20$  і  $25\text{ }^\circ\text{C}$ :

$$\Delta y \approx 2,1 \cdot 10^{-3} \cdot L = 0,42 \text{ мм.}$$

За формулою для  $x$  відстані між подальшими рисками будуть майже такими ж.

Для збільшення точності вимірювань температури найкраще було б закріпити на металевій смужці маленьке дзеркальце, площина якого б нахилилася разом з усією конструкцією, і слідкувати за відбитим від дзеркальця променем світла на віддаленому екрані.

Під час розв'язання задачі ми знехтували зміщенням центра мас у вертикальному напрямку, оскільки воно для реалістичних змін температури є дуже малим і на відповідь задачі не впливає.

### 10 клас

#### Задача 1

З умови задачі випливає, що вихідна кількість молекул метану дорівнює кількості молекул кисню. Реакція протікає з неповним згорянням метану – в реакції бере увесь кисень і половина молекул метану.

З рівняння реакції та початкових умов задачі випливає, що утворена кількість молекул води, дорівнює кількості молекул метану у вихідній суміші.

Випадання роси на стінках свідчить про те, що пара за температури  $100\text{ }^\circ\text{C}$  стала насиченою, тобто тиск становив  $1 \cdot 10^5$  Па.

З рівняння  $P \cdot V = N \cdot k \cdot T$  одержуємо кількість молекул води.

Звідси видно, що шукана величина буде:

$$m = (m_1 + m_2) \cdot N,$$

де  $m_1$  – маса молекули метану;  $m_2$  – маса молекули кисню.

Або остаточно

$$m = \frac{P_a \cdot V}{R \cdot T} \cdot (\mu_1 + \mu_2),$$

де  $\mu_1$  і  $\mu_2$  – відповідні молярні маси.

Співвідношення справедливе для граничного випадку.

У загальному випадку

$$m \geq \frac{P_a \cdot V}{R \cdot T} \cdot (\mu_1 + \mu_2).$$

#### Задача 2

Із закону Фарадея для електролізу випливає, що швидкість розчинення електрода прямо пропорційна до сили струму, що проходить крізь електроліт. Отже, щоб одержати відповідь на поставлене запитання, треба знайти відношення сил струмів у двох вказаних у задачі способах приєднання резисторів

$$n = \frac{I_{0,2}}{I_{0,1}}.$$

Спочатку, знайдімо значення опору резистора  $R$ , на якому при цьому з'єднанні одержуємо максимальну потужність.

Оскільки резистори з'єднані паралельно, то напруга на них однакова, тоді, з урахуванням законів Ома, отримуємо значення сили струму через цей резистор:

$$\begin{cases} I_0 = \frac{\varepsilon}{r + \frac{R \cdot k \cdot r}{R + k + r}}, \\ I_0 \frac{R \cdot k \cdot r}{R + k + r} = I_1 R \end{cases}$$

$$I_1 = \frac{\varepsilon}{r + \frac{k+1}{k} R}.$$

За законом Джоуля–Ленца:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= I_1^2 \cdot R = \frac{\varepsilon^2 R}{\left(r + R \frac{k+1}{k}\right)^2} = \\
 &= \frac{\varepsilon^2}{\frac{r^2}{R} + 2 \cdot r \frac{k+1}{k} + R \left(\frac{k+1}{k}\right)^2} = \\
 &= \frac{\frac{k+1}{k} \varepsilon^2}{\frac{r^2}{R} \frac{k}{k+1} + 2 \cdot r + R \left(\frac{k+1}{k}\right)}.
 \end{aligned}$$

Розгляньмо знаменник функції потужності та виділимо в ньому повний квадрат:

$$\begin{aligned}
 f &= \frac{r^2}{R} \frac{k}{k+1} + 2 \cdot r + R \frac{k+1}{k} = \\
 &= \left( \frac{r}{\sqrt{\frac{(k+1)R}{k}}} + \sqrt{\frac{(k+1)R}{k}} \right)^2 = \\
 &= \left( \frac{r}{\sqrt{\frac{(k+1)R}{k}}} - \sqrt{\frac{(k+1)R}{k}} \right)^2 + 4 \cdot r.
 \end{aligned}$$

Бачимо, що потужність буде максимальною, коли знаменник буде мінімальним, тобто коли значення виразу в дужках дорівнює нулю.

