

СВІТ

ФІЗИКИ

№2
2006

науково-популярний журнал

До 150-річчя
від народження
ІВАНА ФРАНКА



*Хоч хто мудрий у житті, а письма не знає,
То він буде, мов той пліт, що підпор не має.
Бо як пліт той без підпор вітер валить скорий,
Так безграмотний паде без знання підпори.*

Іван Франко

ЄВРОПЕЙСЬКЕ ФІЗИЧНЕ ТОВАРИСТВО

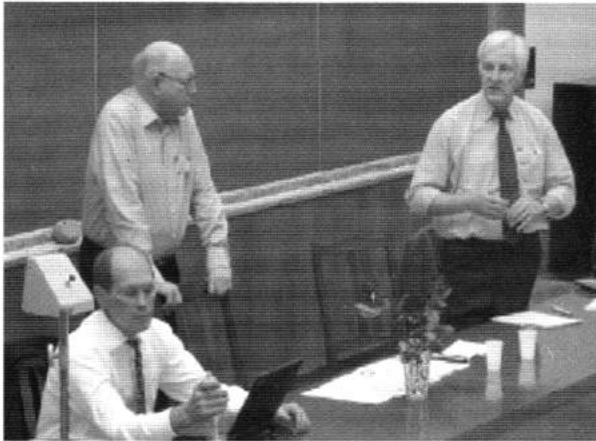
знайомиться з досягненнями та проблемами
української фізичної науки

Європейське фізичне товариство створено 1968 року. Сьогодні воно налічує 80 тисяч членів із 38 національних фізичних товариств, 3500 індивідуальних членів, а також деякі академічні й дослідницькі інституції входять як асоційовані члени. Очолює ЕФТ Виконавчий комітет. Рада товариства, яка збирається раз на рік, визначає стратегічні напрями діяльності товариства.

23–24 червня 2006 р. у м. Києві в Київському національному університеті ім. Т. Г. Шевченка відбулася виїзна сесія Виконавчого комітету Європейського фізичного товариства. У роботі брали участь президент Європейського фізичного товариства Ове Полсен (Ove Poulsen), колишній президент ЕФТ Мартін Губер (Martin C. E. Huber), віце-президент ЕФТ Фрітц Вагнер (Fritz Wagner), генеральний секретар



Президент Європейського фізичного товариства Ове Полсен (Ove Poulsen)



Під час засідання. Генеральний секретар ЕФТ Девід Лі, колишній президент ЕФТ Мартін Губер і віце-президент ЕФТ Фрітц Вагнер (зліва направо)

ЕФТ Девід Лі (David Lee),

Мачей Кольвас (Maciej Kolwas) (колишній президент Польського фізичного товариства), президент Білоруського фізичного товариства Сергій Кілін, президент Молдавського фізичного товариства В. Канцер, Пітер Мелвіл (Peter Melville) із Інституту фізики (Велика Британія), голова комітету Схід-Захід ЕФТ Ярослав Надрчал (Jaroslav Nadrchal) (Чеська Республіка), голова Українського фізичного товариства Володимир Литовченко, члени Українського фізичного товариства, відомі фізики України, серед них Ігор Юхновський, Анатолій Загородній, Антон Наумовець, Михайло Бродин, Віктор Бар'яхтар, Вадим Локтев, Ігор Стасюк, Валерій Ящук, Пауль Пшенічка, Галина Шопа та інші.

Представники ЕФТ ознайомилися з досягненнями української фізичної науки, обговорили пер-

спективи співпраці українських та західних науковців, проблеми популяризації фізики, долучення українських науковців до міжнародного інформаційного простору.

Галина Шопа, редактор журналу "Світ фізики", доповіла про проблеми популяризації фізики в Україні. Низький рівень зацікавленості фізикою, за словами західних колег, також притаманний нині усім європейським країнам.



Учасники Виїзної сесії Європейського фізичного товариства біля фізичного факультету Київського національного університету імені Т. Г. Шевченка (24 червня 2006 року, м. Київ)

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:

Олекса Біланюк

Михайло Бродин

Петро Голод

Семен Гончаренко

Ярослав Довгий

Іван Климишин

Юрій Ключковський

Богдан Лукіянець

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. Саксаганського, 1,

м. Львів 79005, Україна

тел. у Львові 380 (0322) 96 46 73

у Києві 380 (044) 416 60 68

phworld@franko.lviv.ua; sf@ktf.franko.lviv.ua

www.franko.lviv.ua/publish/phworld

Іван Франко і Львівський університет

"Велич Івана Франка зростала на українській землі і щедро плекалася національною культурою. Її ростові сприяли вселюдські культури та світові філософії.

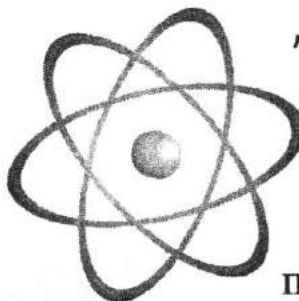
Іван Франко мусив здолати шлях і виконати титанічну роботу, яка під силу лише геніям, для витворення тих першопринципних основ, на яких тримається сьогодні велична будова української культури.

Доля пророків важка і трагічна. Іван Франко як явлення національного інтелекту, як Академія наук в одній особі не зробив академічної кар'єри, його не допускають до кафедри Львівського університету. Це була кривда не лише Франкові, це була кривда цілій нації.

Але незабаром письменника називатимуть українським Мойсеєм, Пророком, велетнем думки і праці, Поетом честі, а Львівський університет наречуть його ім'ям..."

Іван Вакарчук,
ректор Львівського
національного університету
імені Івана Франка

*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

Гросс Девід. Майбутні революційні зміни у фундаментальній фізиці

Проскура Олександр. Дослід К. Девіссона та Л. Джермера з дифракції електронів. Етап становлення хвильової механіки

2. Фізика України

Вона любила спектри. До 100-річчя від дня народження єдиної в Україні жінки академіка-фізика Антоніни Федорівни Прихотько

3. Фізика світу

У пам'ять дослідника космічних нейтрино Раймонда Девіса

Шопа Галина. Андрій Сахаров – моральне сумління науковців

4. Олімпіади, турніри...

Умови задач XLIII Всеукраїнської олімпіади з фізики (Одеса, 2006 р.)

Орлянський Олег. За лаштунками олімпіади Розв'язки задач III (обласного) етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики (Львів, 2006) (10–11-й класи)

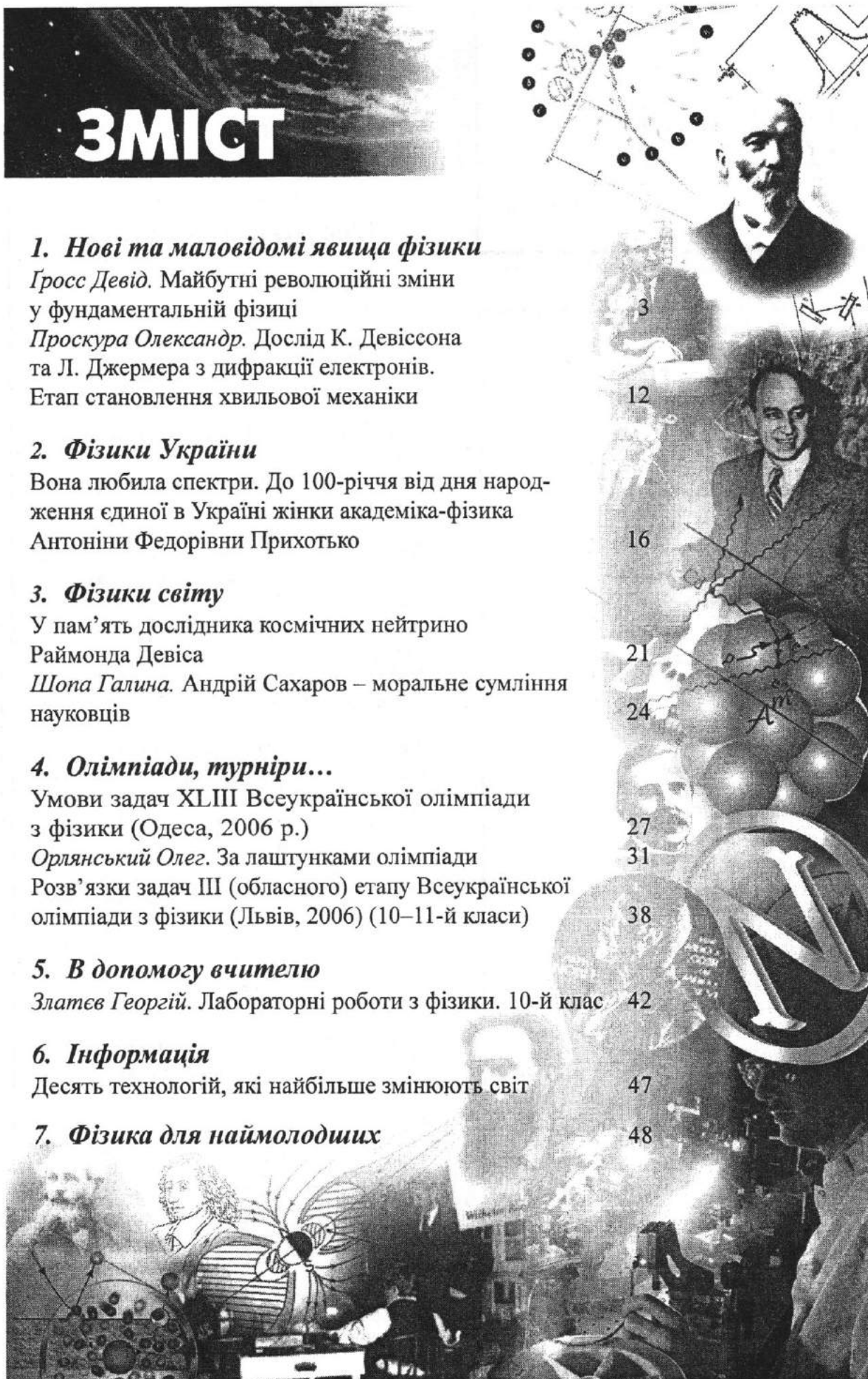
5. В допомогу вчителю

Златев Георгій. Лабораторні роботи з фізики. 10-й клас

6. Інформація

Десять технологій, які найбільше змінюють світ

7. Фізика для наймолодших





Пропонуємо нашому читачеві публічну лекцію Девіда Джонатана Гросса, з якою він виступив у травні 2006 року в Президії Російської академії наук перед студентами, науковцями та широким загалом у Московському фізико-технічному інституті. Публічні лекції – це один із способів підтримання зацікавлення людей наукою, коли відомості про найновіші досягнення науки можна одержати з уст провідних учених світу. Д. Гросс є директором Інституту теоретичної фізики Кавлі при Університеті штату Каліфорнія (Санта Барбара). Він із Девідом Політцером і Френком Вілчеком був нагороджений Нобелівською премією з фізики 2004 року за відкриття асимптотичної свободи в теорії сильних взаємодій. Його лекція присвячена революційним змінам, яких, можливо, очікує фізику в недалекому майбутньому.

Матеріали до журналу подав студент 2-го курсу Московського фізико-технічного інституту, випускник Львівського фізико-математичного ліцею при Львівському національному університеті імені Івана Франка, переможець фізичних олімпіад, різного рівня Василь Альба. Він є студентом теоретичної групи кафедри фізики елементарних частинок при Державному науковому центрі Російської Федерації “Інститут теоретичної та експериментальної фізики ім. Аліханова”.

Майбутні революційні зміни в фундаментальній фізиці

Поміркуємо про теорію струн. Насамперед спробуємо вмотивувати спробу об'єднати разом всі сили природи. Далі обговоримо базову структуру теорії струн, яка підносить нам несподіванки, досягнуті за її допомогою успіхи і очікування, які поки-що не збулись. І, зрештою, поміркуємо про перевероти у фундаментальній фізиці, які пропонує теорія струн.

Чому виникла теорія струн?

Наприкінці ХХ сторіччя ми мали завершену й досить успішну теорію фізики елементарних частинок, яка описувала три з чотирьох фундаментальних сил, що діють у природі: електромагнетну, слабку ядерну та сильну ядерну взаємодії. В основі нашого розуміння фізики елементарних частинок лежить квантова теорія поля, тобто, квантово-механічна теорія локальних полів.

Як впливає із Стандартної теорії фізики елементарних частинок, а саме, з теорії електро-слабких взаємодій і квантової хромодинаміки

(КХД), квантова теорія поля, наскільки можна вважати, теоретично описує всі сили, які ми спостерігаємо в природі. Стандартна модель дуже успішна і добре перевірена. Сотні експериментів, які проведено, здебільшого, на пришвидшувачах елементарних частинок, дали змогу проникнути в структуру матерії на віддалі до 10^{-18} см (мільярдні долі мільярдних часток сантиметра). І в усіх цих експериментах теорія-модель – працює дуже добре. Точність експериментальної перевірки Стандартної моделі надзвичайно висока. У випадку квантової електродинаміки (КЕД), ми деколи можемо перевірити теоретичне передбачення з точністю до одиниці на 10^{10} – дивовижне досягнення з погляду експерименту і теорії. У випадку об'єднаної теорії електрослабких взаємодій точність експериментальних перевірок теорії деколи наближається до одиниці на 100 000. І навіть у випадку сильних взаємодій маємо нині точність експериментальної перевірки передбачень КХД з похибкою менше від одного відсотка, які наближаються в деяких експериментах до одної тисячної.



Отже, Стандартна модель на основі квантової теорії поля надзвичайно успішна. До того ж, не має ніяких підстав припускати, що ця загальна концептуальна модель (квантова теорія поля) не працює аж до масштабів, співмірних до довжини Планка (де починають виявлятися квантові ефекти гравітації), яка становить майже 10^{-33} см.

Завершення теоретичного розроблення Стандартної моделі – одне з найбільших наукових досягнень природничих наук ХХ сторіччя. Розвинуто всеохоплюву теорію усіх негравітаційних сил, які діють у природі, яка працює в інтервалі віддалей, починаючи з довжини Планка і закінчуючи розмірами Всесвіту, тобто такі, що відрізняються на 60 порядків! Здавалося б, все йде чудово...

Запитання

Однак дослідження на передньому краї фундаментальної фізики з успіхом Стандартної моделі на закінчуються. Ми не можемо бути задоволені лише Стандартною моделлю, оскільки вона не вирішує деякі питання, багато з яких хоча й впливають із самої Стандартної моделі, не можуть, з нашого погляду, бути вирішені в межах квантової теорії поля. Наприклад, усі сили, які керують фізикою елементарних частинок, контролюються калібрувальними полями, що описуються теоріями неабелевих полів Янга-Міллса. А за що теорія Янга-Міллса заслужила такого особливого положення? У межах квантової теорії поля можна уявити собі й багато інших видів взаємодій. Чому вони не виявляються? У Стандартній моделі ми не можемо просто взяти і розрахувати напруженість полів і заряди всіх сил. Наприклад, постійна тонкої структури, що визначає інтенсивність електричного силового поля, визначають виключно шляхом вимірювань. Ми уяви не маємо, чому вона дорівнює $1/137$.

Щодо структури фундаментальних складників матерії – кварків і лептонів. Ми відкрили для себе три (а чому саме три?) сімейство кварків і лептонів із дуже дивними масами і змішуваннями. Ми не маємо жодного пояснення такої структури мас і змішувань або, якщо вже на те пішло, не знаємо й самої причини існування матерії.

Також у підсумку нам доведеться долучити до всієї цієї історії квантову теорію гравітації (чому

цього не уникнути – ми ще побачимо), ми передбачаємо неминучі нові запитання. Деякі з них носять насамперед практичний характер: наприклад, як квантувати гравітаційне поле? Деякі запитання прийнято відносити до категорії філософських: наприклад, чому простір тримірний (і чи справді він тримірний)?

Одержати відповіді на всі ці запитання важливо не просто ради задоволення нашої цікавості, а й тому, що без цих відповідей ми не зрозуміємо джерела і першооснови Всесвіту. Ми не бачимо способів одержання відповідей на ці запитання ні в межах Стандартної моделі, ні в межах простих розширень Стандартної моделі. Це наводить на думку, що на надмалих віддальях або при надвисоких енергіях починають діяти принципово нові фізичні закони. Повертаючись до часів ще гарячого і щільного Всесвіту і вищих енергій частинок, ми неминуче впираємося в точку, починаючи з якої фізика, як ми думаємо, стане іншою.

Вихід за межі Стандартної моделі

Упродовж останніх тридцяти років, відразу по завершенні Стандартної моделі, ми намагались одержати відповідь на ці запитання, однак без особливого успіху. Подібно, у межах Стандартної моделі (насправді, і квантовій теорії поля) відповіді на ці запитання нам не одержати. Щоб намагатися піти далі Стандартної моделі та відповісти на ці запитання, потрібні нові експерименти на надмалих віддальях і за надвисоких енергій. Однак це і важко, і дорого. Нині нам недоступні експерименти за енергій вище від 1 TeV (мільйон мільйонів електрон-вольт). Але нічого не заважає теоретикам екстраполювати Стандартну модель на все вищі енергії та подивитися, що з цього вийде. Незадовго до завершення Стандартної моделі теоретики екстраполювали силові взаємодії до дуже високих енергій.

Уся різноманітність сил ґрунтується на неабелевій калібрувальній теорії Янга-Міллса. Однак за низьких енергій сили ці виявляються порізнному. Сильні взаємодії дуже інтенсивні, тоді як слабкі та електромагнетні взаємодії виявляються в значно меншій степені. Однак у квантовій теорії поля усі сили залежать від віддалі. Це наслідок квантових властивостей вакууму, який по-



дамо у вигляді динамічного середовища, заповненого віртуальними квантами. Такий вакуум може екранувати заряди, що і відбувається у випадку електромагнетної взаємодії, у результаті чого електричне поле екранується і слабшає по мірі збільшення віддалі (в результаті великого екранування) і, навпаки, підсилюється на короткій віддалі та за високої енергії. Сильна взаємодія веде себе навпаки (відкриття цієї властивості – асимптотичної свободи – якраз і привело нас до формулювання правильної теорії сильної взаємодії). Вона слабшає за високих енергій і на коротких віддальх. Отже, якщо екстраполювати інтенсивність сильної взаємодії, вона слабшає і за досить високих енергій можна порівняти з інтенсивністю сил слабкої та електромагнетної взаємодії. Майже тридцять років тому було виявлено, що при екстраполяції усіх трьох сил вони нівелюються в ділянці гранично надвисоких енергій. Це стало першим ключем до існування ще одного фізичного порогу – за надвисоких енергій далеко за межами сучасних можливостей спостереження, – за яким усі сили за шкалою енергій збігаються в межах теорії об'єднання.

Це не означає, що нас не чекають нові фізичні відкриття за енергій значно нижчих від шкали об'єднання. Насправді в останні роки ми зробили багато відкриттів у фізиці. Ми з'ясували, що нейтрино має масу, і що різні нейтрино змішуються. Ми відкрили нові моди порушення комбінованої парності й порушення обігу часу за слабких взаємодій між елементарними частинками низьких енергій. Але усі ці природні явища, хоча й відкриті вперше, можна пояснити у звичайних межах Стандартної моделі.

Звичайно, обчислити масу нейтрино або структуру порушення комбінованої парності теоретично ми не в змозі, однак така ж сама проблема стоєть і обчислення мас кварків і лептонів.

Суперсиметрія

Уже 2007 року в ЦЕРНі буде запущено новий пришвидшувач – Великий гадронний колайдер (Large Hadron Collider – LHC). Ми розраховуємо відкрити на LHC принципово нові фізичні явища. Оптимістично очікують відкриття частинки Гітса – виявлення динаміки спонтанного порушення

електрослабкої калібрувальної симетрії. Але найбільшою захопливою перспективою LHC є відкриття суперсиметрії.

Суперсиметрія – дивовижна теоретична концепція. Це природне і, напевно, унікальне розширення природних симетрій спеціальної та загальної теорії відносності. Значну роль відіграє вона і в теорії струн. Насправді, концепція суперсиметрії вперше якраз і було запропоновано в межах теорії струн, а згодом узагальнено до квантової теорії поля. Суперсиметрію найпростіше описати, уявивши собі, що простір-час має додаткові вимірювання. Характеризуючи подію, ми кажемо, що вона відбувається у просторовій точці x у момент часу t . Польові та хвильові функції мають своїми аргументами просторово-часові координати x і t . Тепер уявімо простір із введеними нами додатковими вимірюваннями, але лише квантовими. За цими заново введеними координатами положення вимірюють уже не звичайними, а грассмановими числами. Ці числа антикомутативні, тобто, помноживши деяку величину на два таких числа в прямій послідовності, ми одержуємо протилежний за знаком результат, чим помноживши на два ці ж числа в оберненій послідовності.

Такі числа можна придумати. Математики придумують багато різних чисел. Цими числами можна покомбінувати та уявити собі простір, в якому, крім звичайних просторово-часових координат x , y , z і t , є антикомутативні координати $_{-81}$ і $_{-82}$ (такі, що $_{-81-82} = -_{82-81}$). Існує досить вишукане узагальнення традиційного простору-часу, включаючи подібні антикомутативні квантові вимірювання. У такому просторі – так званому “суперпросторі” – є перетворення симетрії, яка дає змогу відобразити x в y поворотом або x в t відображенням, а також перетворення, поворотом, яких переводять квантові координати, – в просторові координати x . Є красиве узагальнення класичних просторово-часових симетрій, обертаючої інваріантності та релятивістської інваріантності Лоренца до суперперетворень, діючих у суперпросторі. Отже, квантове узагальнення простору-часу і просторово-часових симетрій будують математично.