Тоді:

$$\frac{r}{\sqrt{\frac{(k+1)R}{k}}} - \sqrt{\frac{(k+1)R}{k}} = 0$$

Знаючи значення опорів, отримусмо струми, які йдуть крізь гальванічний елемент в обох випадках:

$$\frac{r}{\sqrt{\frac{(k+1)R}{k}}} = \sqrt{\frac{(k+1)R}{k}} \Rightarrow R = \frac{k \cdot r}{k+1}.$$

Тоді шукане відношення швидкостей розчинення електродів дорівнює:

$$n = \frac{I_{0,2}}{I_{0,1}} = \frac{2}{k+2}.$$

*Примітки.*

Потрібно зауважити, що для знаходження значення опору  $R$ , функцію потужності можливо було дослідити на екстремум за допомогою похідної, та отримати той самий результат:

$$\begin{aligned}
 P_1 &= \frac{\varepsilon^2 R}{\left(r + R \frac{k+1}{k}\right)^2} \Rightarrow P' = 0, \text{ при} \\
 \left(r + R \frac{k+1}{k}\right)^2 - 2 \cdot R \cdot \left(r + R \frac{k+1}{k}\right) \cdot \frac{k+1}{k} &= 0 \\
 R &= \frac{k \cdot r}{k+1}.
 \end{aligned}$$

### Задача 3.

Щоб знайти величину відносної швидкості  $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$ , можна, наприклад, записати координати векторів у системі координат, вісь  $OX$  якої спрямована на південь, вісь  $OY$  – на схід, а вісь  $OZ$  – догори:

$$\vec{v}_1 = (v_1 \cos 15^\circ; 0; v_1 \sin 15^\circ),$$

$$\vec{v}_2 = (0; v_2 \cos 75^\circ; v_2 \sin 75^\circ).$$

Тоді

$$\vec{v}_2 - \vec{v}_1 = (-v_1 \cos 15^\circ; v_2 \cos 75^\circ; v_2 \sin 75^\circ),$$

а модуль відносної швидкості

$$|\vec{v}_2 - \vec{v}_1| = \sqrt{((-v_1 \cos 15^\circ)^2 + (v_2 \cos 75^\circ)^2 + (v_2 \sin 75^\circ - v_1 \sin 15^\circ)^2)} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2 - \frac{v_1 v_2}{2}}$$

Підставляючи числові зміни, знаходимо:

$$|\vec{v}_2 - \vec{v}_1| = 800 \text{ м/с}.$$

Значимо, що відносна швидкість у процесі руху не змінюється, оскільки, завдяки однако- вому пришвидшенню, доданки, до яких вхо- дить час, скорочується

$$\begin{aligned} \vec{v}_2(t) - \vec{v}_1(t) &= \\ &= (\vec{v}_2 + \vec{g}t) - (\vec{v}_1 + \vec{g}t) = \\ &= \vec{v}_2 - \vec{v}_1 \end{aligned}$$

Це означає, що відносно системи відліку, яка рухається з пришвидшенням  $\vec{g}$ , рух сна- рядів виглядатиме прямолінійним і рівномір- ним. Для зручності перейдемо у систему від- ліку першого снаряду. Він увесь час знаходи- тиметься на початку координат, а положення другого снаряду визначатиме вектор

$$\vec{r} = \vec{r}_0 + (\vec{v}_2 - \vec{v}_1)t.$$

Квадрат цього радіус-вектора

$$\begin{aligned} r^2 &= r_0^2 + 2r_0|\vec{v}_2 - \vec{v}_1| \cdot t \cos \gamma + \\ &+ |\vec{v}_2 - \vec{v}_1|^2 t^2 \end{aligned}$$