Суперсиметричними симетріями називають теорії квантових полів у суперпросторі, де поля є функцією не лише просторово-часових, а й суперпросторових координат. Хвильову функцію



тут також включають до аргументів, поряд із просторово-часовими, суперпросторовими координатами. Подібні теорії мають вельми характерні відмінності від традиційних. За суперсиметричними теоріями, у кожній частинки є “суперпартнер” – якому відповідає її “суперчастинка”. “Суперпартнер” одержується завдяки повороту суперпростору, що переводить комутативну координату, наприклад, x , у антикомутативну, наприклад, θ . Таке перетворення трансформує бозонну комутативну координату в ферміонну антикомутативну координату. Відповідно, кожній частинці, яку ми спостерігаємо, має відповідати суперчастинка з обернено статистичним розподілом і спіном, який відрізняється на $1/2$. Кварку відповідає “суперпартнер”, який називають “скварком”; електронів – партнер із нульовим спіном під назвою “електрон”; фотонів (кванту світла) – ферміонний партнер зі спіном $1/2$ під назвою “фотіно”; гравітону (той, хто переносить гравітаційну взаємодію зі спіном 2) – партнер зі спіном $1(1/2)$ під назвою “гравітіно”. Загалом, у кожній частинки, яку ми спостерігаємо, має бути суперпартнер. Досі частинок-суперпартнерів ми не спостерігали. Хтось якось пожартував, що в природі ми спостерігаємо рівно половину передбачених теорій суперсиметрії частинок – тобто, які не виходять за межі звичайної симетрії. Однак дивуватися тут особливо не має чому. Суперсиметрія, можливо, ідеально точно відображає симетрію законів природи, однак вона була спонтанно порушена уже на початку створення Всесвіту. І, якщо прийняти масштаби порушення суперсиметрії набагато більшими, це пояснює чому ми досі не спостерігали ні однієї з частинок-партнерів. Якщо ж нам вдасться виявити ці частинки на пришвидшувачі ЛНС, то цим ми фактично відкриваємо нові квантові вимірювання простору-часу. Ось чому усіх так хвилює перспектива нового ЦЕРНівського пришвидшувача.

У суперсиметрії багато красивих властивостей. Вона об'єднує за принципом симетрії ферміони, кварки і лептони (тобто, складники першоелементів матерії) і мезони, фотон, W і Z бозони і глюони в КХД і гравітон (тобто, кванти силових взаємодій). Однак суперсиметрія є також і дуже важливим інструментом з погляду дослідження феноменології елементарних частинок. Вона здатна пояснити ієрархію, дати відповідь на запитан-

ня, чому шкала об'єднання настільки велика порівняно зі шкалою слабкої взаємодії. Без суперсиметрії це відношення шкал 10^{14} – 10^{15} доводиться корегувати вручну. Та, що найважливіше, у нас є і безпосередній ключ до суперсиметрії, і він також підказує, що її порушення починається в межах 1 ЕєВ за шкалою енергій. В останні двадцять років ми проводили все точніші розрахунки їх вимірювань залежно від енергії взаємодій. І виходить, що без суперсиметрії калібрувальні зв'язки не стикаються: словом, трьом прямим не обов'язково перетинатися в одній точці. Однак, якщо просто взяти Стандартну модель і привнести до неї мінімальну суперсиметрію, а тоді запропонувати, що суперсиметрія порушується за енергій порядку 1 ЕєВ, то всі три калібрувальні зв'язки ідеально зійдуться в одній загальній точці. А це – потужний ключовий аргумент на користь існування суперсиметрії в природі й можливості відкрити її на ЛНС.

Точніші екстраполяції такого роду допомагають нам уявити собі, де і за якої енергії збігаються сили. Вона є ще вища – порядку 10^{18} ГеВ, тобто, в 10^{14} разів вища від енергії, яку будуть розвивати ЛНС. Це ставить фізику елементарних частинок перед серйозною проблемою. Як дослідити енергії такого масштабу і відкривати нові фізичні явища? Чи здатні теоретики, в принципі, екстраполювати модель на так багато порядків?

Чи можна екстраполювати до довжини Планка?

Чи можна собі уявити відкриття нової фізики, яка відповідає за об'єднання усіх сил, якщо її природна шкала енергій настільки далека від можливостей прямого експериментального дослідження? Одна з причин, яка дає змогу розраховувати на таку можливість, – наявність у нас дуже міцного фундаменту. Ми маємо дуже добру теоретичну базу – Стандартну модель, яка чудово працює і з великою точністю перевірена експериментально. Змінити цю теорію непросто. Непросто побудувати і нову, альтернативну теорію, яка дала б змогу об'єднати всі сили за високих енергій і водночас не суперечила б усім експериментальним даним, накопиченим за низьких температур. Отже, ми маємо добру стартову позицію, яка жорстко обмежує нас у спробі модифікувати Стандартну модель.



Інша причина, чому ми можемо розраховувати на успішне об'єднання усіх силових взаємодій, – це прямий натяк на долучення гравітації до нової фізичної теорії об'єднання. Енергія об'єднання у 10^{18} GeV дуже близька до енергії перетворення гравітації в сильну взаємодію. За низьких енергій гравітацію відносять до розряду дуже слабких взаємодій. У атомі сили гравітаційного притягання між електроном і протоном у 10^{40} разів слабші від сили електричного притягання між ними. Відповідно, ми можемо знехтувати гравітацією і в звичайній атомній фізиці, і в фізиці елементарних частинок низьких енергій. Але ж сила гравітаційного притягання зв'язана з масою, яка, в свою чергу, еквівалентна до енергії. Тому сила гравітаційного притягання росте пропорційно до квадрата енергії і швидко вирівнюється та об'єднується зі всіма іншими силами (які залежать від енергії логарифмічно) до досягнення планківських масштабів енергії порядку 10^{19} GeV. Це дуже важливий ключ, оскільки він вказує, що наступний прорив у фізиці – велике об'єднання всіх сил природи, має поширюватися на гравітацію. А також на те, що проходить це об'єднання на рівні енергій, за яких гравітація стає сильною взаємодією, і починають виявлятися квантові ефекти. Оскільки дуже важко побудувати теорію, яка об'єднує всі сили, зокрема й гравітацію, і водночас, щоб відповідала нашим знанням про явища, які спостерігають за низьких енергій, у теоретиків, можливо, є шанс розібратися, що там відбувається, і без прямих експериментальних вимірювань у планківських масштабах.

“Планківський масштаб” названий на честь Макса Планка, який ввів це поняття понад сто років тому. У фізиці ми вимірюємо всі спостережувані величини трьома одиницями – довжини, часу і маси. Всі інші кількісні фізичні характеристики можуть бути виражені через ці одиниці. Але фундаментальними константами розмірності в природі є ні в якому разі не метри, кілограми і секунди. Ці одиниці придумали люди. Ми ж підозрюємо, що природа використовує одиниці вимірювання, в основі яких лежать фундаментальні розмірні константи: швидкість світла c , квант дії \hbar і гравітаційна стала Ньютона G . М. Планк увів останню з цих фундаментальних констант – так звану “сталу Планка” \hbar – для опису випромі-

нювання. Він зрозумів, що \hbar , разом із c і G можна використовувати як три базові одиниці, потрібних нам для опису всіх фізичних явищ. Учений був дуже радий, що йому вдалось завершити триаду фундаментальних розмірних констант, і він дав визначення довжини Планка, енергії Планка і часу Планка в цих фундаментальних одиницях. Характерно, що ці три одиниці відстають від нас дуже далеко: довжина Планка дуже мала, енергія Планка дуже велика, а час Планка миттєвий, що вони виходять за межі нашого сприйняття. Однак, будь-який фізик погодиться, що це – фундаментальні розмірні параметри природи, і нам справді слід виражати ці фізичні величини в цих одиницях.

Те, що планківська маса настільки (на 19 порядків) перевищує масу протона, дуже важливий для розуміння структури Всесвіту і природи багатьох фізичних явищ. Наприклад, чому зорі, планети і навіть люди такі великі? Чому в їхніх фізичних тілах так багато протонів? Причина в тому, що розмір найбільшої зорі, яка може виникнути без швидкого гравітаційного колапсу в чорну діру, пропорційний до куба відношення планківської маси протона, тобто $\sim 10^{19}$. Тому зорі містять до 10^{57} протонів, і їхні розміри величезні порівняно з розмірами атомів. Те ж саме з планетами і людьми. Якщо б це відношення дорівнювало десяти, а не 10^{19} , зоря могла б містити не більше тисячі протонів. Життя не зародилося б, і нас би тут не було. Ця ж ієрархія масштабів обумовлює і слабкість гравітації. Гравітаційне притягання між двома тілами з масою, яка дорівнює масі Планка, дуже виражено, однак сила притягання між протонами в 10^{38} разів слабша. Як наслідок, гравітація, яка за теорією відносності Айнштейна викривляє топологічну структуру простору-часу, у звичайних умовах простір і час майже не викривляє. З цієї причини на макроскопічному і навіть атомному рівні простір-час має гладку структуру. Якщо б вищеназване відношення дорівнювало десяти чи одиниці, а не 10^{19} , тоді на звичайних чи міжатомних віддалях нам доводилося б рахуватися з викривленням простору-часу, звичайні атоми могли б колапсувати у чорні діри, а квантові флуктуації метрики простору-часу були б помітні на звичайних віддалях у ділянці утворення чорних дір. Увесь світ був би інакший.



Те, що в масштабах об'єднання нам доводиться рахуватися з гравітацією, – дуже важливий ключ, оскільки він примушує нас піти далі від квантово-польової моделі. Гравітація за Айнштайном обумовлена динамікою просору-часу. Енергія та матерія спотворюють і викривляють метрику простору-часу, надаючи їй динаміку. Але в квантовій механіці будь-який динамічний об'єкт піддається квантовим флуктуаціям, відповідно, і в метриці простору-часу мають відбуватися квантові флуктуації. Сімдесят років теоретичних та експериментальних досліджень привели нас до відкриття, що квантові флуктуації простору-часу, напевно, не вписуються у межі квантової теорії поля. Всі спроби простого квантування простору-часу Айнштайна ні до чого не привело. Стали виникати сумніви відносно взаємної непротиворічності квантової механіки і загальної теорії відносності. Як альтернатива висували припущення, що теорія Айнштайна є лише ефективною, але не остаточною і повною теорією гравітації. Вона описує гравітацію, але лише на віддалях, яка значно перевищує довжину Планка. Якщо займатися фізикою у межах шкали Планка, потрібна нова теорія, яка принципово відрізняється від квантової теорії поля. Єдиний, з мого погляду, працездатною кандидатурою на цю роль є теорія струн.

Від частинок до струн

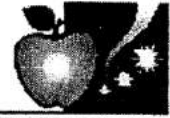
Теорія струн – це теорія нового типу, яка відображає розрив фізики зі своєю минулою історією. Традиційно ми добивались прогресу в фундаментальній фізиці завдяки зондуванню матерії на все менших відстанях і виявлення там фундаментальніших її складників. За сто років ми дізналися, що матерія складається з атомів, а атоми – із щільних ядер, які оточені електронами, що навіть сьогодні ми уявляємо їх як неподільні точкові частинки. Однак саме ядро має структуру. Заглянувши в середину атомного ядра, ми з'ясували, що воно складається з нуклонів – протонів і нейтронів. У минулому сторіччі ми прозондували протон і нейтрон і відкрили, що вони складаються із кварків – здавалося б по-справжньому точкових частин. Стандартна модель якраз і заснована на кварках і лептонах як точкові елемен-

тарні частинки. Здавалося б, наступна стадія об'єднання буде пов'язана з виявленням ще дрібніших точкових частинок (субкварків і сублептонів). Однак на це теорія струн відповідає "ні". Якщо б у вас був якийсь ідеальний мікроскоп із розділенням на рівні довжини Планка, то замість точкових частинок, ви б побачили в ньому протяжні струни. За теорією струн, базовими складниками матерії є не точкові частинки, а видовжені одновимірні струни. Це важливий розрив з історичною традицією, яка складалася впродовж двох тисячоліть.

Ідея, що всі частинки насправді є струнами, має добру перспективу стати об'єднувальною, оскільки струна може мати безліч різних конфігурацій і є важливішим об'єктом, ніж точка. Може статися, що всі частинки, які ми спостерігаємо, – є просто різні гармоніки, різні моди коливань однієї й тієї ж струни. Саме такий підхід постулюють теорією струн. Струна може вібрувати нескінченною кількістю образів, і кожна з мод її вібрації уявляється нам на великій віддалі точковою частинкою.

Отже, теорія струн видозмінює підхід до теорії будови матерії, замінюючи частинки в ролі первинних складових матерії різними модами коливань єдиної протяжної струни. Однак у всьому іншому теорія струн не вносить радикальних змін у закони фізики. І це мудро. Принципово змінити фундаментальний каркас фізичної науки дуже непросто. Такі зміни – вкрай рідкісне явище в історії фізики. Від часу Ньютона до епохи Айнштайна і Гайзенберга радикальних змін у фізиці було дуже мало. Більшість спроб змінити концепції і модифікувати фундаментальні закони фізики суперечить або експериментальним даним, або здоровій логіці. Будь-які видозміни фундаментальних фізичних законів вимагає обережності. Слід видозмінити якомога меншу кількість принципів. І теорія струн, поки що, змінила концептуальну модель фундаментальної фізики лише у тому сенсі, що замість точкових частинок як першоелементів ми маємо струни.

Теорія струн розвивалась упродовж останніх 37 років шляхом збереження усіх перевірених фізичних принципів, крім одного, за яким матерія складається з точкових частинок. Ми дотримуємося традиційних правил релятивістської квантової



механіки, лише замість частинок ми квантуємо струни. Для виведення законів, які описують теорію струн, ми узагальнюємо, вельми прямолінійно і природно, закони, яким підчиняється динаміка частинок. Наприклад, ви хочете обговорити рух частинок. Одним із опису руху вільної частинки в просторі певної геометрії є формулювання, за яким частинка рухається по деякій траєкторії в просторі-часі. Це так звана "світова лінія" частинки. Далі ми переходимо до побудови так званої "дії", в ролі якої, у випадку вільної частинки, виступає інваріантна довжина світової лінії в просторі-часу. Динаміка вільної частинки визначається тим, що вільна частинка рухається вздовж світової лінії з найменшою сумарною дією впродовж усього його руху. Із цього динамічного принципу найменшої дії випливає, що вільні частинки рухаються по прямій в невикривленому просторі-часі й вздовж геодезичних ліній у викривленому. Будуючи теорію струн, ми постулюємо те ж саме. Ми стверджуємо, що струна рухається в просторі вздовж світової площини або по світовій трубі. Для обчислення траєкторії руху струн, знову ж, мінімізуємо природний аналіз довжини шляху – площа труби. Отже, ми частинки замінюємо струнами, лінії – трубами, а довжини – площами. Головні правила теорії струн дуже прості. Математичний апарат трохи ускладнюється, але концептуально ми змінюємо дуже небагато.

А як бути з квантовою механікою струн? Річард Фейнман вважав, що для розрахунку амплітуди ймовірності попадання частинки з однієї точки простору-часу в іншу нам треба просто просумувати ймовірності її знаходження на всіх світових лініях чи траєкторіях, які поєднують дві події, а не лише на коротких траєкторіях, при цьому кожен траєкторію враховують з вагою, що дорівнює експоненті i , помноженій на дію (довжину світової лінії). Вільну струну квантуємо так само. Ми здійснюємо сумування по всіх світових трубах, що описує переміщення струни з однієї конфігурації і моменту часу в інші. Сумування по струнах проводимо з вагою i помноженій на дію (площа поверхні світової труби). Так ми одержуємо розподіл квантово-механічних амплітуд вільного розподілу струни. Далі, як завжди у квантовій механіці, ми обчислюємо ймовірності, підносячи ці амплітуди до квадрату. Так будують кван-

тову механіку вільних струн. Теорія струн, насправді, не настільки складна, хоча математичне сумування по всіх світових листах і буде складніше від сумування по світових лініях. Років за сто, можливо, теорію струн будуть викладати в університетах.

Взаємодія струн

Однак між частинками і струнами є велика відмінність щодо їхніх взаємодій. Одним із способів опису взаємодій у квантовій теорії поля – діаграми Фейнмана. Тут ми знову дотримуємось попередньої стратегії та робимо все те ж саме, що й у випадку з частинками, просто замінюючи їх струнами. Коли дві частинки A і B переміщуються в часі й у підсумку опиняються в один час в одній і тій же точці, їхня ймовірність є перетворенням в частинку C . Наприклад, під час зустрічі електрона з позитроном вони можуть перетворитися у фотон. Саме у цій точці простір-час – у вершині діаграми – і відбувається взаємодія. Вся невизначеність і всі вільні параметри квантової теорії поля є вхідними даними у вершині і визначають, що так може відбутися: якими взаємними перетвореннями частинок можливі, й яка амплітуда ймовірності таких подій. Під час зустрічі електрона з позитроном ми вводимо електричний заряд, який визначає ймовірність їхнього перетворення у фотон. Із цих вершин витікають всі величини, які ми не можемо розрахувати теоретично, наприклад, постійна тонка структура.

А що відбувається зі струнами? Напевно, ви подумали, що ми тут підемо протопореним шляхом. Наприклад, дві струни A і B можуть вступити у взаємодію у випадку їх взаємного накладання в просторі й часі, і тоді виникає ймовірність їх перетворення у третю струну, наприклад, C . Замість точки взаємодії ми б у такому випадку мали криву взаємодії. Здавалося б, природний спосіб ввести взаємодію у теорію струн. На щастя, теорію взаємодії струн було розроблено задовго до теорії струн людьми, які про теорію струн жодної уяви не мали. Тому вони таким шляхом не пішли. Така стратегія привела б до катастрофи. Треба було б пронумерувати всі можливі криві, щоб визначити ймовірність вступу двох струн у взаємодію при їх збіганні вздовж кривої з утворенням нової струни. Замість одного параметра точкової взаємодії –



заряду – прийшлося б вводити нескінченну кількість невизначених констант. Однак з'ясується, що замість цієї взаємодії струн набагато краще представити у вигляді так званих “діаграм штанів”. Уявіть собі дві штанини в горизонтальному зрізі, який переміщається догори впродовж часу. Внизу зріз штанин описує дві окремі замкнуті струни, які ближче до пояса зливаються в єдину струну. Отже діаграма штанин є злиттям двох струн. Але де саме відбувається взаємодія? Ніде. Неможливо вказати точку, вершину, в якій проходить взаємодія. У випадку частинок фейнмановські діаграми складаються із ліній, які утворюють одномірні схеми. Вершина подана особливою точкою на діаграмі. Рухаючись уздовж лінії, ви можете однозначно визначити місцеположення вершини, оскільки ця особлива точка, звідки можна рухатися у трьох напрямках. У решті точках можливий лише рух вперед і назад. Вершина у цьому випадку виразно виражена на діаграмі. Однак еволюція струни описується двомірною поверхністю. Будь-яка маленька ділянка такої поверхні нічим не відрізняється від іншої ділянки. Особлива точка відсутня. Фактично, ви нічого не можете знати про факт взаємодії, не охопивши воедино двомірну картину злиття. Взаємодія струн носить, у деякому смислі, топологічний характер. У випадку частинок, навіть якщо ви знаєте, як саме вони рухаються, ви нічого не можете сказати про те, як вони взаємодіють, тому що вам треба знати, що саме відбувається у вершині під час їхньої зустрічі. А в теорії струн, якщо ви знаєте, як рухаються вільні струни, то ви знаєте й те, як вони взаємодіють. Не треба вводити ніяких нових фізичних величин і параметрів. Одне це дає зрозуміти, чому теорія струн настільки унікальна і наскільки вона на допускає вільних трактувань. Двадцять років тому було п'ять різних теорій струн. Нині ми розуміємо, що всі вони – це одна теорія. І вважаємо, що можлива лише одна теорія струн.

Теорія струн і гравітація

Теорії струн виповнилося 37 років, і що досягнуто? Головних досягнень три. Найважливіші з них ті, що ця теорія уявляється логічно непротивичним розширенням фізики. Ми досліджуємо і роз-

виваємо теорію струн уже багато років, і вона, зовсім переконливо, виглядає повністю узгодженою. Можливо, вона не описує реального фізичного світу; можливо, вона неповна; але вона є узгодженим логічним розширенням фізики. Деякі з них припускають, однак, що вона обернеться набагато більшим: що теорія струн приведе до справжньої революції в фізиці, співмірною з революційними змінами, які привели до виникнення теорії відносності квантової механіки на початку ХХ сторіччя. Дві названі попередні революції в поняттях мали пряме відношення до двох раніше названих мною фундаментальних розмірних констант: швидкості світу c і планківського кванта дії \hbar . Вони розширили уявлення класичної фізики, однак релятивістські теорії зводяться до класичної фізики за низьких швидкостей, а квантова механіка – до класичної у системах, де дія достатня порівняно з \hbar . Багато з нас передбачають, що теорія струн виявиться настільки революційною, якщо не більше, щодо третьої, універсальної розмірної константи – постійної Ньютона G або довжини Планка l_p . Водночас на більших відстанях l_p теорія струн зводиться до класичної квантової теорії поля, а струни будуть виглядати як частинки.

Два інших досягнення теорії струн – це те, що вона, по-перше, дає нам узгоджену, з кінцевими розмірами, добре визначену теорію квантової гравітації, а по-друге, з'ясовується дуже багатою структурою, включаючи, крім гравітації, і всі інші елементи, які потрібні нам для побудови Стандартної моделі, – калібрувальні взаємодії Янга-Міллса, кварки, лептони тощо. Цілком можливо, у межах теорії струн ми можемо навіть досягти шуканого об'єднання.