дорівнює квадрату відстані між снарядами у довільний момент часу, тобто:

$$\begin{cases} r_1^2 = r_0^2 + 2r_0|\vec{v}_2 - \vec{v}_1| \cdot t_1 \cos \gamma + |\vec{v}_2 - \vec{v}_1|^2 t_1^2 \\ r_2^2 = r_0^2 + 2r_0|\vec{v}_2 - \vec{v}_1| \cdot t_2 \cos \gamma + |\vec{v}_2 - \vec{v}_1|^2 t_2^2 \end{cases}$$

Помножимо перше рівняння на  $t_2$ , друге – на  $t_1$  і віднімемо, щоб позбутися кута  $\gamma$  між вектором  $\vec{r}_0$ , який з'єднує першу гармату з дру- гою, і відносною швидкістю  $\vec{v}_2 - \vec{v}_1$  снарядів. Відстань між гарматами (вона ж і відстань між снарядами у початковий момент часу) буде:

$$\begin{aligned} r_0 &= \sqrt{\frac{t_2 r_1^2 - t_1 r_2^2}{t_2 - t_1} + |\vec{v}_2 - \vec{v}_1|^2 t_1 t_2} = \\ &= 400\sqrt{6} \text{ м} = 980 \text{ м} \end{aligned}$$

Кут  $\gamma$  знаходимо з виразу

$$\cos \gamma = -\frac{3\sqrt{6}}{8}.$$

Для довільного моменту часу  $t$  квадрат від- стані між снарядами можна записати у зручні- шому для аналізу вигляді шляхом виділення повного квадрата:

$$r_2 = r_0^2 \sin^2 \gamma + (r_0 \cos \gamma + |\vec{v}_2 - \vec{v}_1|t)^2.$$

Відстань між снарядами набуває наймен- шого значення у момент часу

$$t = -\frac{r_0 \cos \gamma}{|\vec{v}_2 - \vec{v}_1|} = \frac{400\sqrt{6} \cdot 3\sqrt{6}}{8 \cdot 800} \text{ с} = \frac{9}{8} \text{ с},$$

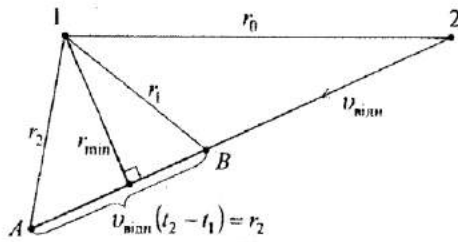
коли повний квадрат у виразі для  $r^2$  дорівнює нулеві, а найменша відстань буде:

$$\begin{aligned} r_{\min} &= r_0 \sin \gamma = 400\sqrt{6} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{3\sqrt{6}}{8}\right)^2} \text{ м} = \\ &= 100\sqrt{15} \text{ м} = 387 \text{ м} \end{aligned}$$

Значимо, що незмінність відносної швид- кості не зумовлює рівномірний характер змі- ни відстані, як може здатися на перший пог- ляд. У цьому легко переконатися, якщо уяви- ти автомобіль, який рівномірно проїжджає повз нас. Зміна відстані до нього не рівномір- на, хоча його відносна швидкість має сталє значення.

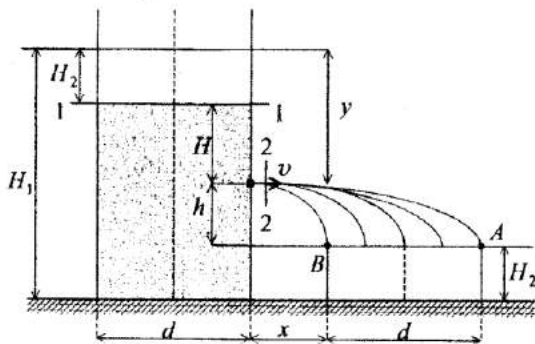
На цій ідеї можна побудувати наочніше роз- в'язання цієї задачі. У системі відліку першого снаряда, другий пролітає повз нього зі швид- кістю 800 м/с вздовж деякої прямої. Оскільки за кожен секунду він проходить 800 м, отри- муємо рівнобедрений трикутник А1В (див. мал.). З цього трикутника відразу знаходимо

$$r_{\min} = 100\sqrt{15} \text{ м}, \text{ а тоді } r_0 = 400\sqrt{6} \text{ м}.$$



**Задача 4.**

Струмінь води, що вилітає з отвору, має потрапляти у другу посудину. Оскільки отвір малий, то швидкістю опускання води в посудині можна знехтувати.



З рівняння Бернуллі для перерізів 11 і 22 отримаємо:

$$P_0 + \rho g H = P_0 + \frac{\rho v^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{2gH} . \quad (1)$$

У початковий момент

$$v_A = \sqrt{2gy} \quad (2)$$

струмінь попадає у точку A.

У кінцевий момент

$$v_B = \sqrt{2g(y - H_2)} \quad (3)$$

струмінь попадає у точку B.

Діяльність польоту струменя

$$S = vt . \quad (4)$$

Під час падіння елементарна маса струменя змінює висоту на величину

$$h = H_1 - H_2 - y . \quad (5)$$

Час вільного падіння елементарної маси:

$$t = \sqrt{\frac{2(H_1 - H_2 - y)}{g}} . \quad (6)$$

Для точки B маємо:

$$S = 2\sqrt{(y - H_2)(H_1 - H_2 - y)} . \quad (7)$$

Значення y треба вибрати таким, щоб у кінцевий момент, коли  $x = S$ , значення S було максимальним. Під коренем відносно у маємо рівняння параболи, гілки якої направлені донизу. Коренями параболи є:  $y_1 = H_2$ ,  $y_2 = H_1 - H_2$ . Тому максимальне значення S, що дорівнює x, буде при

$$y = \frac{y_1 + y_2}{2} = \frac{H_1}{2} . \quad (8)$$

Отже, згідно з виразом (7) найбільша відстань між посудинами буде

$$x = 2\sqrt{\left(\frac{H_1}{2} - H_2\right)\left(H_1 - H_2 - \frac{H_1}{2}\right)} = H_1 - 2H_2$$

При цьому має виконуватись умова:

$$\frac{H_1}{2} > H_2 ,$$

інакше повністю наповнити нижчу посудину не можливо.

Вибором параметра d забезпечимо потрапляння струменя в нижчу посудину в початковий момент зливу у точку A. У цьому випадку

$$H = y = \frac{H_1}{2} ,$$



тому

$$S_0 = 2\sqrt{\frac{H_1}{2}\left(H_1 - H_2 - \frac{H_1}{2}\right)} = \sqrt{H_1(H_1 - 2H_2)}$$

Отже, мінімальний діаметр дорівнюватиме

$$d = S_0 - x = \sqrt{H_1(H_1 - 2H_2)} - (H_1 - 2H_2).$$

Відтак,

$$y = \frac{H_1}{2},$$

$$x = H_1 - 2H_2,$$

$$d = \sqrt{H_1(H_1 - 2H_2)} - (H_1 - 2H_2)$$

за умови, що

$$\frac{H_1}{2} > H_2.$$

### Задача 5.

Посудина з льодом отримує тепло в результаті двох процесів: теплообміну з повітрям і конденсації дифундуючих на стінки посудини молекул води (саме результат другого процесу можна спостерігати, коли холодні предмети “запотівають”). Кількість теплоти, яку посудина з льодом отримує за рахунок теплообміну з повітрям, прямо пропорційна до різниці температур між повітрям і льодом і часу процесу. Тому можемо записати:

$$Q_{\text{тепл.}} = \alpha \cdot \Delta t \cdot \tau,$$

де  $\alpha$  – коефіцієнт теплообміну.

Потік молекул води за рахунок дифузії на стінки посудини постійний (за умовою задачі), тому маса води, що конденсувалась, прямо пропорційна до часу процесу

$$m = \beta \cdot t,$$

де  $\beta$  – коефіцієнт дифузії.