По-перше, теорія струн демонструє непротивіччя квантової механіки і загальної теорії відносності. Дехто засумнівався щодо їхньої можливої несумісності після багаторічних спроб квантувати рівняння Айнштейна. Теорія струн успішно створює єдину теорію гравітації, яка за великих віддалей асимптотично зводиться до теорії Айнштейна. Відповідно, вона дає нам інструменти для дослідження багатьох дуже дивних явищ, які проходять при дуже сильній гравітації у глибоко продавленому просторово-часовому континіумі,



як наприклад, в околі знаменитих чорних дір. С. Гокінг показав, що чорні діри, не здатні, щоб то не було випромінювати у класичному розумінні, насправді не є абсолютно чорні. Використовуючи квантову механіку, він продемонстрував, що все ж чорні діри випромінюють теплове випромінювання. Тобто, чорна діра веде себе як термодинамічний об'єкт з ентропією, температурою і випромінюванням абсолютно чорного тіла. Однак С. Гокінг також дійшов до висновку, що під час формування і подальшого теплового розпаду чорної діри інформація губиться, і, тим самим, порушуються закони квантової механіки. Теорія струн виявилась дуже корисною з погляду спростування цього парадоксу, який кидає виклик квантовій механіці. Нові ідеї теорії струн дали змогу буквально спасти квантову механіку. Наприклад, за Бекенштейном і Гокінгом, чорна діра має ентропію. Дуже дивно для розв'язання системи рівнянь класичної загальної теорії відносності володіють ентропією. Адже ентропія – це зазвичай вимір кількості мікростанів макроскопічної системи з фіксованими квантовими числами. З'ясовується, у межах теорії струн можна побудувати багато прикладів контрольованих моделей чорних дір. У цих випадках ми можемо деформувати теорію шляхом зміни параметрів до випадку, коли чорні діри можна буде описати як протяжні об'єкти, які в теорії струн прийнято називати "D-бранами", і розрахувати кількість їхніх можливих конфігурацій із заданими конфігураціями із заданими характеристиками – масою, енергією, моментом імпульсу і зарядом. Стромінгер і Вафа показали, що у повністю контрольованих нами випадках ми можемо точно розрахувати кількість мікростанів у системі. Одержана в результаті ентропія (логарифм кількості мікростанів) точно відповідає ентропії, яку запропонували Бекенштейн і Гокінг. Це ілюструє, що калібрувальна теорія на D-бранах може точно описати кількість ступенів вільності системи чорної діри.

Теорія струн дає змогу розв'язати і парадокс втрати інформації. Для цього ми використаємо деякі дуальності, які з'ясувалося нещодавно в теорії струн. Дуальність – це взаємозв'язок між двома формулюваннями однієї й тієї ж теорії.

Одна з дуальностей, яка найбільше зачарує, виявлених останнім часом, – це зв'язок між теорією струн на фоні викривленого анти-де-ситтерівського простору – з п'ятьма просторово-часовими вимірюваннями і ще п'ятьма просторовими вимірюваннями теорії струн, згорнутими у п'ятимірну сферу, і звичайний (але у вищій мірі суперсиметричної) калібрувальною теорією у чотирьох вимірах. Теорію останнього типу ми використовуємо в Стандартній моделі та розуміємо її дуже добре. Це унітарна теорія без інформаційних втрат. Оскільки ми можемо змоделювати утворення чорних дір в анти-де-ситтерівському просторі, ми потім можемо і проектувати їх еволюцію в часі на добре відомий нам простір калібрувальної кривої і показати тим самим, що по крайній мірі, у цьому анти-де-ситтерівському просторі випромінювання і випаровування чорних дір – процес унітарний. Недавно С. Гокінг відвідав інститут Кавлі, де виступив із лекцією, на якій заявив, що раніше висловлені ним побоювання не обґрунтовані. Нині він припускає, виходячи з вказаної дуальності, що випаровування чорних дір не порушує законів квантової механіки.

Ми сподіваємося, що теорія струн допоможе розв'язати й інші парадокси квантової гравітації, такі як парадокс космологічної сингулярності, які ми спостерігаємо, екстраполюючи історію Всесвіту аж до точки Великого вибуху. Можливо нам вдасться сформулювати принцип, який є передумовою історії Всесвіту і об'єднувальною Великою вибуху. Може бути, що теорія струн дасть змогу якось згладити сингулярність точки Великого вибуху і зафіксувати початкові умови в ній або, як передбачає дехто, розмірковуючи про можливі сценарії розвитку теорії струн, показати, що Всесвіт вічно пульсує. Насправді, я до цього ще повернуся, з мого погляду, на самому початку виникнення Всесвіту часу не існувало, тобто, фактично, час – це поняття введене. Поки що теорія струн не досягла успіху в розв'язанні проблеми космологічних сингулярностей, хоча проблеми багатьох статичних сингулярностей у класичній загальній теорії відносності за її допомогою розв'язані. Ми тут і досі наштотуємося на ті ж труднощі, що й у випадку теорії Айнштейна. Тут потрібно ще багато попрацювати.

Закінчення читайте в журналі "Світ фізики", 2006. № 3.



Дослід К. Девіссона та Л. Джермера з дифракції електронів. Етап становлення хвильової механіки

Олександр Проскура

кандидат фізико-математичних наук

(Берлін, Німеччина)

На початку минулого сторіччя об'єдналися два традиційні погляди на світло – один за Гюйгенсом (Christian Huygens, 1629–1695) як на процес поширення хвиль і другий за Ньютоном (Isaac Newton, 1643–1727) як на потік корпускул. Відповідно до цих двох підходів особливості світла проявляються фізично по-різному, наприклад, хвильові властивості – в інтерференційних явищах, а властивості світлових частинки – у зовнішньому фотоелектричному ефекті.

З виникненням квантової фізики утвердилось поняття корпускулярно-хвильового дуалізму, згідно з яким світлові частинки-фотони мають хвильові властивості, а перед дослідниками постало чергове запитання – чи є властивості хвиль у рухомих матеріальних мікрочасток. У результаті теоретичних і експериментальних досліджень виникло поняття хвильово-часткового дуалізму. Розгляньмо коротко, як це сталося.

Гіпотезу про хвильові властивості мікрочастинки на початку 1920-х років висловив французький теоретик Луї де Бройль (Louis-Victor de Broglie, 1892–1987). Електрони можна було вважати такими мікрочастинками. В американській фірмі Bell Telephone Laboratories її працівник Клінтон Девіссон (Clinton Joseph Davisson, 1881–1958) вже експериментував з електронним променем, скерованим на поверхню мішені у вигляді кристала нікелю. Цю роботу було розпочато 1922 року за участю Кунсмана (C. H. Kunsman), за два роки до К. Девіссона приєднався Лестер Джермер (Lester Halbert Germer, 1896–1971). Дослідники бомбували мішень повільними електронами, які вивільнювались внаслідок термоелектронної емісії з розпеченої дротинки та пришвидшувались в

електричному полі з різницею потенціалів 50–600 В. В процесі досліджень експериментатори змінювали кутове положення мішені відносно електронного променя. Дослідники мали намір виміряти кутовий розподіл електронів та їхні енергії після відбиття від поверхні металевої мішені з відомою структурою.

К. Девіссон і Л. Джермер не сподівались, як зауважено в монографії з історії фізики [1], одержати від своєї роботи принципово важливих результатів. Проте їхні дослідження набули особливої актуальності після оприлюднення Луї де Бройлем теорії, за якою рух матеріальної мікрочастинки можна описувати в термінах хвильового процесу. Весною 1925 року названі американські експериментатори помітили, що електрони вже не розсіювались в усіх напрямках, а незрозуміло чому відбивались під певними кутами до поверхні, тобто при деяких кутах падіння електронних променів детектор відбитих електронів почав фіксувати піки інтенсивності відбитих електронних променів. З'ясувалось, що виникнення цих піків інтенсивності було наслідком випадкового порушення температурного режиму експериментальної установки, в якій досліджувана нікелева мішень перегрілась і набула інших властивостей, а саме поверхня зразка стала монокристалічною. Для К. Девіссона і Л. Джермера це історичне відкриття виявилось згідно з твердженнями Мендельсона несподіваним [1]. Але відкриття “електронних” хвиль мало відбутись, бо прийшов його час.

К. Девіссон не зміг фізично пояснити нові загадкові результати і через океан звернувся листовно за порадою до авторитетного німецького



кристалофізика Макс Борна (Max Born, 1882–1970). Теоретик М. Борн та його колега по Геттінгенському університетові Джеймс Франк (James Franck, 1882–1964) обговорили разом експериментальні результати К. Девіссона і Л. Джермера та припустили, що вони в якийсь спосіб стосуються постулату французького теоретика Луї де Бройля про те, що рухомі мікрочастинки мають хвильові властивості. Американці про гіпотезу де Бройля, яку він висунув 1924 року, ще не знали. М. Борн і Дж. Франк своє припущення про відкриття американцями явища дифракції електронів запропонували перевірити молодому теоретику Вальтеру Ельзасеру (Walter Maurice Elsasser, 1904–1991). Із розрахунків Ельзасера випливало, що величина кута відбиття електронів, виміряна в дослідах Девіссона і Джермера, фактично засвідчувала явище дифракції електронів і так підтверджувала наявність у електронів хвильових властивостей. Нові наукові результати дещо нагадували собою принципово важливі досліди Лауе (Max von Laue; 1879–1960), який 1912 року разом із Паулем Кніппінгом (Paul Knipping, 1883–1935) та Вальтером Фрідріхом (Walter Friedrich, 1883–1968) в експериментах із кристалами показав, що X -промені є хвилями, бо вони володіють характерною для хвиль здатністю дифрагувати на кристалічній ґратці.

М. Борн і Дж. Франк після обговорення висновків Ельзасера зразу відправили К. Девіссону листа про зроблене ним велике відкриття і порадили йому дещо змінити умови досліду, щоб остаточно пояснити проблему. К. Девіссон і Л. Джермер врахували пораду і зрештою повідомили 1927 року в журналі *Nature* результати своїх досліджень.

За десять років за ці дослідження К. Девіссона нагородили Нобелівською премією. В своїй Нобелівській лекції К. Девіссон розглянув історичні аспекти відкриття і проілюстрував узгодження теорії з експериментом. Він продемонстрував залежність довжини хвилі де Бройля для електрона λ від різниці потенціалів U між точками електричного поля, в якому електрон пришвидшується, графічно зобразивши спрямлення функціональної залежності $\lambda = f(U)$. Відтворимо частково нап'ямок цих доказів.

Згідно з де Бройлем рухома матеріальна частинка мусить мати хвильові властивості. Така частинка володіє імпульсом

$$p = mv,$$

де m – маса частинки, v – її швидкість руху, яку можна змінювати.

Мікрочастинка мусить характеризуватися хвилею з довжиною

$$\lambda = \frac{h}{p}, \quad (1)$$

величина якої змінюється зі зміною величини швидкості руху мікрочастинки, тоді як стала Планка h залишається, звісна річ, константою. В такому разі слід сподіватись, що потоки матеріальних частинок за відповідних умов будуть виявляти себе в хвильових явищах накладання хвиль – інтерференції – та обминання хвилями перешкод – дифракції. Дифракцію зручно спостерігати, коли довжина хвилі та розмір перешкоди співмірні. Якщо для дослідів обрати як матеріальну мікрочастинку електрон, то величину довжини хвилі де Бройля для електрона $\lambda = h/mv$ при його масі m і швидкості v можна змінювати, пришвидшуючи електрон в електричному полі й регулюючи в такий спосіб величину його швидкості v з наміром узгодити довжину λ хвилі де Бройля з розміром перешкоди. Таке узгодження потрібне для створення умови дифракції.

Швидкість v електронів, пришвидшених у вакуумі в електричному полі з вимірюваною різницею потенціалів U , обчислюється згідно з виразом закону збереження енергії

$$eU = \frac{mv^2}{2}, \quad (2)$$

де e – заряд електрона. Щодо дифракційної картини, то її можна проаналізувати за допомогою формули Брегга

$$2d \sin \varphi = k\lambda, \quad (3)$$

яка описує дифракцію на кристалах, в яких регулярно розташовані атоми, що створюють просторову дифракційну ґратку. У формулі Брегга d – відстань між сусідніми кристалографічними площинами монокристалічної кристалічної ґратки, для нікелевої мішені період ґратки становить $d = 0,0909$ нм; φ – кут ковзання променя, який вимі-



рюють в експерименті; $k = 1, 2, 3, \dots$ – порядок дифракційного максимуму, який теж вимірюється на дифракційній картині.

Формула Брегга відома також як формула Вульфа-Брегга. Вона описує дифракцію рентгенівських та γ -променів, що є електромагнетними хвилями, а також дифракцію електронів, нейтронів та інших мікрочастинок, які мають достатньо маленькі величини хвиль де Бройля і скеровані на просторові дифракційні ґратки у вигляді кристалів. Дифракція здійснюється за виконання умови співмірності величин довжин хвиль λ та періода d кристалічної ґратки відповідно до виразу $d \leq (\lambda/2)$. Виконання цієї умови забезпечується використанням кристалів, у яких період звичайно становить $d \approx (0,1-1)$ нм і які через це стають для названого проміння оптично неоднорідними.

Функцію $\lambda = f(U)$ К. Девіссон передав на графіку прямолинійною залежністю в координатах $\lambda = f(1/\sqrt{U})$ [2], якою підтверджувалась передбачена де Бройлем обернено пропорційна залежність довжини хвилі матеріальної мікрочастинки від її швидкості. Розбіжність між величинами, одержаними в дослідах К. Девіссона та Л. Джермера, та підрахованими за теоретичною формулою де Бройля, не перевищувала прийнятних 2%. Отже, узгодження теоретичної гіпотези та експерименту було переконливо засвідчено.

За два місяці після оприлюднення К. Девіссон і Л. Джермером першого повідомлення про дифракцію електронів з аналогічними результатами виступив також англієць Джордж Томсон (Sir George Paget Thomson, 1892–1975). Дж. Томсон надрукував у Англії свою працю про експерименти з дифракцією електронів і представив фотографію з відповідною дифракційною картиною. В дослідах Томсона швидкі електрони, пришвидшені в електричних полях з різницею потенціалів в десятки кіловольт, скеровувались нормально до поверхні тонких плівок з різноманітних матеріалів і, проникаючи крізь них, створювали ззаду мішені дифракційну картину у вигляді концентричних кілець. Цю картину можна було спостерігати на люмінесцентному екрані або залежно від намірів дослідника фіксувати її на фотопластивці. Подібний метод просвічування раніше

успішно використовувався для рентгеноструктурного аналізу кристалів, він називається методом Дебая-Шерера.

Учасники наукових перегонів у боротьбі за пріоритет деколи вдаються до методу додумування результату, що є нічим іншим, як фальшуванням. Така прикریсть сталась і при експериментальному дослідженні дифракції електронів у Геттінгенському університеті, куди до Роберта Поля (Robert Wichard Pohl, 1884–1976) від Філіппа Ленарда (Philipp Lenard, 1862–1947) з Гайдельберзького університету перейшов працювати Еміль Рупп (Emil Rupp, 1898–?), який прагнув експериментально підтвердити ідею де Бройля про хвильові властивості матеріальних частинок і зумів 1928 року здійснити дві сенсаційні публікації про дифракцію електронів [3, 4]. Дізнавшись про ці публікації, заінтригований Дж. Франк за відсутності Е. Руппа уважно розглянув оригінали фотознімків, які виконав Е. Рупп і засумнівався у їхній достовірності, бо оригінали виявились відретушованими. Ця скандальна новина потрясла Фізичний інститут, яким керував відомий строгістю та чистотою експериментів Р. Поль. Президентів Німецького фізичного товариства довелось оголосити публікації Е. Руппа про дифракцію електронів нечинними [5]. Е. Рупп пішов з університету шукати роботу на промисловій фірмі. В історії наукових фальшувань залишився також слід того, як Е. Рупп описував нездійсненні досліди, немов би виконані на підтвердження роботи Альберта Айнштейна (Albert Einstein, 1879–1955). У відповідь на критику в науковій пресі Е. Рупп 1935 року повідомив про відкликання низки своїх публікацій, це його повідомлення [6] супроводжувалось випискою з довідки лікаря про тимчасовий хворобливий стан д-ра Е. Руппа. Керівник науково-дослідницького інституту при фірмі AEG Карл Рамзауер (Carl Ramsauer, 1879–1955) був змушений пояснювати складну ситуацію і забезпечити перевірку достовірності багатьох досліджень, виконаних за участю Е. Руппа в цьому інституті [7].

Прикра історія з Е. Руппом та випадки інших наукових маніпуляцій стали в Європі та Америці предметом численних досліджень та ґрунтовних обговорень в контексті відповідальності науковця та суспільства за наукові помилки і фальшування

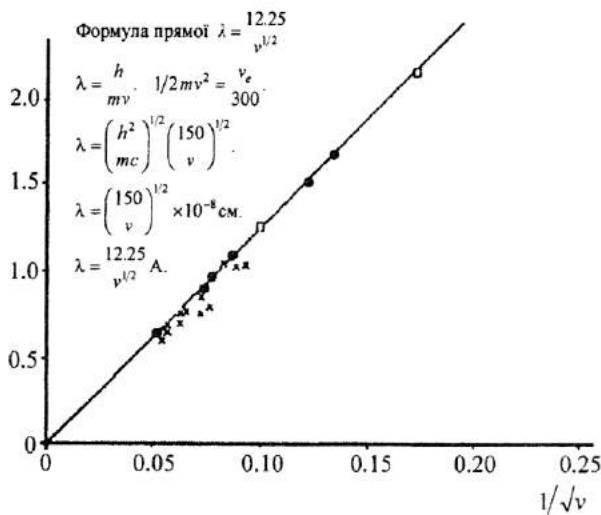
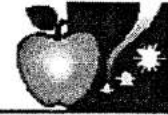


Рис. 1. Перевірка формули де Бройля $\lambda = h/mv$. На

графіку в координатах λ та $1/\sqrt{V}$ зображено для електронів зв'язок їхньої дебройлевої довжини хвилі λ , обчисленої за даними дифракційної картини, з величиною різниці потенціалів V електричного поля, в

[8]. Проблема відповідальності має бути близька українцям, яким внаслідок нехлюйства вже довелося стати жертвами глобальної ядерної катастрофи, що сталася 1986 року поруч української столиці в місті Прип'ять, та інших небезпечних експериментів.

Наукові успіхи К. Девіссона і Дж. Томсона – експериментальне відкриття дифракції електронів на кристалах – було відзначено Нобелівською премією за 1937 рік. Теоретик Луї де Бройль став нобелівським лавреатом ще раніше, 1929 року. Прийшло наукове визнання того, що теоретична гіпотеза про можливість описувати поведінку матеріальних мікрочастинок у термінах хвильового процесу була експериментально підтверджена і виключено сумніви щодо існування хвильових властивостей у рухомих електронів. Цей висновок став важливим етапом у розвитку хвильової механіки, а також фізики атома і кристалів.

Як бачимо, становлення хвильової механіки і наближення до істинної фізичної картини відбувалось завдяки властивій ХХ сторіччю між-

народній співпраці науковців, які, як то часто трапляється в науці, не знехтували випадковим результатом, а сумлінно і допитливо його дослідили.

На важливій ролі допитливості для успішних наукових пошуків можна наголосити ще і в такий спосіб. При офіційному завершенні Міжнародного року фізики в Німеччині, де 2005-ий рік відзначався як рік Айнштейна, на берлінській сцені з'явився великий гурт школярів та гімназистів, які представляли майже тридцять навчальних закладів, що носять ім'я Айнштейна, і після жвавої дискусії про зміст першої літери в айнштайновій формулі $E = mc^2$ юні знавці вирішили, що літера E саме і символізує допитливість.

1. Kurt Mendelssohn. Walther Nernst und seine Zeit. 1976, Physik Verlag, Weinheim, (пер. з англ.)
2. Clinton J. Davisson. The discovery of electron waves. Nobel Lecture, December 13, 1937. Nobel Lectures, Physics 1922–1941. – P. 387–394. 1965. Elsevier Publishing Company, Amsterdam.
3. E. Rupp. Über Elektronenbeugung an einem geritzten Gitter// Zs. f. Phys., 1928. – Bd. 52. – N 1–2, N 8–15.
4. E. Rupp. Über die Winkelverteilung langsamer Elektronen beim Durchgang durch Metallhäute// Ann. d. Phys., 1928. – Bd. 85, Folge 4. – N 8. – S. 981–1012.
5. Manfred Achilles. Göttinger Geschichten. 2005. – Technische Universität Berlin.
6. E. Rupp. Mitteilung// Zs. f. Phys., 1935. – Bd. 95. – N 11–12. – S. 801.
7. C. Ramsauer. Mitteilung. (Aus dem Forschungs-Institut der AEG.)//Zs. f. Phys., 1935. – Bd. 96. – N 5–6. – S. 278.
8. D. Hoffmann, F. Steinle. Ge-Ruppt und Ge-Shoent: Über Betrug, Irrtum und die Sorgfaltspflicht in der Wissenschaft. Was das Fälschungen in der Wissenschaft sagen können. Доповідь на симпозиумі Німецького фізичного товариства “Фізика-Суспільство-Відповідальність” // www.dpg-tagungen.de/archive/2005/sygv.pdf 2005 DPG Symposium: “Physik-Gesellschaft-Verantwortung”. (SYGV). Tagesübersichten. Hauptvortrag.



ВОНА ЛЮБИЛА СПЕКТРИ

*До 100-річчя від дня народження
єдиної в Україні жінки академіка-фізика
Антоніни Федорівни Прихотько*

*Значимість особистості визначається
ступенем її впливу на оточення*

Г. Гельмгольц

Антоніна Федорівна Прихотько – видатний фізик зі світовим ім'ям у галузі фізики твердого тіла. Їй належить експериментальне відкриття молекулярних екситонів, вона заснувала наукову школу з низькотемпературної спектроскопії молекулярних кристалів.

А. Прихотько народилася 26 квітня 1906 року в м. П'ятигорську Ставропольського краю. Її мати, Олександра Федорівна, була домогосподаркою, батько, Федір Іванович Прихотько, службовець, бухгалтер. Після переїзду родини на початку 1930-х років до м. Кисловодська, батько працював головним бухгалтером.

Антоніна Федорівна спочатку навчалася в гімназії, згодом – у школі. Водночас вона вивчала французьку мову...

Закінчивши школу, Антоніна Федорівна 1923 року вступила до Ленінградського політехнічного інституту на фізико-математичний факультет. Тоді в Інституті викладали А. Йоффе, Я. Френкель, М. Семенов, В. Скобельцин та інші відомі учені.

Наукову діяльність Антоніна Федорівна розпочала на третьому курсі в Ленінградському фізико-технічному інституті, де працювала в лабораторії кристалів, яку очолював І. Обреїмов. Антоніна Федорівна 1926 року одружилася з О. Лейпунським.