В обох випадках  $\beta$  вважатимемо однаковим, оскільки температури повітря відрізняються мало. Встановивши це, можемо пов'язати час танення льоду у першому і другому випадках:

$$\frac{\tau_1}{\tau_2} = \frac{m_1}{m_2}.$$

Запишемо рівняння балансу тепла для випадків танення льоду ( $\Delta t_1 = 20^\circ \text{C}$  і  $\Delta t_1 = 30^\circ \text{C}$ )

$$\begin{cases} \alpha \Delta t_1 \cdot \tau_1 + L \cdot m_1 = \lambda \cdot M \\ \alpha \Delta t_2 \cdot \tau_2 + L \cdot m_2 = \lambda \cdot M. \end{cases}$$

Перепишемо їх у вигляді:

$$\begin{cases} \alpha \Delta t_1 \cdot \tau_1 = \lambda \cdot M - L \cdot m_1 \\ \alpha \Delta t_2 \cdot \tau_2 = \lambda \cdot M - L \cdot m_2. \end{cases}$$

Розділивши рівняння одне на інше, одержимо для невідомої маси льоду рівняння:

$$\frac{\Delta t_1 \cdot \tau_1}{\Delta t_2 \cdot \tau_2} = \frac{\lambda \cdot M - L \cdot m_1}{\lambda \cdot M - L \cdot m_2}.$$

Звідси для маси льоду в посудині матимемо:

$$M = \frac{L \cdot m_1 \cdot m_2 \cdot (\Delta t_2 - \Delta t_1)}{\lambda \cdot (m_2 \Delta t_2 - m_1 \Delta t_1)} = 460 \text{ г}.$$

## ВМІННЯ ЧИТАТИ СПРИЯЄ РОЗВИТКОВІ ГОЛОВНОГО МОЗКУ ЛЮДИНИ

Науковці з французького Національного інституту здоров'я і медичних досліджень з'ясували як впливає вміння читати на функціонування мозку людини. Дослідження проводили з людьми, що зовсім не вміли читати; що навчилися читати в дорослому віці, й тих, хто навчився читати в дитинстві. За допомогою функціональної магнетно-резонансної томографії науковці сліdkували за реакцією мозку на різні стимули, зокрема, на зображення обличчя та інші об'єкти, усні й друковані тексти, математичні задачі. Дослідники з'ясували, що вміння читати дуже сильно впливає на реакцію мозку. Воно ускладнює організацію зорової зони головного мозку. У людини, яка вміє читати, майже вся сітка нейронів, що відповідає за сприйняття усної мови, у лівій півкулі активізується друкованим текстом. Вміння читати позитивно впливає на формування мови, підсилює роботу тієї частини мозку, що відповідає за слух.

Отже, читання, будучи відносно недавнім культурним винаходом, по ефективності прирівнюється із найеволюційнішим розвитком каналу комунікації людини – мовою.



## ДО ПАМ'ЯТІ ЙОАХІМА ТЕЛЬТОВА

**Манфред Ахіллес,**  
*професор (Німеччина)*



*Йоахим Тельтов (09.06.1913–02.07.2010) (ліворуч)  
Олександр Проскура (16.12.1936–30.09.2007)  
(в центрі) та Манфред Ахіллес (праворуч)  
(Берлін, лютий 2007 р.)*

**Б**ог благословив його на довге життя. Чи його життя, як фізика, було щасливе, я не знаю, оскільки вперше познайомився з ним лише три роки тому. Пов'язав його зі мною на 10 років старший Остап Стасів, з яким він познайомився ще 1939 року в Геттінгені. Вони прийшли з різних інститутів: Стасів – з Першого, Тельтов – з Другого. Стасів розумів, що як українець, у німецькому рейху він не мав жодних шансів отримати посаду професора, тому поїхав до Дрездена працювати в промисловості.