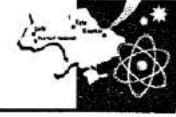
Наукову діяльність А. Прихотько продовжила в Українському фізико-технічному інституті (УФТІ), який було засновано 1929 року у м. Харкові. Першим директором інституту став І. Обреїмов, один із найближчих соратників А. Йоффе. Там було збудовано першу в СРСР криогенну лабораторію.



Упродовж 1930–1940 років А. Прихотько під керівництвом І. Обреїмова успішно провела низькотемпературні дослідження спектрів низки органічних і неорганічних кристалів, серед них кріо-кристалів – речовин, що кристалізуються лише за дуже низьких температур. Це вимагало створення спеціальної апаратури, методики очищення і вирощування монокристалів, використання поляризованого світла. Низькотемпературна спектроскопія діелектричних та напівпровідникових кристалів успішно розвивалася, а згодом набула поширення і в інших наукових центрах країни.

Під час війни Академію наук УРСР і деякі галузеві інститути евакуювали до Уфі. Тут А. Прихотько очолювала лабораторію в Інституті фізичної хімії, в якій проводились важливі дослідження для потреб фронту. Вона 1943 року захистила докторську дисертацію і стала першою в СРСР жінкою – доктором фізико-математичних наук.

Після звільнення України від німецької окупації, А. Прихотько створила в Інституті фізики



АН у Києві відділ № 6, який згодом отримав назву відділу фізики кристалів. Свою діяльність вона почала зі створення криогенної лабораторії – другої в Україні та третьої в СРСР. Важливим кроком у розвитку дослідних робіт стало удосконалення експериментальних методик. Загальноприйнятій на той час скляний і кварцевий посуд Дюара, що використовували для спектральних робіт за низьких температур було замінено на сконструйовані та виготовлені у відділі металеві кріостати з прозорими вікнами. Так уперше у світі було закладено основи сучасного кріостатобудування і відповідних вимірювальних систем для спектральних та інших досліджень.

Принципово нові результати фундаментально характеру одержали А. Прихотько під час досліджень у поляризованому світлі низькотемпературних спектрів кристалів низьки ароматичних сполук та їхнього зіставлення зі спектрами вільних молекул. Ще 1946–1948 роках у спектрах кристалів нафталіну вона спостерігала дуплети різкополяризованих смуг поглинання, відсутніх у спектрах вільних молекул. Цей експериментальний факт ліг в основу теорії екситонів, яку розвинув О. Давидов у застосуванні до молекулярних кристалів. Експериментальні та теоретичні роботи проводились у тісній взаємодії і поклали початок нового напрямку в фізиці твердого тіла – спектроскопії екситонних станів у молекулярних кристалах. Внаслідок цього концепція елементарних збуджень кристалів – екситонів у введених у фізику твердого тіла Френкелем раніше, отримала експериментальне підтвердження і подальший розвиток.

В Інституті фізики АН УРСР у 1946–1965 роках у відділі А. Прихотько було виконано великий цикл фундаментальних експериментальних і теоретичних досліджень, що охоплював різні аспекти взаємодії світла з кристалами: поглинання, відбиття, люмінесценцію, дисперсію тощо.

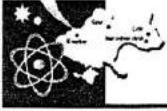
У розвитку екситонних уявлень істотну роль відіграло дослідження ізотопного ефекту в кристалах бензолу і нафталіну групою співпрацівників відділу під керівництвом В. Броуде. Змінюючи ізотопний склад змішаних кристалів, вдалося простежити зародження і формування екситонних зон. Експериментально та теоретично було показано, що з наближенням енергетичного рівня мо-

лекул ізотопної домішки до екситонної зони змінюються частоти, інтенсивності та поляризаційні співвідношення домішкового поглинання, причому домішкові рівні ніби відштовхуються від екситонної зони внаслідок квазірезонансу. Це явище одержало назву ефекта Рашби. М. Соскін вперше виміряв форму смуг поглинання низьки молекулярних кристалів за різних температур, що дало змогу визначити знак ефективної маси екситонів і визначити характер екситон-фоннової взаємодії. Екситонне розщеплення коливальних смуг в інфрачервоних спектрах поглинання молекулярних кристалів уперше спостерігала О. Фіалковська.

Під керівництвом А. Прихотько вивчено в поляризованому світлі низькотемпературні спектри поглинання монокристалів великої кількості гомологів бензолу; встановлено зв'язок між спектрами і структурою кристалів; визначено особливості спектрів різних кристалічних поліморфних модифікацій. Завдяки цим дослідженням було визначено структури молекул і в основному, і збудженому стані. Значну роль в аналізі спектрів кристалів відіграло вивчення звичайних і дейтерованих сполук, а також використання теоретичних уявлень про одностинкові та двочастинкові електронно-коливні переходи. Матеріали, які відображали результати досліджень спектрів поглинання молекулярних кристалів і їхньої інтерпретації було опубліковано у двох томах монографії “Спектри поглинання молекулярних кристалів” за редакцією В. Броуде і А. Прихотько. Для глибшого аналізу екситонних зон кристалів нових органічних сполук у відділі було організовано лабораторію рентгеноструктурного дослідження кристалів.

У відділі А. Прихотько М. Шпак і О. Шека вперше спостерігали власне екситонне свічення молекулярних кристалів. Для цього довелося звернутись до складних методів очищення і вирощування кристалів. Спостереження екситонної люмінесценції дало змогу простежити за структурою екситонних зон кристалів зі зміною температури.

Розпочаті у відділі дослідження екситонного поглинання і дисперсії світла в кристалах антрацену, що характеризуються дипольно активними переходами з великою силою осцилятора (згодом продовжені у відділі М. Бродина), дали змогу



визначити певні особливості оптики кристалів з великим поглинанням. Саме комплексні вимірювання низькотемпературних кривих дисперсій і поглинання кристалів дали змогу виявити принципово нові особливості взаємодії електромагнетних хвиль з кристалами у сфері інтенсивних екситонних переходів. Було встановлено істотне відхилення експериментальних дисперсійних кривих від розрахункових на підставі інтегральних співвідношень Крамерса-Кроніґа. Цю закономірність було пояснено на основі теорії С. Пекара як прояв ефектів просторової дисперсії, що враховує залежність діелектричної проникності кристала не лише від частоти збудження, а й від хвильового вектора екситона.

За цикл фундаментальних експериментальних і теоретичних праць "Екситони в кристалах" О. Давидова, А. Прихотько, В. Броуде, М. Бродина, Е. Рашбу, А. Лубченка 1966 року нагородили Ленінською премією.

А. Прихотько 1948 року стала членом-кореспондентом, а 1954 – академіком АН УРСР. За великі наукові досягнення, їй було присвоєно звання Героя Соціалістичної Праці, нагороджено двома орденами Леніна, орденом Трудового Червоного Прапора, а також медалями.

А. Прихотько разом із колегами свого відділу і теоретиками з Інституту теоретичної фізики НАНУ виконала важливі дослідження спектрів різних модифікацій кристалічного кисню. Було вивчено вплив на оптичні спектри магнетних полів, температури (до 1 К включно), різних домішок. Важливу роль в аналізі енергетичного спектра кристалів кисню відіграло уявлення про біекситонні зони енергії, що зобов'язані взаємодії двох одночасно збуджених екситонів. Було визначено, що кількість взаємодіючих екситонів може бути і більше двох, тобто можливе збудження поліекситонів. За працю "Елементарні збудження і взаємодія між ними в криокристалах", яку виконали А. Прихотько, Л. Шанський, І. Фуголь, В. Манжелій, Ю. Гайдідей і В. Локтев, їх 1977 року нагородили Державною премією України.

Експериментальні та теоретичні дослідження були узагальнені в монографії "Кріокристали" за редакцією Б. Веркіна та А. Прихотько).

У процесі виконання спектральних досліджень виникла низка нових напрямів, які успішно роз-

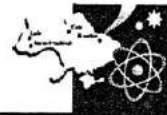
виваються й нині. Вони стосуються не лише молекулярних кристалів, а й напівпровідників, антиферромагнетиків тощо. За ініціативою Антоніни Прихотько в Інституті фізики АН України були створені нові відділи і лабораторії, які очолили її учні.

В Інституті фізики 1960 року було організовано лазерний семінар на чолі з А. Прихотько. Вперше українські фізики 1962 року теоретично обґрунтували можливість одержання лазерної генерації на електронно-коливних переходах молекулярних кристалів в усьому оптичному діапазоні. Водночас почалось створення експериментальної бази для проведення робіт із квантової електроніки. Зусилля вчених були зосереджені на створенні лазерів з перелаштованою частотою. Невдовзі був створений такий лазер, в резонаторі якого замість традиційних двох паралельних дзеркал одне з них було замінене на скляну дисперсійну призму. Перші лазери з перелаштованою частотою генерації на твердому тілі були здійснені на R_2 – лінії кристала рубіна і на склі з неодимом з широкодіапазонним плавним перелаштуванням частоти. Завдяки цьому в Інституті фізики АН України 1963 року було створено відділ оптичної квантової електроніки, який очолив В. Броуде, згодом – М. Соскін.

У відділі, за підтримки А. Прихотько, 1963 року проводились дослідження впливу інтенсивного лазерного випромінювання на діелектрики, напівпровідники і розчини барвників. Завдяки цьому почала розвиватись нелінійна оптика різних середовищ.

У 1965 році сформовано відділ нелінійної оптики, який очолив М. Бродин. Там уперше було створено лазери на змішаних напівпровідниках при їхньому двофотонному збудженні, що забезпечило перелаштування частоти генерації у всій видимій і ближній ділянках спектра; вивчалися нелінійні явища самовпливу в низці кристалів. У відділі продовжили роботи з екситонної тематики, зокрема з дослідження ефектів міжекситонної взаємодії при інтенсивному лазерному збудженні кристалів.

Вивчення люмінесценції молекулярних кристалів А. Прихотько з колегами було продовжено і розширено у новому відділі фотоактивності, який було створено 1966 року під керівництвом М. Шпа-



ка. Там проводили дослідження процесів, що відбуваються в чистих, домішкових і дефектних молекулярних кристалах, а також вивчали нелінійно-оптичні явища в розчинах широкого класу поліметинових барвників. На розчинах барвників реалізована лазерна генерація в усій близькій інфрачервоній ділянці спектра.

За розроблення фізичних основ і методів керування частотою вимушеного випромінювання і створення лазерів з перелаштуванням частоти учнів А. Прихотько – М. Бродина, М. Соскіна і М. Шпака, а також В. Кравченка і В. Резніченко, 1974 року нагородили Державною премією УРСР.

В Інституті фізики 1966 року за ініціативи А. Прихотько було розпочато дослідження в галузі оптичної голографії. Розробляли нові реєструвальні середовища для голографії; отримано ефективні голографічні ґратки на низці сегнетоелектричних і напівпровідникових матеріалів. Проведено дослідження механізмів запису стаціонарних і динамічних голографічних ґраток. За цикл праць “Фізичні основи динамічної голографії і нові методи перетворення структури світлових променів” 1982 року М. Бродина, М. Соскіна і С. Одулова нагородили Державною премією СРСР.

Дослідження у відділі молекулярної фотоелектроніки (створений 1983 року, завідувач М. Курик), пов’язані з розвитком ідей А. Прихотько щодо напівпровідникових властивостей молекулярних кристалів. Було докладно вивчено процеси фото- і теплової генерації носіїв заряду в кристалах і механізми їхньої провідності. Зазначено, що в процесі фотогенерації заряду визначальну роль відіграють екситони.

На початку 1970-х років А. Прихотько організувала в своєму відділі невелику групу молодих фізиків, які займалися вивченням надпровідників. Приводом стала теоретична праця Е. Пашицького про новий можливий механізм надпровідності за участю плазмонів. Під час дослідження керамічних надпровідників було виявлено ефекти, що згодом спостерігалися в високотемпературних надпровідниках.

А. Прихотько активно сприяла розвитку нових методик дослідження кристалів – високочастотної спектроскопії за низьких температур, рентгеноструктурного аналізу кристалів, лазерної швидкісної спектроскопії. На базі групи радіоспект-

роскопії твердого тіла відділу фізики кристалів 1969 року було створено відділ резонансних явищ під керівництвом Д. Байси. Там проводили вивчення енергетичної структури кристалів з різними типами хемічного зв’язку; динаміки кристалічної ґратки, фазових переходів і процесів електричного і магнетного упорядкування в них методами радіоспектроскопії.

У відділі А. Прихотько уперше в СРСР С. Рябченко та його група розпочали магнетооптичні дослідження кристалів з використанням оптичного детектування магнетного резонансу. Згодом ці праці одержали широкий розвиток у новому відділі, яким керує С. Рябченко.

Упродовж декількох років у відділі А. Прихотько активно проводили роботи зі створення спеціальних приладів для кріохірургії (хірургія з використанням низьких температур). Разом із організаціями-співвиконавцями створено і впроваджено в практику декілька кріогенних приладів, за допомогою яких було проведено тисячі онкологічних, нейрохірургічних, урологічних та інших операцій. Унікальна кріохірургічна установка типу “Кріотон”, яку створив Т. Птуха та А. Рікберг зі співпрацівниками, на ВДНГ СРСР 1970 року відзначена срібною медаллю, а на Міжнародному осінньому ярмарку 1971 року в Ляйпцігу – дипломом першого ступеня і золотою медаллю. Деякі прилади було запатентовано в США і Великій Британії.

Вихованці школи А. Прихотько продовжили і розвинули дослідження з фізики екситонів загалом, та з оптики і спектроскопії кристалів у інших наукових центрах і навчальних закладах України. У Фізико-технічному інституті низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України В. Єременко взяв за основу екситонний підхід до розв’язання проблем взаємодії світла з магнетоупорядкованими кристалами. Використання техніки імпульсних магнетних полів і низьких температур сприяло тому, що вже перші експерименти в 1960-х роках дали змогу йому та його учням зробити важливий висновок щодо визначальної ролі у формуванні спектрів поглинання кристалічного антиферромагнетика екситон-магнетної взаємодії. І. Фуголь у цьому Інституті розвинула методику низькотемпературної спектроскопії далекого ультрафіолету.



Я. Довгий і А. Крочук створили і розвинули напрям спектроскопії молекулярних кристалів у Львівському національному університеті імені Івана Франка.

У Полтаві, Сумах і Луцьку екситонну тематику розвивали відповідно Р. Яремко, А. Скоробагатько, Н. Малихіна.

Антоніна Федорівна 1965 року організувала Всесоюзний семінар "Екситони в кристалах", який щорічно проходив у різних місцях Радянського Союзу до 1987 року. Згодом вона організувала також Всеукраїнський семінар "Кріокристали".

А. Прихотько була членом Наукових рад АН СРСР зі спектроскопії, фізики низьких температур, фізики твердого тіла, а також членом декількох наукових рад АН УРСР. Вона входила до складу редколегій декількох наукових журналів.

Антоніна Федорівна віддала багато зусиль у науково-адміністративній роботі. Вона у 1965–1970 рр. була директором Інституту фізики АН УРСР. Це був дуже складний для Інституту час, коли від нього відділялись цілі підрозділи, на базі яких створювали нові Інститути теоретичної фізики та ядерних досліджень. Після такої реорганізації треба було проводити структурні упорядкування в материнському Інституті, визначити передумови і напрями його подальшого розвитку. Вона успішно справилася з цією місією.

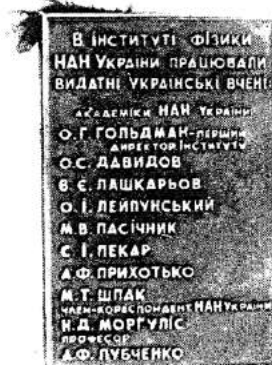
А. Прихотько залишила вагомий слід у фізиці твердого тіла і, особливо, фізиці молекулярних кристалів. Результати її праць не втратили актуальності й досі, її наукові публікації широко цитують. Створена нею наукова школа продовжує активно діяти і успішно розвиватись, утворюючи нові розгалуження та розширюючи сферу творчих пошуків у нових напрямках – фізики наноструктур, рідких кристалів, лазерної оптики і спектро-

скопії тощо. Традиції школи, сформованої А. Прихотько, бережуть її учні, учні їх учнів, що проводять свою наукову діяльність в Інституті фізики та інших наукових закладах України.

Життя та науковий подвиг А. Прихотько – гідний приклад для молоді, що вступає на шлях служіння науці.

Антоніна Федорівна Прихотько померла 29 вересня 1995 року. На Інституті фізики НАН України встановлено пам'ятну таблицю.

У квітні 2006 року в Інституті фізики НАН України було проведено наукову конференцію з нагоди 100-річчя від народження видатного українського фізика, академіка Антоніни Прихотько. Надруковано книжку "Спогади про Антоніну Федорівну Прихотько" про "ученого зі світовим ім'ям, прекрасного учителя, талановитого організатора науки, чудову людину".



БУВАЛЬЩИНА З ІСТОРІЇ ФІЗИКИ

Герман Гельмгольц був визначним ученим, але не блискучим університетським лектором. До нього на лекції постійно ходили постійно четверо: Макс Лауе, Макс Планк, Густав Кірхгоф, а також одна дівчина...

Але в дівчини були інші мотиви. За рік вона стала дружиною Гельмгольца...



У пам'ять дослідника космічних нейтрино Раймонда Девіса

“Нейтрино – це чарівні частинки, дуже маленькі та швидкі, які можуть пройти крізь все, навіть Землю, не зменшуючи швидкості”, – сказав Раймонд Девіс під час нагородження його Нобелівською премією. – Коли я починав роботу, я був заінтригований ідеєю пізнання чогось нового. Дивна річ, що починаючи нові експерименти, ви ніколи не знаєте, чи одержите відповідь на поставлені запитання!”

На 92-му році життя 31 травня 2006 року в м. Нью-Йорку (США) помер видатний фізик, лавреат Нобелівської премії Раймонд Девіс. Його і М. Кошибу нагородили половиною Нобелівської премії з фізики 2002 р. “за дослідження в галузі астрофізики, зокрема за виявлення космічних нейтрино”. Другу половину премії одержав Р. Джакконі “за дослідження в галузі астрофізики, які привели до відкриття космічних джерел рентгенівського випромінювання”.

ДЕВІС Раймонд народився 14 жовтня 1914 року у Вашингтоні (округ Колумбія, США). Його батько був фотографом у Національному бюро стандартів. Він не мав вищої освіти, але був обдарованим, мав багато винаходів, і врешті, очолив секцію технології фотографії. Раймонд від батька успадкував потяг до експериментування та ремонту апаратури. Його мати, Іда Рогерс, народилася в штаті Вирджинія. Вона привила хлопцеві любов до музики, однак не ставила за мету зробити сина музикантом.

У дитинстві Раймонд бавився із своїм молодшим братом, співав у хорі, займався греблею на каное, в секції стрільби з гвинтівки. Його молодший брат вибрав фах військового, а Раймонда батько хотів бачити фотографом, заохочуючи сина до проведення експериментів з хемії, які вони разом проводили у підвалі власного будинку.



ДЕВІС Раймонд (Raymond Davis Jr.)
(14.10.1914–31.05.2006)

Р. Девіс навчався у державних школах Вашингтона, далі в університеті штату Мериленд, який закінчив 1938 року. Рік працював у хемічній компанії, тоді повернувся до університету, щоб здобути ступінь магістра. Р. Девіс навчався в аспірантурі Йельського університету, і 1942 року захистив докторську дисертацію та здобув науковий ступінь з фізичної хемії.

Під час Другої світової війни Р. Девіс як офіцер запасу багато часу проводив на полігонах, випробовуючи хемічну зброю. На дозвіллі займався фотографією. Демобілізувавшись 1945 року з армії, він працював у Хемічній компанії в Маямізбурзі (штат Огайо, США), займався прикладною радіохемією.

Науковець 1948 р. приєднався до щойно створеної Брукгавенської національної лабораторії, яка досліджувала мирне застосування атомної енергії.



Загадкову частинку нейтрино на початку 1930-х років передбачив В. Паулі (лауреат Нобелівської премії з фізики 1945 року) та експериментально підтвердив її існування за 25 років Ф. Рейнс (Нобелівський лауреат з фізики 1995 року). Те, що нейтрино не могли виявити впродовж 25 років зумовлено їх специфічними властивостями. Ці частинки мають малу масу спокою і не мають електричного заряду, надзвичайно слабо взаємодіють з речовиною, тому їх складно реєструвати. Наприклад, трильйони нейтрино щосекунди проходять крізь наші тіла, а ми цього навіть не помічаємо.

Р. Девіс розпочав досліджувати нейтрино ще в 1950-х роках на промисловому ядерному реакторі Саванна-Рівер у штаті Південна Кароліна. Майже тоді ж на цьому реакторі Ф. Рейнс зареєстрував електронні антинейтрино, що народились під час ядерних реакцій у реакторі. Однак нейтрино народжуються не лише в ядерних реакторах, а й на Сонці, і всюди, де відбуваються ядерні реакції.