Мабуть, він відчував особисту прихильність до молодого Тельтова. Коли закінчилася Друга світова війна, вони залишилися працювати в Дрездені, хоча місто було вщент зруйноване. Тельтов докладно описав ті часи для фізики в Німецькій Демократичній Республіці у праці “Адлерсгоферський розкол”. Я не відчув нічого подібного. Кордон між двома ні-

мецькими державами був закритий. У НДР кожна наукову дрібницю тримали в тасмниці. Вони нам нічого не розповідали, а ми, як правдиві “західняки”, не цікавилися над чим працювали науковці в НДР.

Ситуація змінилася, коли мене 2003 року запросили до Львівського національного університету імені Івана Франка на конференцію, присвячену 100-річчю від дня народження Остапа Стасіва. Відтоді зв'язків із Україною я не пориваю, хоча я людина літнього віку й мені вже 83 роки.

О. Стасів потоваришував з Й. Тельтовим, оскільки йому це було дуже важливо. Стасів народився в Україні, справді добре розмовляв німецькою мовою, але мав проблеми з граматиною й іншими важкими висловами німецької літературної мови, коли писав. У численних наукових публікаціях вони могли справити погане враження. Він попросив допомоги у Тельтова і той редагував його статті німецькою мовою на високому рівні. Він робив це упродовж багатьох років. Тому немає впевненості, чи статті Стасіва можуть частково належати й Тельтову.

Коли 2007 року у мене вдома ми з Тельтовим спільно писали доповідь про Стасіва “Фізика на Сході і Заході”, Тельтов зауважив, що я пропускаю граматичні помилки.

Праці Тельтова і Стасіва насамперед стосувалися фотографічного процесу. Цю тему Стасів привіз з інституту Поля, керівником якої він був не дуже довго. На жаль, нині ця тема не актуальна, оскільки цифрова фотогра-



фія завдяки великій швидкості та точності стала домінувати на ринку.

До зведення Берлінської стіни 1961 року обос брали участь у двох чергових щорічних сесіях Фізичного товариства, де спілкувалися з багатьма західними колегами.

Згодом, коли свобода пересування була обмежена, вони часто замислювалися: чи залишитися у Східній Німеччині чи виїхати. Науковці вирішили залишитися. Молоді фізики з великим ентузіазмом могли набагато більше зробити, якби самі не вирішили залишитися там!

Жартували, що в Інституті Адлерсгофа панувала "організована дезорганізація". Це Стасів привіз з Інституту Поля, де казали: "З мотузками і липким воском експериментувати краще".

*Переклад з німецької Г. Шопи*

Приголомшливу звістку я почув від Тельтова, якого знав лише коротко, незадовго до його смерті!

У січні 2010 року задзвонив телефон, і чоловічий голос повідомив: "Я син Йоахіма Тельтова, мій батько хоче з Вами порозмовляти. На жаль, він хворий".

Тоді Й. Тельтов зламаним, ледь чутним голосом, запитав:

– Де цьогорічний Різдвяний лист\*?

Можливо, Ви вже знаєте про мої щорічні повідомлення на Різдво. Я забув відправити листа йому одному, це був лист про Річарда Фейнмана. Я побіг до поштової скриньки, щоб надолужити згаяний час. Прийшов лист якраз вчасно...

Фізики належать до однієї великої родини.

9 серпня 2010 р.,  
Берлін

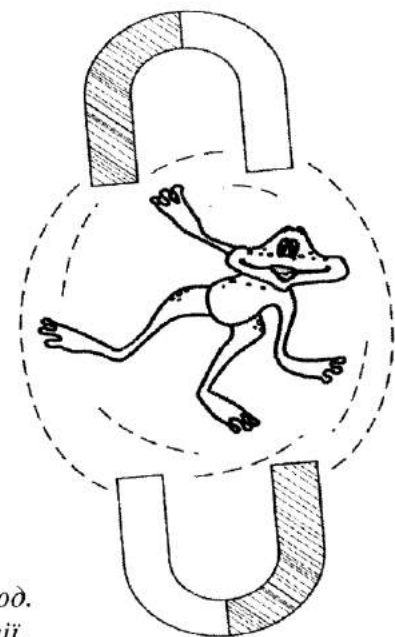
\*Професор Манфред Ахіллес упродовж багатьох років вітає своїх колег та знайомих із Різдвяними святами листами, в яких розповідає про відомих фізиків та їхні наукові досягнення. У видавництві "Свросвіт" 2007 року вийшла з друку книжка Манфреда Ахіллеса "Різдвяні листи про знаменитих фізиків" (німецькою мовою).

## ЧИ ЗНАЄТЕ ВИ, ЩО

### Лавреат Шнобелівської премії за десять років став Нобелівським лавреатом з фізики!

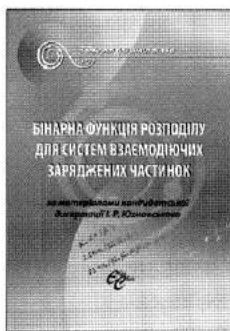
Андрій Гейм 2000 року став лавреатом Шнобелівської премії, яку заснував американський науково-сатиричний журнал "Щорічний журнал неймовірних досліджень" (*Annals of Improbable Research*). Нею нагороджують за найбезглуздіші та найкурійозніші наукові відкриття. А. Гейм із колегами з Неймегенського університету (Нідерланди) одержали цю нагороду за відомі експерименти з жабою, що літала у повітрі. Жабу розміщали над надпровідною катушкою. Потужне магнетне поле діяло на клітини жаби, створюючи в них магнетний момент, який відштовхувався від магнетного поля катушки. Відтак, створювали сили, що зрівноважували силу тяжіння. Завдяки цьому жаба левітувала.

Шнобелівська премія не передбачає ніяких грошових винагород. Самі лавреати оплачують витрати на церемонію вручення премії.



## Серія “З ДЖЕРЕЛ ФІЗИЧНОЇ НАУКИ”

**Бінарна функція розподілу для систем взаємодіючих заряджених частинок (За матеріалами кандидатської дисертації І. Р. Юхновського).** – Львів: Євросвіт, 2010. – 168 с: іл.



Перша книжка серії “З джерел фізичної науки” містить український переклад тексту і матеріали дисертації І.Р. Юхновського на здобуття наукового ступеня кандидата фізико-математичних наук. У цій роботі застосовано метод розвинень за плазмовим параметром, який запропонував М.М. Боголюбов, до розрахунку бінарної функції розподілу для систем заряджених частинок. Отримано загальні вирази, що містять замість вихідних потенціалів кулонівської взаємодії екрановані потенціали і дають змогу коректно врахувати ефекти далекодії.

Для студентів, аспірантів та науковців, які спеціалізуються в галузі теоретичної фізики та фізики конденсованої речовини.

**Островський А. Л., Клим С. А., Островська О. А. Методи врахування атмосферних впливів на астрономо-геодезичні виміри.** – Львів: Євросвіт, 2010. – 224 с.: Іл.

Монографія є підсумком багаторічної праці професора А. Л. Островського та його учнів в галузі рефрактометрії. Книжка містить методи врахування рефракції, підтвержені практикою.

Розв’язок складних фізичних задач рефрактометрії вкрай ускладнене швидкими і значними змінами поля показника заломлення (поля рефракції) у часі і просторі. Не випадково багаторічні дослідження не привели до кінцевого розв’язку поставлених задач, хоча вертикальну рефракцію вивчають уже понад 300 років, горизонтальну (бокову) – понад 150, нівелірну – понад 100, і навіть дію атмосфери на фізичні методи вимірювання відстаней вже вивчають декілька десятків років.