На вивчення сонячних нейтрино спрямував свої зусилля Р. Девіс на початку 1960-х років. Їх зареєструвати значно складніше, ніж нейтрино реакторного походження, адже їхній потік у багато разів менший від реакторних. Для реєстрації сонячних нейтрино Р. Девіс застосував хлор-аргонний метод Б. Понтекорво і створив нейтринний детектор: величезний бак, заповнений 610 тоннами перхлоретилену – рідини, що зазвичай використовують для хемічного очищення одягу, але для Р. Девіса цінною тим, що вона містить багато атомів хлору (10^{30}). Детектор розмістили під землею на глибині 1480 м, щоб захистити його від космічного випромінювання, в залишеній золоторудній копальні в штаті Південна Дакота. Експозиція мусила тривати майже три місяці, щоб в детекторі утворилось кільканадцять атомів аргону-37. Щоб вилучити ці атоми з детектора, крізь перхлоретилен пропускали дрібненькі бульбашки гелію, які захоплювали атоми аргону. Далі аргон виморожувався під час охолодження суміші гелію з аргоном до температури 77 К та адсорбувався пастками із активованого вугілля. Кількість утворених у детекторі атомів аргону-37 визначали за характеристичним рентгенівським випромінюванням під час радіоактивного розпаду

цих атомів, використовуючи добре захищені від довколишнього радіоактивного фону пропорційні лічильники. На початку 1970-х років за допомогою такого обладнання Р. Девіс зареєстрував сонячні нейтрино, однак перші результати показали, що потік сонячних нейтрино в 10 разів менший від очікуваного. Згодом, удосконаливши систему реєстрації радіоактивних атомів аргону, дослідник реєстрував потік лише вдвічі-втричі менший за очікуваний. Упродовж тридцятирічних спостережень йому вдалось зареєструвати майже 2000 сонячних нейтрино. Сам факт реєстрації потоку сонячних нейтрино свідчив, що в глибинах Сонця протікають термоядерні реакції. І це не підлягає сумніву! Незбіжність потоків нейтрино, зареєстрованих експериментально і розрахованих теоретично, мабуть, пов'язане з осциляцією нейтрино (перетворення електронних нейтрино на мюонні) на шляху від Сонця до Землі.

Проблема дефіциту сонячних нейтрино, на яку вказали дослідження Р. Девіса, стимулювала й інші нейтринні експерименти, насамперед створення нових нейтринних детекторів. Такий детектор, який назвали "Каміоканде", сконструювала група науковців, яку очолював М. Кошиба для того, щоб перевірити результати Р. Девіса. Цей детектор розташований в старій копальні Каміюка (Японія) на глибині 1,5 км. Він містить понад дві тисячі тонн води, яку "оглядають" тисячі фотопомножувачів. У випадку взаємодії нейтрино з атомом водню, утворюються електрони, які мають швидкість близьку до швидкості світла. Їхній рух у воді зумовлює випромінювання Черенкова, яке реєструють фотопомножувачі. 23 лютого 1987 року під час спалаху наднової зорі цей детектор зміг зареєструвати потік нейтрино, що прийшов до нас із сусідньої галактики. Детектор зміг зареєструвати 12 нейтрино із 10^{16} , що пройшли крізь нього. Піонерські дослідження Р. Девіса та М. Кошиби започаткували новий напрям астрономії – нейтринну астрофізику.

Р. Девіс разом із Олівером Шеффером розробляли методи визначення геологічного віку скал, метеоритів. Він у 1971–1973 роках брав участь у дослідженнях місячного пилу і уламки скель, які було зібрано командою Аполлона 11 під час першого польоту НАСА до Місяця.



Майже п'ятдесят років працював Р. Девіс у Брукгавенській національній лабораторії. Це незалежний науково-дослідницький центр, який фінансують дев'ять університетів північно-західних штатів Америки за контрактом із федеральною адміністрацією. Дослідження добре фінансували, однак були випадки, коли науковцям не вистачало коштів для досліджень. Р. Девісові дуже допомагало те, що він був природженим експериментатором, умів працювати руками та імпровізувати. Це стосується й досліджень, за які науковець одержав Нобелівську премію.

Р. Девіс був одружений з Анною Торрей. Вони мали трое синів і дві доньки. Майже всі діти також стали науковцями. Він завжди був привітний, завжди готовий допомогти цінною порадою та конкретною справою в проведенні експериментів. Він охоче з колегами годинами міг обговорювати результати досліджень. Науковець був цілеспрямований, впертий, мав добру інтуїцію.

Вийшовши 1984 року на пенсію, Р. Девіс продовжив свої дослідження на фізико-астрономічному факультеті Пенсильванського університету. Він залишив наукову діяльність лише 1999 року.

Науковець разом із сім'єю мешкав у Блю-Пойнті – невеличкому селищі на острові Лонг-Айленд (штат Нью-Йорк). Учений любив класичну музику, захоплювався плаванням під вітрилами, часто заходив на своїй яхті далеко в Атлантичний океан.

Нобелівську премію вручили Р. Девісу запізно. В останні роки життя він страждав розладом пам'яті, і невідомо чи усвідомлював, що його нагородили такою престижною премією.

Крім Нобелівської премії, Р. Девіса також нагородили багатьма преміями різних академій, інститутів, фізичних товариств тощо. Він був членом Американської національної академії наук, Американської академії мистецтв і науки, Почесним доктором багатьох університетів.

Фізики уперше створили молекулярний позитроній

Аллен Міллс (Allen Mills) та його колеги з Каліфорнійського університету в Ріверсайді стверджують, що знайшли підтвердження існування в лабораторній установці двоатомних молекул позитронію – вперше в світі.

Позитроній – це атом, аналогічний до атома водню, але протон у ньому замінений на позитрон (антиелектрон). Оскільки речовина та антиречовина анігілюють – позитроній украй нестабільний. Він живе менше мільярдної частки секунди і перетворюється на гамма-промені.

Тому добитися не просто виникнення таких атомів, а ще й підвищення їх концентрації, щоб вони зближувалися між собою – дуже складно.

Але в теорії, два атоми позитронію здатні створити короткоживучу молекулу – Ps_2 , хімічно ідентичну до молекули водню, але відмінну від неї з погляду фізики (наприклад, легша майже в 2 тисячі разів).

На практиці це вдалося здійснити тільки тепер – групі А. Міллса. Дослідники скерували промінь позитронів, що випускаються під час розпаду радіоактивного натрію, в мішень, яка зроблена з кварцу, повного крихітних отворів.

У зіткненнях деякі з позитронів забирали від кварца електрон і формували позитроній. Атоми позитронію нагромаджувалися в пористому кварці, і деякі з них формували на короткий час молекули Ps_2 .

Про це свідчило вимірювання рівня гамма-радіації (виникаючої в результаті анігіляції молекул позитронію) по відношенню до рівня, розрахованого без врахування таких процесів (рівень був надзвичайно високий, що вказувало на короткочасне утворення молекул позитронію).

Це не єдино можливе пояснення результатів. Автори роботи мають намір все перевірити ще раз, і відсіяти можливі помилки, використовуючи інші мішені в аналогічних дослідах.

Якщо відкриття підтвердиться, воно буде першим свідченням реакції в галузі принципово нової хемії – хемії “вибухаючих атомів”.



До 85-річчя від дня народження



Андрій Сахаров – моральне сумління науковців

Галина Шопа,
Львівський національний університет
імені Івана Франка

*Андрій Дмитрович Сахаров
(Andrey D. Sakharov)
(21.05.1921–14.12.1989)*

21 травня 2006 року виповнилося б 85 років видатному фізикуві, громадському діячеві, правозахисникові, лавреату Нобелівської премії миру Андрієві Дмитровичу Сахарову.

Батько Андрія Сахарова, Дмитро Іванович Сахаров (1889–1961), був відомим викладачем фізики, автором підручників і науково-популярних книжок. Він 1907 року закінчив зі срібною медаллю одну з найкращих у Москві гімназій і вступив на медичний факультет Московського університету, але 1908 року перевівся на математичне відділення фізико-математичного факультету за фахом “фізична географія”. У березні 1911 року Дмитра Івановича Сахарова виключили з університету за участь у студентських зібраннях, але вже в травні поновили, і весною 1912 року він закінчив навчання з дипломом першого ступеня. Цього ж року він вступив до Педагогічного інституту ім. Шеллапутіна (цей навчальний заклад засновано 1911 року на засоби промисловця і відомого мецената Павла Шеллапутіна спеціально для підготовки випускників університетів до педагогічної діяльності). Дмитро Сахаров 1914 року закінчив навчання, а під час Першої світової війни

служив в армії санітаром. Математику він викладав із 1912 року в жіночій гімназії. Фізику почав викладати з 1917 року в гімназії П. Попової, а з 1921 року – в Комуністичному університеті імені Я. Свердлова. Перша книжка Д. Сахарова “Боротьба за світло. Як розвивалася і чого досягла техніка освітлення” була надрукована 1925 року. Під час Другої світової війни Дмитро Сахаров викладав у Московському державному політехнічному інституті. Він 1942 року здобув науковий ступінь кандидата педагогічних наук за фахом “фізика” (тема дисертації “Збірка задач з фізики для педінститутів”). ВАК Міністерства вищої освіти СРСР підтримало колективне клопотання викладачів МОП і Вченої ради МГПІ про присудження доцентів, канд. пед. наук Д. Сахарову 1956 року ступеня доктора педагогічних наук “без захисту дисертації, за загальною сукупністю його науково-методичних праць, які зробили значний вплив на розвиток радянської методики фізики”.

“Фізиком мене зробив тато, а то хтозна куди б мене занесло!” – говорив Андрій Дмитрович. Обидва сини Дмитра Івановича – Андрій і Георгій стали фізиками.



У роки, коли ім'я Андрія Сахарова замовчували або всіляко очорнювали, стали вдаватися до забуття й ім'я його батька. Книжки Д. Сахарова перестали перевидавати, його ім'я не згадували у зв'язку з переглядом історії радянської методики викладання фізики.

Людина високої культури, Дмитро Іванович Сахаров не був вузьким фахівцем, для якого існувала лише одна фізика. Він добре знав літературу, мистецтво, особливо любив музику. Володіючи абсолютним слухом, він, деякий час навчався в Музично-педагогічному училищі, але не став професійним музикантом. Він багато й охоче грав "для себе" та друзів, у роки громадянської війни заробляв на життя, граючи в німому кіно.

Мати Андрія Сахарова, Катерина Олексіївна Софіано, освіту одержала в Дворянському інституті в Москві, привілейованому навчальному закладі, який давав більше виховання, ніж освіти. Закінчивши його, вона декілька років викладала гімнастику в одному з навчальних закладів у Москві. Дід Андрія Сахарова по материнській лінії, Олексій Семенович Софіано, був професійним військовим, артилеристом. Після російсько-японської війни вийшов у відставку із званням генерал-майора. Серед його предків були греки.

Дитинство Андрія Сахарова пройшло у великій комунальній квартирі, де зберігався традиційний дух великої міцної сім'ї – працьовитість і пошана до праці, взаємна сімейна підтримка, любов до літератури і науки. Це мало великий вплив на Андрія, який перші роки навчання провів удома.

Андрій Сахаров 1938 року з відзнакою закінчив школу і вступив на фізичний факультет Московського державного університету. Під час Другої світової війни, перебуваючи в евакуації в Ашгабаді, він 1942 року закінчив цей університет із відзнакою.

Улітку 1942 А. Сахаров працював на лісозаготівельних роботах, а з вересня – його скерували на великий військовий завод до Ульяновська, де він працював інженером до 1945 року, зробивши декілька винаходів у галузі контролю продукції. Того ж року А. Сахаров вступив до аспірантури Фізичного інституту АН СРСР ім. П. М. Лебедева, в листопаді 1947 року захистив дисертацію, а 1948 року долучився до науково-дослідницької групи, яка розробляла термоядерну зброю. Очо-

лював цю групу Ігор Євгенійович Тамм. А. Сахаров разом із І. Таммом 1950 року став одним із ініціаторів праць із дослідження керованої термоядерної реакції. У 1953 році відбулося перше випробування радянської водневої бомби, а Андрія Сахарова обрали академіком Академії наук СРСР.

З кінця 1950-х років Андрія Сахарова вважали "батьком" радянської водневої бомби, він активно виступав за припинення випробувань ядерної зброї. Через його виступи за обмеження ядерних випробувань 1961 року у нього виник конфлікт із М. Хрущовим, 1962 року – з міністром середнього машинобудування Славським. А. Сахаров був одним з ініціаторів укладення Московського договору 1963 року про заборону випробувань у трьох середовищах: атмосфері, воді та космосі. Він із 1967 року брав участь у роботі Комітету із захисту Байкалу. Андрій Сахаров одержав багато нагород, серед них йому тричі присвоювали звання Героя Соціалістичної Праці (1954, 1956 і 1962).

Перше звернення А. Сахарова на захист репресованих з'явилося у 1966–1967 рр., а 1968 року було надруковано його статтю "Роздуми про прогрес, мирне співіснування та інтелектуальну свободу". "Цей виступ став поворотним в усій моїй подальшій долі. У радянській пресі "Роздуми" довго замовчували, згодом про них стали згадувати вельми несхвально. Навіть багато хто із співчуваючих критиків сприймали мої думки в цій праці як дуже наївні, прожекторські."

З липня 1968 року, після публікації за кордоном статті "Роздуми", його усунули від секретних робіт і "відлучили" від привілеїв радянської "номенклатури". Від 1970 року захист прав людини, захист людей, що стали жертвами політичної розправи, стало для А. Сахарова головним у житті. За два роки на науковця зі світовим ім'ям та його родичів посилювався тиск. А. Сахаров став одним із засновників Московського комітету з прав людини, висловлювався з проблем забруднення довкілля, за відміну смертної кари, за право на еміграцію, проти примусового лікування "інакомислячих" у психіатричних лікарнях.

А. Сахаров одружився 1972 року з правозахисницею Оленою Боннер.

Андрія Сахарова "за безстрашну підтримку фундаментальних принципів миру між народами



і за мужню боротьбу із зловживаннями владою і будь-якими формами придушення людської гідності” 1975 року нагородили Нобелівською премією миру.

У грудні 1979 року, відразу після введення радянських військ до Афганістану, А. Сахаров неодноразово публічно засуджував агресію СРСР. Він не лише засуджував дії уряду СРСР, а й висловлював підтримку бойкоту Московської олімпіади через вторгнення радянських військ до Афганістану, сказавши, що “за стародавнім олімпійським статусом, під час Олімпіад війни припиняються. Я вважаю, що СРСР має вивести свої війська з Афганістану. Це надзвичайно важливо для всього людства.”

8 січня 1980 року було видано Указ про позбавлення Андрія Сахарова усіх урядових нагород СРСР (ордени Леніна, звання тричі Героя Соціалістичної Праці, лауреата Ленінської і Державної премій) “у зв’язку із систематичним здійсненням Сахаровим А. Д. дій, що порочать його як нагородженого, і беручи до уваги численні пропозиції радянської громадськості”. А. Сахарову оголосили про це 22 січня і вислали його до м. Горького (це місто було закрито для іноземців, нині Нижній Новгород, Російська Федерація). Не знайшлося

жодного науковця чи іншої впливової інтелігентної людини в СРСР, яка б підтримала публічно видатного фізика. І якби така підтримка була, не відомо як могла б повернутися доля А. Сахарова?!

У м. Горькому А. Сахаров опинився в умовах майже повної ізоляції та під круглодобовим наглядом. На знак протесту проти незаконних дій властей щодо його родини А. Сахаров двічі оголошував голодування: 1984 і 1985 роках.

У грудні 1986 року за розпорядженням президента СРСР Михайла Горбачева А. Сахарову дозволили повернутись до Москви. Останні роки життя науковець активно займався правозахисною діяльністю. У березні 1989 року А. Сахарова було обрано народним депутатом СРСР від Академії наук, він став одним із лідерів групи радикально налаштованих депутатів.

Наукові праці Сахарова Андрія Дмитровича стосуються галузі фізики елементарних частинок, магнетної гідродинаміки, фізики плазми, керованого термоядерного синтезу, елементарних частинок, астрофізики

Помер Андрій Дмитрович Сахаров 14 грудня 1989 року в Москві. Попрощатися з великим науковцем прийшли сотні тисяч людей.

*Читайте також про цього ученого в статті В. Тихонова “Андрій Сахаров – учений і громадянин” у журналі “Світ фізики”, 1998. № 1. – С. 20–22.

ЧИ ЗМЕНШУЄТЬСЯ КІЛЬКІСТЬ УЧЕНИХ?

За останніми статистичними даними кількість докторських ступенів, які здобувають науковці в США (таке право мають 413 університетів США), продовжує знижуватися. Досягнувши максимуму 1998 року, нині він упав до рівня 1993 року. Найбільше зниження стосується галузі природничих і технічних наук.

Кількість докторських ступенів у галузі природничих і технічних наук було присуджено науковцям (по роках): 1998 р. – 27 283; 2001 р. – 25 525; 2002 р. – 24 558.

У відсотковому вираженні станом на 2002 рік це виглядає так: у галузі гуманітарних наук – 80%; фізичних – 55%; технічних – 39%. Найбільше іноземних науковців, які в США одержали докторські ступені з природничих і технічних наук, із Китаю (2395 осіб), Південної Кореї (854 осіб), Індії (678 осіб), Тайвані (489 осіб) і Канади (312 осіб).

Умови задач XLIII Всеукраїнської олімпіади з фізики Одеса, 2006 р.

8-й клас

Задача 1.

У схемі (рис. 1) всі амперметри однакові і всі резистори R однакові. Верхній амперметр показує силу струму $I_a = 1$ мА, середній – силу струму $I_c = 4$ мА. Напруга ідеального джерела напруги $U_0 = 4,5$ В. Що показує нижній амперметр? Чому дорівнює опір резисторів R ?

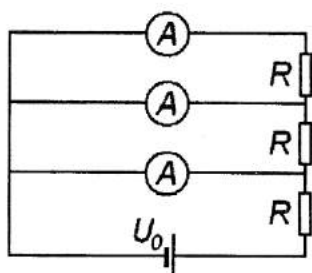


Рис. 1

Задача 2.

У теплоізолювану посудину помістили $m_1 = 4$ кг льоду при температурі $t_1 = -20$ °С, $m_2 = 4$ кг води при температурі $t_2 = 50$ °С і $m_3 = 100$ г пари при температурі $t_3 = 100$ °С. Визначіть температуру в посудині, а також маси води, льоду та пари після встановлення теплової рівноваги. Питома теплота плавлення льоду $\lambda = 340$ кДж/кг, питома теплоємність льоду та води відповідно $c_1 = 2,1$ кДж/(кг °С) і $c_2 = 4,2$ кДж/(кг·°С), питома теплота пароутворення води $r = 2300$ кДж/кг.

Задача 3.

Отвір у дні посудини щільно закритий конічний корком (рис. 2). Площа основи корка S , висота L . Рівень дна посудини перетинає конус на половині його висоти. Густина корка та рідини дорівнює відповідно ρ_0 і ρ . Якою має бути мінімальна висота рівня рідини $H_m > 0$ над основою конуса, щоб корок не спливав? Яку зовнішню силу F , напрям-

лену догори, треба прикласти до корка, щоб його витягти, якщо висота рівня рідини над основою конуса $H > H_m$?

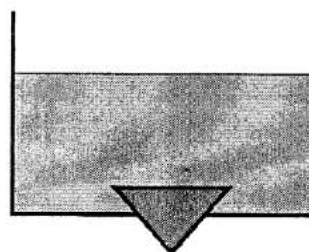


Рис. 2.

Примітка. Об'єм конуса $V = SL/3$.

Задача 4.

Телескопічний реостат складається з трьох металевих тонкостінних трубок однакової довжини, які щільно вставлені одна в одну. Побудуйте залежність опору реостата від його довжини. Напруга прикладається до кінців реостата. Довжина кожної трубки 50 см, радіус трубок майже 5 см, товщина стінок 0,1 мм, питомий опір 10^{-7} Ом·м.

Задача 5.

Дві дитячі залізнички мають вигляд кіл, що перетинаються в точках A та B (рис. 3). Одночасно з цих точок відправляються два однакові потяги,

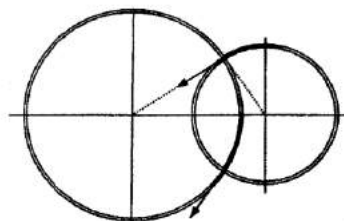


Рис. 3.

кожен уздовж своєї колії. Визначіть, за який час після початку руху відбудеться “залізнична аварія”. Відомо, що потяг за 5 с проїжджає нерухому точку, а за 1 хв робить повне коло вздовж залізничної більшого радіусу. Кути, під якими з центрів кіл видно точки A і B , становлять 60° і 120° . Оцініть, яким може бути найбільший час безаварійного руху на цих залізницях.

Задачі запропонували:
С. У. Гончаренко (1–3)
О. Ю. Орлянський (4, 5),

9-й клас

Задача 1.

Отвір у дні посудини щільно закритий конічний корком (мал. 1). Площа основи корка S , висота L . Рівень дна посудини перетинає конус на половині його висоти. Густина корку та рідини дорівнює відповідно ρ_0 і ρ . Якою має бути мінімальна висота рівня рідини $H_m > 0$ над основою конуса, щоб корок не спливав? Яку зовнішню силу F , напрямлену догори, треба прикласти до корка, щоб його витягти, якщо висота рівня рідини над основою конуса $H > H_m$?

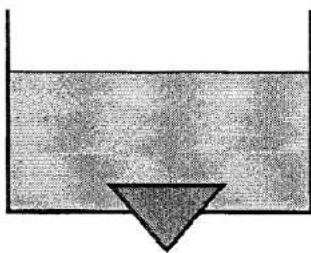


Рис. 1.

Примітка. Об'єм конуса $V = SL/3$.

Задача 2.

У фільмах про східні єдиноборства можна бачити, як герой вибігає на вертикальну стіну. Оцініть максимальну висоту, на яку, розігнавшись до швидкості $v_0 = 6$ м/с, може піднятися таким способом добре тренувана людина. Коефіцієнт тертя між стінкою та взуттям $\mu = 0,6$. Відомо, що рекорди зі стрибків у висоту трохи перевищують 2 м.

Задача 3.

Гора має форму конуса, схил якого утворює кут із горизонтом. На вершину гори веде дорога, яка піднімається під постійним кутом β до площини горизонту і навивається навколо гори так, що будь-яка ділянка дороги в напрямку, перпендикулярному до лінії підйому, горизонтальна. Визначіть час t_1 , за який можна піднятися на гору автомобілем, що їде зі сталою швидкістю v . Уявіть, що наприкінці дороги в автомобіля відмовили коробка передач і гальма. Визначіть, за який час t_2 автомобіль скотиться із гори при вмілому керуванні водія. За якого коефіцієнта тертя μ між колісною гумою і покриттям дороги це можливо? Опором повітря знехтуйте. Висота гори h .

Задача 4.

10 однакових плавких запобіжників з'єднані так, як зображено на рис. 2. Окремий запобіжник перегоріє при протіканні через нього струму силою понад $I_0 = 6$ А. Визначіть силу струму I_m , при перевищенні якої точки A та B виявляться ізольованими одна від одної.

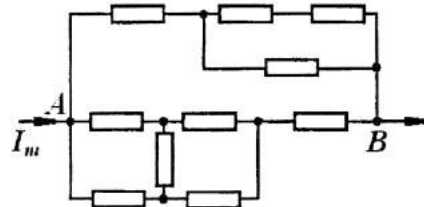


Рис. 2.

Задача 5.

На дні посудини, вщерть заповненої водою, горизонтально лежить тонке плоске дзеркало. Хлопець, нахилившись над посудиною, бачить зображення свого ока в дзеркалі на відстані $d = 25$ см. Відстань від ока до поверхні води $h = 5$ см. Показник заломлення води $n = 4/3$. Визначіть глибину посудини. Всі кути, які промінь утворює з вертикаллю, малі.

Задачі запропонували:
С. У. Гончаренко (1, 4, 5)
О. Ю. Орлянський (2, 3),

10-й клас

Задача 1.

Заряджена частинка масою m рухається у вакуумі в площині XOY . Її положення фіксується через проміжки часу $\Delta t = 80,0$ мс. Вісь OY спрямована вертикально догори. Однорідне електричне поле напруженістю E спрямоване під кутом $\beta = -45^\circ$ до осі OX . Координати трьох послідовних положень дорівнюють: $x_1 = 19,0$ мм, $y_1 = 127$ мм; $x_2 = 101$ мм, $y_2 = 185$ мм; $x_3 = 237$ мм, $y_3 = 149$ мм. Знайдіть заряд q та значення мінімальної швидкості v_{\min} частинки.

Задача 2.

У фільмах про східні єдиноборства можна бачити, як герой вибігає на вертикальну стіну. Оцініть теоретично максимальну висоту, на яку, розігнавшись до швидкості $v_0 = 6$ м/с, може піднятися таким способом добре тренувана людина. Коефіцієнт тертя між стінкою та взуттям $\mu = 0,6$. Вважайте, що така людина може подолати висоту 2 м на змаганнях зі стрибків угору з розбігу.

Задача 3.

Круглу пластину діаметром $d = 4$ мм і товщиною $a = 0,5$ мм обережно покладіть на поверхню води. Завдяки поверхневому натягу вона залишається на плаву, причому на місці дотику верхньої площини пластинки з поверхнею води кут між ними дорівнює 90° (рис. 1). Визначіть густину матеріалу пластинки. Поверхневий натяг води $\sigma = 73$ мН/м.

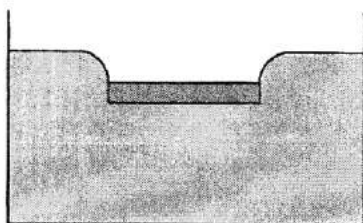


Рис. 1.

Задача 4.

Замкнену трубку, яка має вигляд прямокутного трикутника з гострими кутами 30° і 60° , утримують у вертикальній площині. Горизонтальна ділянка трубки заповнена водою, решту трубки займає повітря при атмосферному тиску. Трубку перевертають у вертикальній площині на 90° навколо точки C , як зображено на рис. 2. Під час повороту стовпчик рідини залишається нерухомим щодо трубки. Визначіть залежність кутової швидкості ω , з якою повертають трубку, від кута повороту φ . Побудуйте залежність тиску всередині стовпчика води від відстані до точки C і визначіть, за яких умов і в якому місці стовпчика вода може почати кипіти.

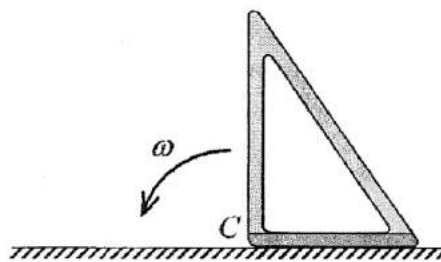


Рис. 2.

Задача 5.

На дні посудини, заповненої водою, горизонтально лежить плоске дзеркало. Хлопець, нахилившись над посудиною, бачить зображення свого ока в дзеркалі на відстані $d = 25$ см. Відстань від ока до поверхні води $h = 5$ см. Показник заломлення води $n = 4/3$. Визначіть глибину посудини. Всі кути, які промінь утворює з вертикаллю, вважайте малими.

Задачі запропонували:

А. П. Федоренко (1),
О. Ю. Орлянський (2, 4),
С. У. Гончаренко (3, 5))



II клас

Задача 1.

При певному значенні кута α нахилу площини розглядаються два випадки руху трубки по цій площині. В першому випадку поздовжня вісь трубки утворює з горизонтом кут α , у другому – вона під час руху залишається горизонтальною. В обох випадках трубка спочатку була нерухома. Визначіть ті значення кута α , при яких в обох випадках вісь трубки має однаковий закон руху. Визначіть і порівняйте кількість виділеного тепла при однакових вертикальних переміщеннях h . Коефіцієнт тертя ковзання μ заданий, тертям кочення знехтуйте.

Задача 2.

Велосипед їде з постійною швидкістю v . Перпендикулярна до площини колеса складова індукції магнетного поля Землі дорівнює B . Визначіть залежність від часу ЕРС індукції, яка виникає в спиці. Вважайте, що спиці розташовані радіально, а їхня довжина дорівнює радіусу колеса R . Нехтуючи опором ободу колеса, знайдіть розподіл струмів через спиці та розташування точок рівного потенціалу.

Задача 3.

Електричне коло складене з джерела змінної ЕРС $E(t) = E_m \sin \omega t$, активного опору R та діода з вольт-амперною характеристикою $I(U) = U_2, U > 0, I(U) = 0, U \leq 0$.

- Знайдіть миттєве значення напруги на діоді.
- Вважаючи виконаною умову $RE_m \ll 1$, розрахуйте постійну складову струму через опір R .
- Нехай тепер паралельно до опору R увімкнений конденсатор ємністю C .

Вважаючи виконаними умови

$$R \gg (\omega C)^{-1} \gg (\alpha E_m)^{-1},$$

знайдіть глибину пульсацій (відношення пульсаційної складової до постійної складової напруги) на ємності.

Вказівка.

Зарядка конденсатора C через опір R від джерела напруги U_0 відбувається за законом

$$U(t) = U_0 [1 - \exp(-t/RC)],$$

розрядка від початкової напруги через опір R – за законом

$$U(t) = U_0 \exp(-t/RC).$$

Задача 4.

Літак швидко набирає висоту над морем і в момент входу в зону прямого бачення берегової лінії пілот починає приймати радіо 106 FM від передавача, який знаходиться на березі на висоті $h = 30$ м над рівнем моря на відстані $l = 60$ км від літака. Протягом подальшого підйому інтенсивність радіосигналу періодично змінюється, хоч відстань l залишається незмінною. Вважаючи, що радіохвилі поширюються в однорідній атмосфері, визначіть різницю висот між першим і другими найнижчими максимумами інтенсивності, зареєстрованими пілотом.

Задача 5.

Щоб краще роздивитися сцену в театрі, короткозорий глядач попросив у далекого сусіда окуляри, якими той користувався для читання. Короткозорий чітко бачить без окулярів у межах від $d_1 = 14$ см до кількох десятків сантиметрів. Далекозорий без окулярів чітко бачить предмети не ближче $d_2 = 2$ м від очей. Як короткозорий глядач, користуючись окулярами сусіда, може роздивитися сцену? Чи будуть деталі сцени здаватися йому чіткими? Вважайте, що сцена знаходиться досить далеко.

Задачі запропонували:

- А. П. Федоренко (1),
- О. Ю. Орлянський (2),
- І. О. Анісімов (3),
- В. П. Сохацький (4),
- С. У. Гончаренко (5)

ЗА ЛАШТУНКАМИ ОЛІМПІАДИ

Олег Орлянський,

*кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри теоретичної фізики
Дніпропетровського національного університету*

Олімпіада з фізики, як відомо, проводяться для дітей: школярів загальноосвітніх шкіл, гімназій, ліцеїв. Але в її роботі беруть участь багато дорослих.

По-перше, учителі, які працюють з молоддю в усіх куточках України. Вони розповідають про повсякденне і дивовижне, вчать проводити обчислення і ставити досліди, діляться власним досвідом, відповідають на запитання, або підказують шляхи, на яких можна знайти відповіді. Ці люди допомагають зрозуміти життя, пробуджують у школярів любов до фізики, а, отже, й до світу, який нас оточує. На олімпіаді присутні вчителі серед керівників команд, членів журі та оргкомітету.

По-друге, науковці та викладачі вищих навчальних закладів. До них прийдуть вчитися ті, хто сьогодні змагається і розв'язує складні задачі.

Усіх дорослих об'єднує бажання провести олімпіаду об'єктивно і красиво, на високому творчому і науковому рівні, щоб ні в кого не виникло найменшої образи, і всі юні фізики, незалежно від занятого місця, повернулися додому з приємними та світлими спогадами. В останні роки проведення Всеукраїнських олімпіад з фізики членам журі та оргкомітетові олімпіади це вдається у все більшій мірі й насамперед, за загальною думкою, завдяки наполегливим зусиллям Бориса Кременського, завідувача відділом роботи з обдарованою молоддю науково-методичного центру Міністерства освіти і науки України.

Зникла напруженість у відношеннях між членами журі та командами, змінився регламент проведення апеляцій, розбір задач почав нагадувати невеликі науково-популярні лекції перед доброзичливою аудиторією, з'явилася дуже цікава і корисна демонстраційна олімпіада, яка попри песимістичні прогнози, продовжує дивувати і захоп-

лювати і молодь, і дорослих завдяки неабиякій майстерності та винахідливості Валерія Колебошина, Павла Віктора, Андрія Шарого.

Двічі за час олімпіади, а саме перед теоретичним та експериментальним турами, члени журі прокидаються о четвертій годині ранку і збираються в спеціальному приміщенні, де о п'ятій починається обговорення задач. Вже традиційно перед початком обговорення Олена Хоменко забирає мобільні телефони і віддає їх уже після десятої години ранку, коли школярі починають працювати над розв'язуванням завдань, а членів журі звільняють від добровільного "ув'язнення".

Ранкові наради під головуванням заступника голови журі завідувача кафедри фізичної електроніки Київського національного університету ім. Т. Г. Шевченка Ігоря Анісімова вже неодноразово виправдовували себе, адже, як добре відомо: "Не помиляється тільки той, хто нічого не робить", та, як кажуть: "Одна голова – добре, а дві – краще".

За останні роки змінилися принципи підбору задач. Більшість задач олімпіади оригінальні та авторські. Під час підготовки до олімпіади відбір задач здійснюють голова журі, академік Академії педагогічних наук України Семен Гончаренко, Ігор Анісімов і Борис Кременський. Відібрані задачі уточнюють або змінюють на ранковій нараді членів журі.

Очевидно, що не так просто підібрати збалансовані завдання. Виходячи з програмних вимог, потрібно врахувати тематичне різноманіття вивченого матеріалу, рівень складності задач та час, який відведено на їхнє розв'язування. Через те деякі задачі зазнають невеликих змін. Наприклад, зменшується кількість питань, особливо, коли якесь із них розраховане на матеріал 11-го класу, а задачу пропонують для 10-го. Правомірність та-

кого підходу незаперечно, але будь-якому авторові, звісно, хотілося б побачити запропоновану задачу в авторському формулюванні.

Пропоную читачеві дві задачі з двох останніх Всеукраїнських олімпіад, а також задачу, яку обговорювали як альтернативну для 10-го класу під час ранкової наради членів журі 29 березня 2006 року в м. Одесі.

Лампа розжарення

Без третього і четвертого запитань задачу пропонували учням 9-х класів на Всеукраїнській олімпіаді з фізики, яка проходила 2005 року в м. Хмельницькому).

Опір електричної лампочки збільшується зі збільшенням температури нитки розжарення. Учень 8-го класу провів вимірювання і зняв залежність сили струму через лампочку від поданої на неї напруги (див. рис. 1).

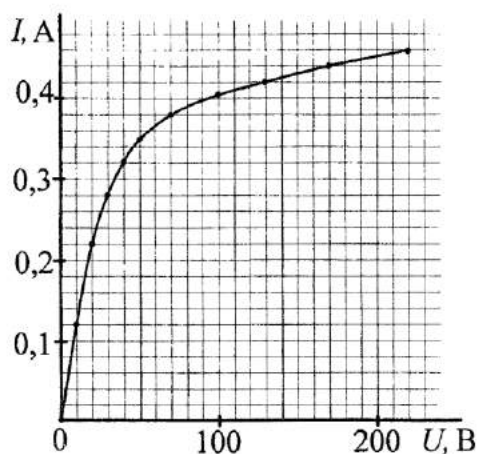


Рис. 1

1. Визначте найбільший і найменший опір лампочки.

2. Оцініть середнє значення температурного коефіцієнту опору матеріалу нитки накалу, якщо відомо, що при напрузі 220 В температура нитки становить 2000 °С.

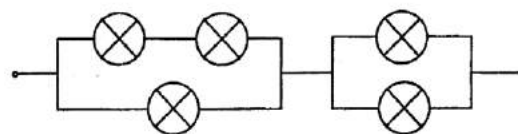


Рис. 2

3. Побудуйте графік залежності потужності, яка виділяється в колі з п'яти таких лампочок (див. рис. 2), від поданої напруги (достатньо взяти 5 точок).

4. Як Ви вважаєте, у якому випадку освітленість кімнати буде більша, якщо напругу 220 В подати на одну лампочку чи на запропоноване з'єднання з п'яти лампочок?

Розв'язок

Опору лампочки $R = U/I$ на графіку відповідає відношення горизонтальної координати точки до вертикальної. Найбільшим опір лампочки буде при напрузі 220 В,

$$R_{\max} = U_{\max} / I_{\max} \approx 480 \text{ Ом},$$

а найменшим при кімнатній температурі. Для того, щоб точніше визначити його, потрібно провести дотичну до графіку в точці початку координат і знайти відношення відповідних сторін прямокутного трикутника,

$$R_{\min} \approx 70 \text{ Ом}.$$

Нехтуючи зміною лінійних розмірів нитки лампочки з температурою, визначмо середнє значення температурного коефіцієнту з формули

$$R = R_{\min} (1 + \alpha(t - t_{\min})),$$

де візьмемо кімнатну температуру $t_{\min} = 20^\circ\text{C}$ (звичайно, ця температура дуже мала порівняно з температурою $t_{\max} = 2000^\circ\text{C}$ і її значенням можна знехтувати).

Отже,

$$\alpha = \frac{R_{\max} - R_{\min}}{R_{\min}(t_{\max} - t_{\min})} \approx 0,003 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}.$$

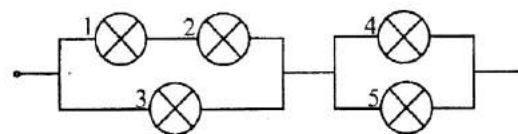
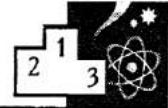


Рис. 3



Розгляньмо з'єднання п'яти лампочок. Оскільки опір лампочки не є сталим, задавати напругу на всьому колі, а потім намагатися розрахувати напруги, сили струмів і потужності на всіх лампочках – завдання дуже складне. Краще підійти до побудови графіку з протилежного боку. Припустімо, що падіння напруги на лампочці 1 (див. рис. 3) дорівнює $U_1 = 20$ В. Тоді струм через неї згідно графіку буде $I_1 = 0,22$ А. Такий самий струм і таке ж падіння напруги будуть і на другій лампочці, яка з'єднана з першою послідовно. Тоді напруга на третій $U_3 = 40$ В, а сила струму згідно графіку $I_3 = 0,32$ А. Струми I_1 і I_3 сходяться у вузлах.

Отже, загальний струм у колі $I = I_1 + I_3 = 0,54$ А. Цей струм порівну ділиться між паралельно з'єднаними лампочками 4 і 5. Отже, через кожну таку лампочку протікає струм $I = I_4 + I_5 = 0,27$ А. Знову скористаймося графіком. Струму 0,27 А відповідає напруга між 25 В і 30 В. Візьмімо 27 В, віддаючи собі звіт у неточності отриманого значення (краще, але довше, було б скористатися методом обмежень і визначити інтервал, до якого потрапляє значення потужності). Загальна напруга, яка прикладена до всього кола, дорівнює

$$U = 40 \text{ В} + 27 \text{ В} = 67 \text{ В,}$$

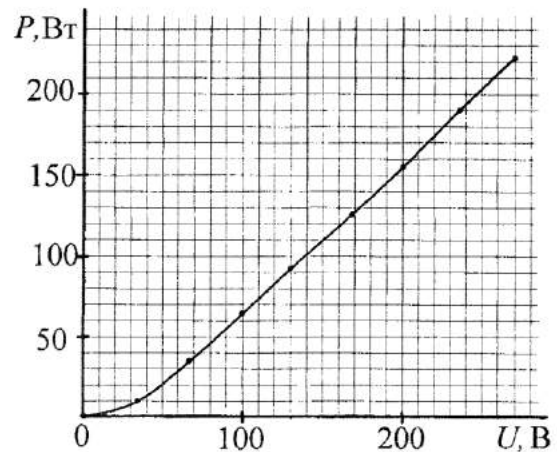
а загальний струм, як вже зазначалося, $I = 0,54$ А.

Отже, потужність, яка виділяється на всіх лампочках, дорівнює

$$P = I \cdot U \approx 36 \text{ Вт.}$$

Обчислені таким методом значення напруги і потужності подано в таблиці

Таблиця носить орієнтовний характер зручний для перевірки (дає координати дев'яти, а не п'яти точок, деякі дані наведені з надприродною точністю, що дає змогу зрозуміти природу тих чи інших округлень у роботах учнів). На підставі табличних даних будемо графік



Із графіку знаходимо значення потужності для випадку, коли загальна напруга 220 В:

$$P \approx 175 \text{ Вт.}$$

Це на 75 % більше ніж потужність однієї лампочки (з графіку $I(U)$ для однієї лампочки при напрузі 220 В, знаходимо, що струм трохи менший від 0,46 А, а, отже, потужність – 100 Вт). Чи означає це, що п'ять лампочок будуть світити яскравіше? Звісно ні. Відомо, що ККД ламп розжарення дуже невеликий і залежить від температури нитки розжарення (у галогенових лампочках температуру розжарення вдається дещо підви-

$U_1, U_2, \text{В}$	$I_1, I_2, \text{А}$	$U_3 = U_1 + U_2$	$I_3, \text{А}$	$I = I_1 + I_3$	$I_4 = I_5 = I/2$	U_4, U_5	$U = U_3 + U_5$	$P = IU, \text{Вт}$
0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0,12	20	0,22	0,34	0,17	14	34	12
20	0,22	40	0,32	0,54	0,27	27	67	36
30	0,28	60	0,36	0,64	0,32	40	100	64
40	0,32	80	0,39	0,71	0,355	50	130	92
50	0,35	100	0,405	0,755	0,378	67	167	126
60	0,365	120	0,415	0,78	0,39	80	200	156
70	0,38	140	0,425	0,805	0,403	96	236	190
80	0,39	160	0,435	0,825	0,413	110	270	223

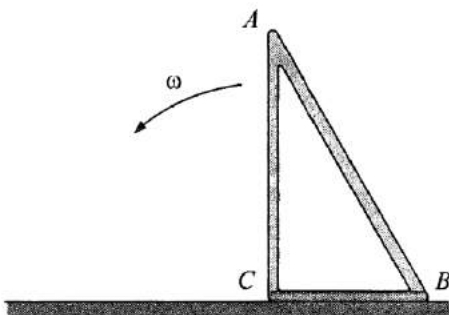
щити, що призводить до більшої частини енергії, яка випромінюється у видимій частині спектру електромагнетних хвиль). Якщо напруга значно менша від розраховані 220 В, лампочка майже всю потужність випромінює в інфрачервоному діапазоні, зовсім не освітлюючи кімнату. В крайньому випадку нитка ледь червоніє.

З таблиці можна побачити, що найбільша напруга буде на третій лампочці та її значення не перевищує 140 В. Навряд чи така лампочка буде яскраво світити.

Трикутник

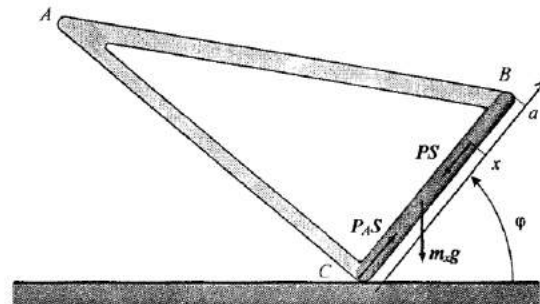
Без запитання про період коливань, задачу було запропоновано учням 10-х класів на Всеукраїнській олімпіаді з фізики, яка проходила 2006 року в м. Одесі).

Замкнену трубку, яка має вигляд прямокутного трикутника з гострими кутами 30° і 60° , утримують у вертикальній площині, як зображено на рисунку. Горизонтальна ділянка трубки заповнена водою, решта трубки займає повітря при атмосферному тиску. Трубку перевертають у вертикальній площині навколо точки C зі сторони a на сторону b так, що стовпчик рідини під час повороту залишається нерухомим відносно трубки. Визначіть залежність кутової швидкості ω , з якою повертають трубку, від кута повороту φ . Побудуйте залежність тиску всередині стовпчика води від відстані до точки C і визначіть за яких умов і в якому місці стовпчика вода може почати кипіти. Знехтуйте силами опору і тертя і за умови відсутності кипіння визначіть як далі і з яким періодом рухатиметься вода у трубці. Вважайте, що прямолінійні ділянки трубки плавно переходять одна в одну!



Розв'язок

На стовпчик води довжиною x діють сила тяжіння, сили опору з боку стінок і сили тиску (див. рис.).