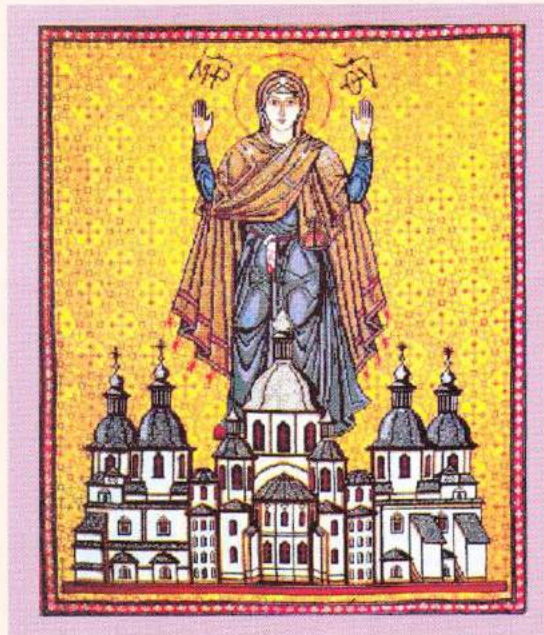
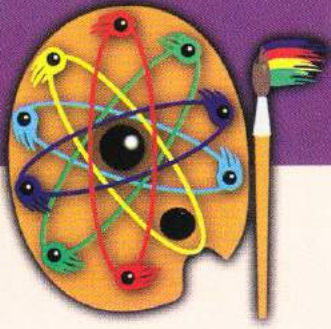
Видання є вшануванням пам’яті видатного вченого, Заслуженого діяча науки і техніки України А. Л. Островського.

**ШАНОВНІ ЧИТАЧІ!**

**Не забудьте передплатити науково-популярний журнал “Світ фізики”, попередні числа видання можна замовити в редакції журналу за адресою:**

**вул. Саксаганського, 1,  
м. Львів, 79005, а/с 6700;  
phworld@franko.lviv.ua**





**Дмитро Блажейовський**  
**"Оранта"**

*Відродження традиції вишиваних ікон для храмів і домівок наприкінці ХХ сторіччя пов'язане з ім'ям відомого греко-католицького священника отця Дмитра Блажейовського, який 21 серпня 2010 р. святкував 100-річчя від дня народження. Перші роки життя проходили у Вислоці Горішній (повіт Сянік на Лемківщині). Навчався він у гімназії в Перемишлі у 1922–1930 рр. Філософію, теологію та історію студіював у Римі у 1933–1946 рр. Свячення одержав 2 квітня 1939 року в Римі. У 1946–1973 рр. працював священником у різних парафіях в Америці.*

*Від 1973 року займався науковою працею у Римі. Видав друком вісімнадцять наукових праць і десять статей з церковної історії та десять збірок зразків українських вишивок. Поза науковою працею одночасно почав вишивати ікони. О. Блажейовський розпочав пошуки зразків ікон на хоругви, фелони тощо. Але багато не знайшов. Тоді взявся самотужки їх розробляти, а тоді вишивати. З роками о. Блажейовський став професіональним вишивальником. Його твори прикрашають українські храми України, США, Канади, Німеччини, Італії, Франції, Австралії, Швеції, Аргентини, Бразилії.*

*Митець видав у Римі та Львові десять альбомів «Українські релігійні вишивки» з текстами українською та англійською мовами й ілюстраціями та поясненнями щодо того, як опанувати різні техніки вишивання ікон. У передмові до першого альбому (1979) о. Блажейовський писав: «Українські церкви і родинні дома у вільному світі є в середовищі інших культур, що пригнічують українську культуру та українські традиції. Нам треба протиставитися цим небезпечним впливам і асиміляції. Наша культура давня, відрізняє нас від інших, має свою красу. Під багатьма оглядами другої такої немає. Наші батьки берегли її сторіччями, попри поневолення і наступ чужих культур. Будьмо сильні, як були наші прадіди. Вільні у вільному світі, бережим пильно нашу культуру і наші традиції, плекаймо їх і словом і ділом».*

*Дмитро Блажейовський багато разів відвідав рідний край, побував у Києві, де виставляв свої ікони в Українському національному музеї та Українському домі.*

*У Львові 6 червня 1999 року урочисто було відкрито Музей вишиваних ікон та образів о. Блажейовського. Це перший такого роду приватний музей не лише у Львові, а й в Україні.*