Проекції цих сил на напрям BC викликають доцентрове пришвидшення центру мас $\omega^2 x/2$. За другим законом Ньютона

$$m_x \omega^2 x/2 = m_x g \sin \varphi + PS - P_A S, \quad (1)$$

де P – тиск всередині стовпчика на відстані x від точки C . Для всього стовпчика $x = a$, $P = P_A$, і з рівняння (1) знайдемо залежність кутової швидкості ω від кута φ

$$\omega = \sqrt{2g \sin \varphi / a}. \quad (2)$$

Залежність тиску від відстані x отримаємо з рівняння (1), підставивши масу стовпчика

$$m_x = m x/a$$

і кутову швидкість ω із рівняння (2).

$$P = P_A + \rho g \frac{x^2 - ax}{a} \sin \varphi, \quad (3)$$

де ρ – густина води.

Це рівняння параболі. Найнижчий тиск буде при $x = a/2$, тобто всередині стовпчика:

$$P_{\min} = P_A - \frac{1}{4} \rho g a \sin \varphi.$$

Найменше значення тиску спостерігається наприкінці руху, коли $\varphi = \pi/2$. Закипить при цьому вода чи ні залежить від того досягне цей тиск значення тиску насиченої пари при температурі води у трубці. Оскільки розміри трубки і температура води в ній не задані, дати однозначну відповідь на запитання не можна. Однак можна стверджувати, що вода обов'язково закипить за



умови

$$P_A - \frac{1}{4} \rho g a = 0,$$

тобто якщо сторона трубки $a \geq 4P_A/(\rho g) \approx 40$ м – навряд чи реальне обмеження. Зазначмо також, що у момент зупинки трубки з водою виникне значне кутове і відповідно тангенційне пришвидшення, що зумовить перепад тиску в перпендикулярному до ділянки BC напрямку, що зробить можливим відрив краплі у точці B (при повному заповненні ділянки BC водою).

Розгляньмо наступний етап руху, який починається відразу після того, як трубка зупиняється в положенні, за якого ділянка BC набуває вертикального напрямку. Вода під дією сили тяжіння починає пришвидшуватись і перетікатиме в ділянку CA .

Позначмо через x координату найвищої точки водяного стовпчика. Рівняння руху має вигляд:

$$ma_x = -m_x g = -mg \frac{x}{a}.$$

Фактично сила тяжіння, яка діє тільки на вертикальний стовпчик, примушує рухатись всю рідину. Ця сила має максимальне значення, коли швидкість руху дорівнює нулеві, і перетворюється в нуль, коли вода набуває максимальної швидкості. Оскільки отримане рівняння

$$a_x + \frac{g}{a} x = 0$$

є рівнянням гармонічних коливань з періодом

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{a}{g}},$$

час витікання води з ділянки BC дорівнює чверті цього періоду:

$$t_1 = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{a}{g}}. \quad (4)$$

Далі стовпчик води рухається горизонтально зі сталою швидкістю

$$v = \sqrt{ag},$$

яку можна отримати й з розгляду коливань, і за законом збереження енергії. Цей рух триватиме:

$$t_2 = \frac{b-a}{v} = \frac{a\sqrt{3}-a}{\sqrt{ag}} = (\sqrt{3}-1) \sqrt{\frac{a}{g}}. \quad (5)$$

Наступний етап руху містить перехід рідини з горизонтальної ділянки CA на похилу AB , яка утворює з горизонтальною кут 30° . Знову маємо рівняння гармонічних коливань, тільки тепер сила, яка викликає пришвидшення стовпчика води, є проекцією сили тяжіння $m_x g$ на AB .

$$ma_x = -m_x g \sin 30^\circ = -mg \frac{x}{2a}$$

або

$$a_x + \frac{g}{2a} x = 0.$$

Розв'язок останнього рівняння має вигляд:

$$x = A \sin \sqrt{\frac{g}{2a}} t + B \cos \sqrt{\frac{g}{2a}} t,$$

у якому значення сталих знаходимо з початкових умов:

$$x(0) = 0 \quad \text{і} \quad v_x(0) = \sqrt{ag}:$$

$$A = \sqrt{2a}, \quad B = 0.$$

Отже,

$$x = \sqrt{2a} \sin \sqrt{\frac{g}{2a}} t.$$

Через проміжок часу t_3 координата найвищої точки водяного стовпчика досягає значення a , тобто

$$a = \sqrt{2a} \sin \sqrt{\frac{g}{2a}} t_3.$$

Звідки знаходимо, що

$$a = \sqrt{2a} \sin \sqrt{\frac{g}{2a}} t_3. \quad (6)$$

Нарешті останній етап руху є рівноприскореним із початковою швидкістю

$$v_0 = \sqrt{ag/2},$$

яку також можна знайти двома способами, і пришвидшенням

$$g \sin 30^\circ = g/2,$$

аналогічно до руху тіла вздовж похилої площини. Час руху до зупинки буде:

$$t_4 = \frac{v_0}{g/2} = 2 \frac{\sqrt{ag/2}}{g} = \sqrt{\frac{2a}{g}}. \quad (7)$$

Далі все повторюється у зворотному порядку. Отже, період руху стовпчика дорівнює

$$t = 2(t_1 + t_2 + t_3 + t_4) = 2\sqrt{\frac{a}{g}} \left(\frac{\pi}{4} (2 + \sqrt{2}) + \sqrt{3} + \sqrt{2} - 1 \right).$$

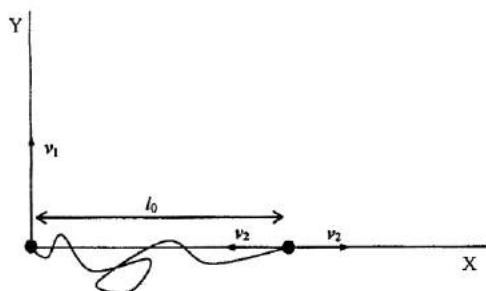
Два тіла на нитці

Два невеликі тіла масами $m_1 = 2 \text{ кг}$ і $m_2 = 3 \text{ кг}$ знаходяться у невагомості на відстані 1 м один від одного. Тіла з'єднані легкою абсолютно непружною і майже нерозтяжною ниткою завдовжки 2 м. Тілам одночасно надають швидкості $v_1 = 2 \text{ м/с}$ і $v_2 = 1 \text{ м/с}$ під кутом 90° одна до одної так, що друге тіло починає рухатися вздовж прямої, яка з'єднує тіла. Побудуйте залежність сили натягу нитки від часу.

Під час обговорення цієї задачі на ранковій нараді журі перед теоретичним туром олімпіади в Одесі автори звернули увагу на суперечливе визначення властивостей нитки. Автор погодився із зауваженнями. Для читачів пропонуємо умову задачі в початковому викладі, щоб було зрозумілим, які питання, зокрема, доводиться вирішувати на ранковій нараді журі. Після обговорення та уточнення умов багато задач стали зрозумілішими і коректнішими з фізичного погляду.

Розв'язок

По-перше, зазначмо, що рух вздовж прямої може мати два напрямки (див. рисунок).



Знайдімо час t , через який нитка між тілами натягнеться, і її довжина дорівнюватиме $l = 2 \text{ м}$. Перше тіло через час t матиме координати $(0, v_1 t)$, а друге $(l_0 \pm v_2 t; 0)$. З виразу для відстані між тілами $(l_0 \pm v_2 t; 0)$ одержимо квадратне рівняння відносно t :

$$(v_1^2 + v_2^2)t^2 \pm 2l_0 v_2 t - (l^2 - l_0^2) = 0.$$

Для випадку, коли друге тіло віддаляється від першого, додатний корінь квадратного рівняння

$$t_1 = \frac{l_0 v_2}{v_1^2 + v_2^2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2 + 1} + \left(\frac{l}{l_0} \right)^2 - 1 \right) - 1 = 0,6$$

Для випадку, коли друге тіло наближається до першого, додатний корінь квадратного рівняння

$$t_2 = \frac{l_0 v_2}{v_1^2 + v_2^2} \left(\sqrt{1 + \left(\frac{v_1}{v_2} \right)^2 + 1} - \left(\frac{l}{l_0} \right)^2 + 1 \right) = 1$$

Отже, в першому випадку сила натягу нитки дорівнюватиме нулеві перші 0,6 с руху, а в другому – 1 с, після чого відбудеться ривок, і частина кінетичної енергії тіл перейде у внутрішню. Що меншим буде час ривка, то більшою буде сила натягу T . Але для будь-якого часу ривка площа під графіком $T(t)$ буде мати однакове значення, яке дорівнює зміні проекції імпульсу на лінію нитки. Після непружного ривка тіла на нитці почнуть обертатися навколо спільного центру мас, і подальшою силою натягу нитки буде сила, яка забезпечує їх доцентрове пришвидшення.

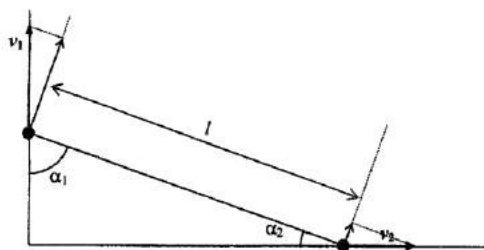
$$\begin{cases} T = m_1 \omega^2 r_1 \\ T = m_2 \omega^2 r_2 \end{cases} \Rightarrow T \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) = \omega^2 (r_1 + r_2) \Rightarrow$$

$$T = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \omega^2 l.$$

Визначмо кутову швидкість ω обертання тіл після ривка. Найпростіше це зробити із закону збереження моменту імпульса. В системі відліку,

яка рухається з другим тілом, початковий момент імпульсу $m_1 l_0^2 \omega_0$, де $\omega_0 = v_1 / l_0$, дорівнює кінцевому $m_1 l^2 \omega$. Звідки знаходимо $\omega = v_1 l_0 / l^2$ для обох випадків і

$$T = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{v_1^2 l_0^2}{l^3} = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2} \cdot \frac{v_1^2}{4l} = 0,6 \text{ Н.}$$



Знайти кутову швидкість можна і без використання закону збереження моменту імпульса. Розгляньмо, наприклад, перпендикулярні до нитки складові швидкостей тіл $v_1 \sin \alpha_1$ і $v_2 \sin \alpha_2$ перед ривком, які не зміняться і відразу після ривка.

$$\omega = \frac{v_1 \sin \alpha_1 - v_2 \sin \alpha_2}{l}.$$

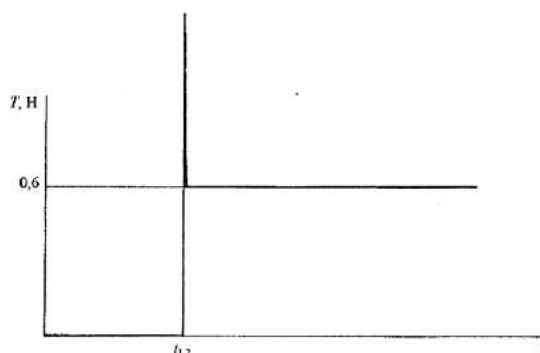
Значення синусів знайдемо зі співвідношень у прямокутному трикутнику

$$\sin \alpha_1 = \frac{l_0 + v_2 t}{l}, \quad \sin \alpha_2 = \frac{v_1 t}{l}.$$

Підставмо у вираз для кутової швидкості

$$\omega = \frac{v_1 (l_0 + v_2 t) - v_2 v_1 t}{l^2} = \frac{v_1 l_0}{l^2}.$$

Отже, графік залежності сили натягу нитки від часу для обох випадків має вигляд:



Синтез золотого фулерена

У США синтезовано “металеві фулерени” – наночастинки золота, подібні до форми вуглецевих “футбольних м’ячів”. Це відкриття зробив Лай Шен-Ванг, колишній працівник першовідкривача фулеренів Ричарда Смерлі. Молекули золотого фулерена мають 16 або 18 атомів золота і виглядають як багатогранники із порожниною всередині.

Фулерени вуглецю, тобто замкнені порожнини із стикованих вуглецевих кілець, відомі майже 20 років. Розміри таких порожнин достатні, щоб всередині вмістився додатковий атом. Оскільки властивості атома у “клітці” змінюються залежно від її розмірів і форми, то це розглядають як метод збирання нанометрових структур (наприклад, транзисторів) із потрібними характеристиками.

Виготовити фулерени з металів досі не вдавалось. Більшість компактних металевих наночастинок чи кластерів, відрізняються від фулеренів “щільною упаковкою” атомів, де “зайвого місця” майже не залишається. Квантові розрахунки показали, що кластери золота, які мають понад 30 атомів, мають “щільну упаковку”.

Золоті фулерени мають значно меншу кількість атомів, ніж фулерени вуглецю (наприклад, фулерени C_{60} і C_{70} – багатогранники з 60 і 70 вершинами, відповідно), однак вони мають вмістиму порожнину – через значно більший, порівняно з вуглецевим, діаметр атомів золота. Перевірити це твердження експериментально, тобто ввести в фулерен золота домішку, дослідники поки-що не встигли.

Розв'язки задач III (обласного) етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики 2006 р. (м. Львів)

*Умови задач та розв'язки за 8–9 класи Обласної олімпіади з фізики 2006 року
дивіться в журналі "Світ фізики", 2006. № 1. С. 27–34; 38–49.*

10-й клас

Задача 1.

На початку руху автомобіля колеса проковзуватимуть. На них діятимуть сили тертя ковзання, які й зумовлюватимуть силу тяги автомобіля. Отже, варто виділити дві ділянки, залежності швидкості автомобіля від часу (рух з проковзуванням, рух без проковзування коліс).

Спочатку колеса проковзуватимуть і сила тяги дорівнює силі тертя:

$$F = kmg.$$

Пришвидшення і швидкість автомобіля у цій фазі руху:

$$a = kg,$$

$$v_1(t) = at = gkt.$$

Проковзування припиниться, коли автомобіль досягне критичної швидкості:

$$v_{кр} = \frac{P}{F} = \frac{P}{kmg}.$$

Час, за який автомобіль досягне критичної швидкості, буде:

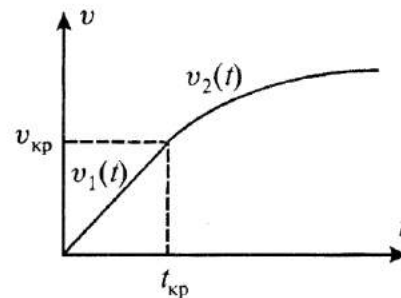
$$t_{кр} = \frac{v_{кр}}{a} = \frac{P}{k^2mg^2}.$$

Подальшу швидкість визначмо із закону збереження енергії, оскільки у цей момент уся потужність двигуна йде на розгін автомобіля:

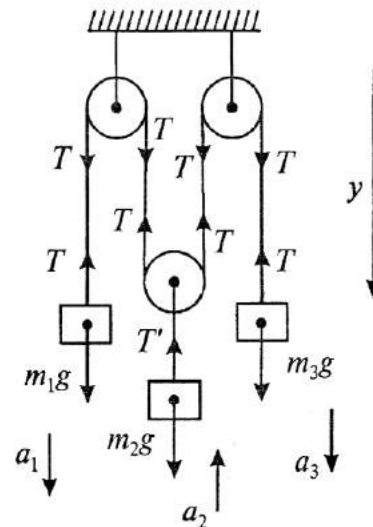
$$\frac{mv_2^2(t)}{2} = \frac{mv_{кр}^2}{2} + P(t - t_{кр}),$$

де t – час, який відраховуватимемо від початку руху. Така залежність актуальна для $t \geq t_{кр}$:

$$v_2(t) = \sqrt{\frac{2P}{m} \left(t - \frac{P}{2mg^2k^2} \right)}, \text{ для } t \geq t_{кр} = \frac{P}{mg^2k^2}.$$



Задача 2.



Запишімо другий закон Ньютона для кожного з вантажів:

$$\begin{aligned} m_1 \vec{g} + \vec{T} &= m_1 \vec{a}_1, \\ m_2 \vec{g} + \vec{T}' &= m_2 \vec{a}_2, \\ m_3 \vec{g} + \vec{T} &= m_3 \vec{a}_3. \end{aligned} \quad (1)$$

Оскільки блоки невагомі, а нитки нерозтяжні, то можемо записати такі рівняння

$$\vec{T}' + \vec{T} + \vec{T} = \vec{0}, \quad \vec{a}_1 + 2\vec{a}_2 + \vec{a}_3 = \vec{0}. \quad (2)$$

Спроектувавши рівняння (1) на вісь Oy , та врахувавши (2), отримаємо систему

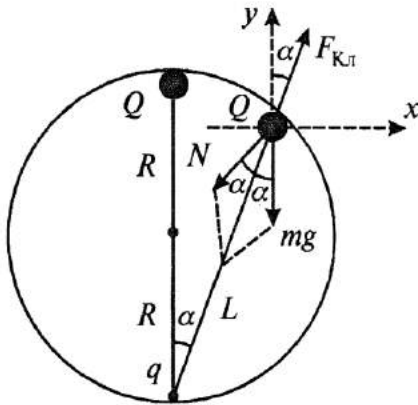
$$\begin{cases} m_1 g - T = m_1 a_1 \\ m_2 g - 2T = -\frac{1}{2} m_2 (a_1 + a_3) \\ m_3 g - T = m_3 a_3 \end{cases},$$

розв'язок якої буде

$$\begin{aligned} a_1 &= \frac{m_1 m_2 - 3m_2 m_3 + 4m_1 m_3}{m_1 m_2 + m_2 m_3 + 4m_1 m_3} g, \\ a_2 &= \frac{-m_1 m_2 - m_2 m_3 + 4m_1 m_3}{m_1 m_2 + m_2 m_3 + 4m_1 m_3} g, \\ a_3 &= \frac{-3m_1 m_2 + m_2 m_3 + 4m_1 m_3}{m_1 m_2 + m_2 m_3 + 4m_1 m_3} g. \end{aligned}$$

Задача 3.

Заряджене тіло перебуватиме у стійкій рівновазі, якщо його вивести з положення рівноваги, а в системі з'являються сили, які повернуть тіло в положення рівноваги. Крім того, в положенні рівноваги рівнодійна всіх сил дорівнює нулеві. Розгляньмо мале відхилення від положення рівноваги:



$$m\vec{g} + \vec{F} + \vec{N} = \vec{0}.$$

$m\vec{g}$ – сила тяжіння, \vec{F} – сила Кулонівської взаємодії, \vec{N} – реакція опори.

Спроектуємо умову рівноваги на осі x та y :

$$-N \sin 2\alpha + F \sin \alpha = 0,$$

$$-mg - N \cos 2\alpha + F \cos \alpha = 0.$$

За малих кутів відхилення α :

$$\sin \alpha \approx \alpha, \sin 2\alpha \approx 2\alpha, \cos 2\alpha \approx \cos \alpha \approx 1, L \approx 2R.$$

Отже, у проєкціях на x та y отримаймо:

$$\begin{aligned} N &= F/2, \\ mg + N &= F. \end{aligned}$$

Звідси, $F = 2mg.$

Сила взаємодії зарядів:

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{qQ}{4R^2}.$$

Отже, $q_{\min} = \frac{32\pi\epsilon_0 mgR^2}{Q}.$

Задача 4.

Під час замерзання переохолодженої води виділиться теплота

$$Q_1 = m_b \lambda = 3,3 \cdot 10^5 \text{ Дж}.$$

Для нагрівання переохолодженої води від -20°C до 0°C треба

$$Q_2 = c_b m_b (0^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C})) = 8,4 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

Для нагрівання вкинутої стружки льоду від -20°C до 0°C треба

$$Q_3 = c_n m_n (0^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C})) = 4,2 \cdot 10^4 \text{ Дж}.$$

Отже, бачимо, для того щоб стружка льоду, та вода мали температуру 0°C достатньо кристалізувати не всю воду, а лише її частину. А оскільки єдиний механізм, при якому можна отримати теплоту, є кристалізація води, то в кінцевому результаті температура системи буде 0°C .

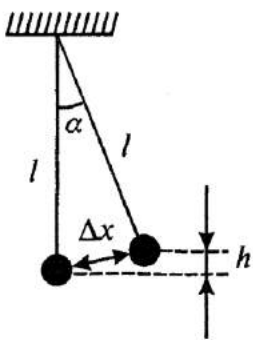
Знайдемо масу води m'_b та льоду m'_n у кінцевій суміші. Теплота, яка виділилась при частковій кристалізації води, пішла на нагрівання всієї води та стружки льоду.

$$(m_b - m'_b)\lambda = c_b m_b (0^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C})) + c_n m_n (0^\circ\text{C} - (-20^\circ\text{C})).$$

$$m'_b = m_b - \frac{(c_b m_b + c_n m_n) \cdot 20^\circ\text{C}}{\lambda} = 0,618 \text{ кг}.$$

$$m'_n = m_n + m_b - m'_b = 1,382 \text{ кг}.$$

Задача 5.



Середньоквадратичне відхилення кульки Δx знайдімо з теореми косинусів для трикутника зі сторонами $l, l, \Delta x$.

$$(\Delta x)^2 = l^2 + l^2 - 2l^2 \cos \alpha,$$

звідси, $\Delta x = l\sqrt{2(1 - \cos \alpha)}$.

Коливання спричинені тепловим рухом. На один ступінь вільності (коливання маятника має один ступінь вільності) за теоремою Больцмана припадає енергія $kT/2$. Отже, кінетична енергія в нижньому положенні $mv^2/2$ дорівнює $kT/2$. Вона перейде в потенціальну енергію кульки у верхньому положенні.

$$kT/2 = mgh = mgl(1 - \cos \alpha).$$

Звідси, $2(1 - \cos \alpha) = \frac{kT}{mgl}$.

Отже, $\Delta x = \sqrt{\frac{lkT}{mg}} = 6,4 \cdot 10^{-8}$ м.

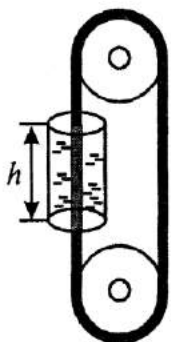
II-й клас

Задача 1.

Центр мас стовпа підніметься на висоту, яка дорівнює половині його довжини. Отже,

$$A = mg \cdot 0,5L = 1960 \text{ Дж.}$$

Задача 2.



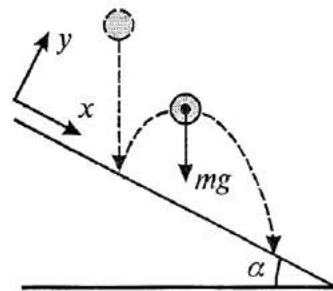
Сила Архімеда – це різниця між силами тиску в рідині (газі) на нижню та верхню поверхні тіла.

З рисунка видно, що у напрямках догори і донизу на шнур у рідині сили не діють. Отже, цей двигун не працюватиме. Його ККД дорівнює нулеві.

Задача 3.

Розглянемо рух кульки у системі координат, як зображено на рисунку. Проекція пришвидшення на вісь y : $a_y = -g \cos \alpha$. Нехай проекція швидкості на вісь y одразу після першого удару буде v . Тоді рівняння руху для осі x набуде вигляду:

$$y(t) = vt + \frac{a_y t^2}{2}.$$



У момент, коли кулька вдаряється об поверхню, $y(t) = 0$. Таке рівняння має два розв'язки:

$$t_1 = 0 \text{ та } t_2 = -\frac{2v}{a_y} = \frac{2v}{g \cos \alpha}.$$

Перший розв'язок – час відриву кульки від поверхні, другий – час падіння. Отже, час польоту:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2v}{g \cos \alpha}.$$

Проекція швидкості на вісь y під час падіння:

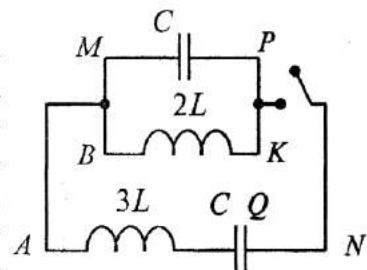
$$v(t_2) = v + a_y t_2 = -v.$$

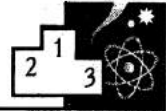
Оскільки удар пружний, то проекція швидкості на вісь y при наступному ударі буде такою ж. Отже, час між другим і третім ударом об поверхню теж дорівнює Δt .

Отже, проекція швидкості на вісь y при кожному ударі буде однаковою, час між ними дорівнюватиме Δt , а відношення часів між ударами об поверхню дорівнює одиниці.

Задача 4.

Нехай у деякий момент часу t заряд на першому конденсаторі q , а на другому Q . Тоді струм, який тече через першу котушку, дорівнює





$\frac{dQ}{dt} - \frac{dq}{dt} = \frac{d(Q-q)}{dt}$, а через другу $\frac{dQ}{dt}$. Запишімо правило Кірхгофа для спадів напруг для контура *ABKN*:

$$2L \frac{d^2(Q-q)}{dt^2} + 3L \frac{d^2Q}{dt^2} + \frac{Q}{C} = 0.$$

Для контура *MPKB*:

$$-2L \frac{d^2(Q-q)}{dt^2} + \frac{q}{C} = 0.$$

Домножмо перше рівняння на 2 та віднімемо від нього друге:

$$6L \frac{d^2(2Q-q)}{dt^2} + \frac{2Q-q}{C} = 0.$$

Одержимо рівняння гармонічних коливань з частотою $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{6LC}}$, для величини $(2Q-q)$.

Отже,

$$2Q - q = A_1 \cos \omega_1 t + B_1 \sin \omega_1 t.$$

У початковий момент (момент вмикання ключа) струми через котушки не протікали. Отже, $B_1 = 0$.

Аналогічно, домноживши друге рівняння на 2 і додавши перше отримаємо:

$$L \frac{d^2(2q+Q)}{dt^2} + \frac{2q+Q}{C} = 0,$$

і розв'язок з частотою $\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$.

$$2q + Q = A_2 \cos \omega_2 t.$$

Розв'язуючи таку систему рівнянь і приймаючи до уваги, що $Q(0) = Q_0$ та $q(0) = 0$, отримаємо:

$$q(t) = \frac{2Q_0}{5} (\cos \omega_2 t - \cos \omega_1 t),$$

$$Q(t) = \frac{Q_0}{5} (\cos \omega_2 t + 4 \cos \omega_1 t).$$

Бачимо, що максимальна величина заряду на першому конденсаторі може дорівнювати $4Q_0/5$.

Задача 5.

Енергія конденсатора

$$E = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q^2 d}{\epsilon \epsilon_0 S}.$$

Зі зростанням концентрації газу діелектрична проникність зростатиме. Отже, E зменшуватиметься.

З іншого боку, зі зростанням концентрації зростатиме і тиск газу

$$P = nkT.$$

Зміна потенціальної енергії зі зростанням тиску дорівнює роботі, яку треба виконати, щоб наповнити конденсатор газом (тиск змінюється від P_0 до P):

$$PV \left[\ln \frac{P}{P_0} - 1 \right] + P_0 V = VnkT \left[\ln \frac{n}{n_0} - 1 \right] + Vn_0 kT,$$

$n_0 = \frac{P_0}{kT}$ — концентрація азоту поза конденсатором.

Для знаходження встановленого тиску, знайдемо за якої концентрації система матиме мінімальну енергію:

$$E(n) = \frac{Q^2 d}{2\epsilon_0 S(1 + \alpha n)} + VnkT \left[\ln \frac{n}{n_0} - 1 \right] + Vn_0 kT.$$

Візьмімо похідну по n , та врахуймо, що $V = Sd$.

$$\frac{Q^2 d \alpha}{2\epsilon_0 S(1 + \alpha n)^2} = dSkT \ln \frac{n}{n_0}.$$

Оскільки, $1 + \alpha n \approx 1$, то

$$n \approx n_0 \exp \left[\frac{Q^2 \alpha}{2S^2 \epsilon_0 kT} \right].$$

$$P \approx P_0 \exp \left[\frac{Q^2 \alpha}{2S^2 \epsilon_0 kT} \right].$$

Віталій Лесівців

асистент кафедри загальної фізики
Львівського національного університету
імені Івана Франка



Пропонуємо читачам низку лабораторних завдань для 9–11-х класів, які підготував Златев Георгій Іванович.

Златев Георгій Іванович – учитель фізики Болградської гімназії (Одеська область). Він має великий досвід викладання фізики, багато років працює в Болградській гімназії. Цей навчальний заклад створений понад 100 років тому за ініціативи болгарської громади в Україні. Ще досі в цьому навчальному закладі зберігаються прилади, які було закуплено меценатами в Парижі, Відні, Берліні.

Г. Златев разом зі школярами любить експериментувати. Команда школярів під його керівництвом на Всеукраїнському турнірі юних фізиків не раз демонструвала цікаве експериментальне розв'язання турнірних задач.

Лабораторні роботи для 8–9-го класів дивіться
в журналі "Світ фізики", 2006. № 1.

10-й клас

Лабораторна робота № 1 Дослідження капілярних явищ

Завдання:

Дослідіть залежність коефіцієнта поверхневого натягу від природи рідини, її температури, поспостерігайте капілярні явища, визначіть коефіцієнт поверхневого натягу.

Обладнання:

Скляні трубки завдовжки 20–30 см, діаметр отвору 1–3 мм, вата, мильний розчин, спиртівка, мірний циліндр 5 см³, міліметрова лінійка, дерев'яна підставка.

Теоретичні відомості

Залежно від сил взаємодії молекул рідини і твердого тіла, а також молекул рідини між собою спостерігається явище змочування, або не змочування. При змочуванні поверхні капіляра рідиною, рідина в ньому, завдяки сил поверхневого натягу, піднімається вище рівня рідини в посудині. Висоту підйому визначають із формули:

$$h = \frac{2\sigma}{\rho g R},$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу. Його можна визначити, застосувавши метод відриву краплі.

$$\sigma = \frac{mg}{\pi dn},$$

де n – кількість крапель; d – діаметр шийки краплі, він дорівнює діаметру отвору піпетки; m – маса всіх крапель. Її визначаємо за формулою

$$m = \rho V.$$

Виконання роботи

1. Наберіть в капілярну трубку стовбчик води і розмістіть її горизонтально на підставці.
2. Нагріваючи один з кінців трубки спиртівкою, спостерігайте зміни і поясніть їх.
3. Накрутіть вільно на дерев'яну паличку вату, змочіть її у мильному розчині. У горизонтально розташовану трубку наберіть воду так, щоб вона доходила до одного з країв трубки. Доторкаючи ватою цього краю, спостерігайте явище і поясніть вплив Ваших дій.
4. Наберіть у шприц рідину об'ємом 2 см³ і полічіть кількість крапель, які утворились. Повторіть дослід з водою. Знайдіть відношення мас крапель. Розрахуйте це відношення теоретично.



5. Маючи капілярну трубку невідомого діаметра, визначіть її діаметр. Для цього опустіть трубку в посудину з водою і виміряйте висоту підйому води у капілярі.

Запитання

1. Як і чому зміниться рівень води в капілярній трубці, якщо зміниться температура води? По змозі проведіть експеримент.
2. Чи буде витікати вода із вертикально розташованої капілярної трубки, якщо її занурити глибше, ніж висота підйому води в капілярі?

Лабораторна робота № 2

Вимірювання атмосферного тиску

Завдання:

Наявними засобами виміряйте атмосферний тиск.

Обладнання:

Пластикова пляшка без дна, поліетиленовий шланг $l = 2$ м, $d = 10$ мм, рулетка, посудина з водою.

Теоретичні відомості

Для вимірювання атмосферного тиску можна використовувати ізотермічний процес. Для цього під'єднайте шланг до пластикової пляшки без дна (лійка). Рідинний манометр, який Ви виготовили, можна застосувати для виконання роботи. Залийте воду при відкритому кінці шланга і позначте рівень води в шланзі. Тиск над водою дорівнює атмосферному.

Об'єм повітря над водою:

$$V = Sh = \frac{\pi d^2 h}{4}$$

Закрийте пробкою трубку та опустіть лійку. Тиск у трубці знизиться на величину:

$$\Delta P = \rho g h,$$

де h – різниця рівнів води в трубці та пляшці.

Об'єм повітря в шлангу:

$$V = V + \Delta V.$$

Вважаючи процес ізотермічним, застосуйте закон Бойля-Маріотта:

$$P_0 V_0 = (P_0 - \Delta P)(V_0 + \Delta V).$$

Визначте з цього рівняння атмосферний тиск:

$$P_0 = \frac{\Delta P(V \pm \Delta V)}{\Delta V}.$$

Оскільки

$$\Delta P = \rho g h,$$

$$V = S \cdot l_0,$$

$$\Delta V = S \cdot \Delta l,$$

l_0 – первинна довжина стовпа повітря;

Δl – зміна стовпа повітря.

Отже,

$$P_0 = \frac{\rho g h(l_0 \pm \Delta l)}{\Delta l}.$$

Виконання роботи

1. Закріпіть на штативі сполучених посудин так, щоб відкритої кінець трубки був вищим від лійки на 30–40 см. Залийте водою і позначте рівень води в трубці.
2. Закрийте корком трубку. Зміряйте висоту стовпчика повітря в трубці l ?
3. Поволі опускайте лійку (приблизно на 80–100 см) від початкового положення. Виміряйте висоту стовпчика повітря в трубці $l + \Delta l$ і різницю рівнів води в трубці та лійці.
4. Обчисліть атмосферний тиск.
5. Повторіть дослід і знайдіть середнє значення температури, порівняйте з показами барометра.
6. Результати вимірювань занесіть у таблицю.

№	?, м	? + ??, м	h, м	Pa, Па	P б
1					
2					
3					

7. Оцініть похибку експерименту.

$$\Delta P_a = P_{acc} \left(\frac{\Delta h}{h} \pm \frac{\Delta l_0}{l_0} \pm \frac{\Delta(\Delta l)}{\Delta l} \right).$$

**Запитання**

1. Чи залежить точність експерименту від виду рідини?
2. Чому в цьому досліді можна застосувати закон Бойля-Маріотта?
3. Які параметри атмосфери впливають на результат?

Лабораторна робота № 3

Дослідження залежності електричного опору терморезистора від температури**Завдання:**

Дослідіть залежність електричного опору терморезистора від температури.

Обладнання:

Терморезистор, калориметр з кришкою, електрична лампочка на 4 В, лабораторне джерело живлення, реостат, омметр.

Теоретичні відомості

За низьких температур валентні оболонки атомів у кристалі напівпровідника заповнені, концентрація вільних зарядів мала, тому за цих умов напівпровідник веде себе як діелектрик. Із підвищенням температури збільшується швидкість коливального руху атомів, що приводить до руйнування ковалентних зв'язків між атомами і поява вільних електронів і дірок. Із підвищенням температури концентрація електронів і дірок зростає, а відтак зменшується опір.

За високих температур напівпровідник за своїми властивостями стає подібним до металів.

Виконання роботи

1. Під'єднайте омметр до терморезистора і виміряйте його опір.
2. Встановіть термометр, запишіть його покази.
3. Під'єднайте лампу до джерела струму і по мірі збільшення температури (з інтервалом 5° С) виміряйте опір терморезистора. Досягнувши температури 80° С, відімкніть лампу.

4. Виміряйте опір терморезистора при охолодженні (також з інтервалом 5° С).

5. Результати вимірювань запишіть у таблицю:

а) Нагрівання

	20	25	30	35							20
t °C											
R Ом											

б) Охолодження

	75	70	65								20
t °C											
R Ом											

6. За одержаними результатами побудуйте графік. Проаналізуйте одержані результати.

Запитання

1. В якому інтервалі температур опір терморезистора швидко зменшується, повільно змінюється? Чому?
2. Де і з якою метою на практиці застосовують терморезистори?

Лабораторна робота № 4

Вимірювання ємності та енергії зарядженого конденсатора**Завдання:**

Визначте ємність та енергію зарядженого конденсатора.

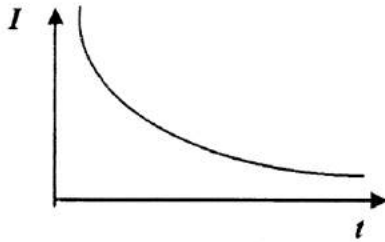
Обладнання:

Конденсатор електричний на 1000–2000 мкФ, мікроамперметр на 100–200 мкА, резистор 100 кОм, перемикач, однополюсне, лабораторне джерело живлення.

Теоретичні відомості

Електроємність конденсатора можна визначити, вимірявши заряд на його обкладках і різницю потенціалів між обкладками:

$$c = \frac{q}{U}.$$



Для визначення заряду конденсатора розряджаємо його через резистор, вимірюючи при цьому силу струму і час. Побудуємо графік розряду $I = f(t)$.

Площа криволінійного трикутника дорівнює величині заряду конденсатора. Площу можна розрахувати методом палетки, методом зважування.

Для визначення енергії зарядженого конденсатора використаємо закон Джоуля-Ленца та побудований графік. Оскільки сила струму безперервно змінюється, то знайдімо роботу струму на окремих інтервалах часу Δt , усереднюючи в цьому інтервалі силу струму, за формулою:

$$\Delta A_i = I^2 R \Delta t.$$

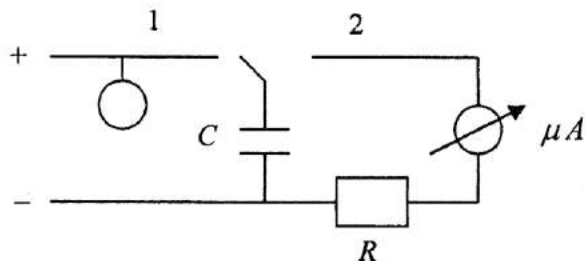
Отже, загальна робота буде:

$$A = \sum \Delta A_i.$$

Для підрахунку загальної роботи побудуйте графік $I^2 = f(t)$ та знайдіть площу під графіком в розмірностях $A^2 \cdot c$. Домноживши одержаний результат на опір резистора, знайдімо енергію зарядженого конденсатора.

Виконання роботи

1. Зберіть електричне коло за схемою:



2. Зарядіть конденсатор, поставивши перемикач в положення 1. Запишіть значення напруги U .

3. Перемикач переведіть у положення 2 і запишіть покази мікроамперметра через деякі проміжки часу.

(Оскільки спочатку розряду струм змінюється швидко, то за інтервал часу треба брати невеликі 10–15 с, в кінці розряду інтервали часу можна збільшити до 60–100 с).

4. Результати вимірювань запишіть у таблицю.

І, мкА										
t, с	0	10	20	30	60	90	120	180	240	200
A										

5. Для кожного інтервалу знайдіть середнє значення сили струму та обчисліть роботу:

$$A_i = I^2_{\text{ср}} R \Delta t_i.$$

Підсумувавши одержані значення роботи, знайдіть енергію конденсатора:

$$W = \sum A_i.$$

6. Побудуйте графік залежності сили струму від часу при розряді. Знаючи, масштаб і розрахувавши площу фігури між осями координат і графіком, знайдіть заряд на обкладках конденсатора:

$$q = H_q S.$$

7. Знайдіть ємність конденсатора та його енергію. Порівняйте одержані значення енергії.

Запитання

1. Що зміниться і як, якщо замінити конденсатор чи резистор іншими?

2. Як збільшити точність експерименту?

Лабораторна робота № 5

Визначення температури нитки лампи розжарення

Завдання:

Виміряйте температуру нитки розжарення лампи, використовуючи залежність опору від температури.

**Обладнання:**

Лампа розжарювання на 3,5 В, вольтметр амперметр, омметр, лабораторне джерело живлення, реостат.

Теоретичні відомості

Залежність опору металів від температури виражають формулою:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t),$$

де R_t – опір нитки при температурі t ; R_0 – опір нитки при температурі 0°C ; α – температурний коефіцієнт опору вольфраму.

Опір нитки за різних температур визначте за законом Ома

$$R_t = \frac{U}{I}.$$

Вимірюючи R_0 , треба використовувати мікроамперметр і мілівольтметр, або виміряти опір холодної нитки омметром.

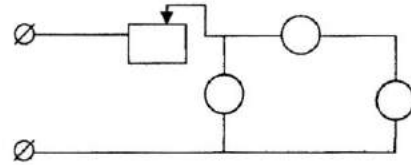
Тоді

$$t = \frac{1}{2} \left[\frac{R_t}{R_0} - 1 \right].$$

Виконання роботи

1. Виміряйте тестером опір “холодної нитки” лампи R_0 .

2. Збиріть електричне коло за схемою.



3. Виміряйте силу струму і напругу при 6–7 положеннях повзунка реостата.

4. Результати вимірювань занесіть у таблицю.

U, В						
I, А						

5. Побудуйте вольтамперну характеристику нитки розжарення лампи.

6. Розрахуйте температуру в кожному випадку.

7. Побудуйте графік залежності опору від температури.

Запитання

1. Чому опір металів залежить від температури?

2. Чому опір “холодної нитки” треба вимірювати при малих струмах?

СОНЦЕ І ЗОЛОТО

Якось Густав Кірхгоф розповідав про спектральний аналіз, який він розробив.

– Спектр Сонця свідчить, що там є золото, – зауважив він.

– Яка користь від такого відкриття! Адже золото із Сонця не дістанеш, – заперечив один із слухачів.

Невдовзі Г. Кірхгофа за його відкриття нагородили золотою медаллю.

– Ось я й одержав золото Сонця! – усміхнувся учений.

ДВІ БАРАНЯЧІ НОГИ

Генрі Кавендиш, ведучи аскетичний спосіб життя, був цілком поглинутий науковими дослідженнями. Стверджують, що за все своє життя він вимовив менше слів, ніж звичайна людина за рік, і надрукував менше сторінок, ніж інші з його колег книжок. Працював він у власній лабораторії.

Якось Г. Кавендиш запросив п'ятьох друзів. Коли слуга запитав, що приготувати, він одержав незмінну відповідь:

– Баранячу ногу.

– Але, сер, для п'ятьох людей цього буде замало, – сказав слуга.

Подумавши хвилинку, Кавендиш прийняв рішення:

– Тоді дві баранячі ноги.



ДЕСЯТЬ ТЕХНОЛОГІЙ, ЯКІ НАЙБІЛЬШЕ ЗМІНЮЮТЬ СВІТ

Технологічний бюлетень Массачусетського технологічного інституту опублікував перелік десяти найперспективніших технологій, які можуть найбільше вплинути на розвиток людства.

1. Технологія “порівняльної взаємодії”

Мета – визначити, як різні складові клітини організму взаємодіють одна з одною, виявити “канали” подібної взаємодії і використати ці знання в медицині, сільському господарстві, біохімії тощо.

2. Наномедицина – теоретично дає змогу подавати ліки безпосередньо до хворої клітини.

3. Епігенетика – дає змогу, наприклад, визначити наявність онкологічного захворювання на основі генетичного тесту.

4. “Когнітивне радіо” – безпрецедентний розвиток бездротового зв’язку викликає нову проблему – перешкоди. Щоб дати змогу всім стільниковим телефонам, комп’ютерам, які під’єднані до бездротового Інтернету, радіостанціям тощо працювати успішно і не заважати один одному, слід використати весь радіодіапазон, а, крім того, “навчити” електронні пристрої аналізувати ситуацію і вибрати найвідповідніший спосіб і протокол зв’язку.

5. “Ядерне перепрограмування” – дає змогу клонувати будь-які клітини, використовуючи будь-які зразки біологічного матеріалу.

6. “Дифузійне зображення” – дає змогу використати технології сканування головного мозку для діагностики і, можливо, лікування важких захворювань, таких, як шизофренія, хвороба Альцгеймера тощо.

7. “Безпечний Інтернет” – дає змогу оберігати користувачів Інтернету від розголошення приватної інформації.

8. “Нанобіомеханіка” – розглядає людське тіло як машину і аналізує процеси механічної взаємодії окремих клітин.

9. “Бездротовий Всесвіт” – потенційно дає змогу різним електронним пристроям “спілкуватися” один з одним: наприклад, електронний “мозок” одного автомобіля зможе зв’язуватися з “мозком” іншого та запобігти можливу аварію.

10. “Невичерпний кремній” – сучасна електроніка ґрунтується на використанні кремнію – нова технологія ставить перед собою завдання створити нові види і форми цієї речовини, що дасть змогу здійснити революцію в інформаційних технологіях.

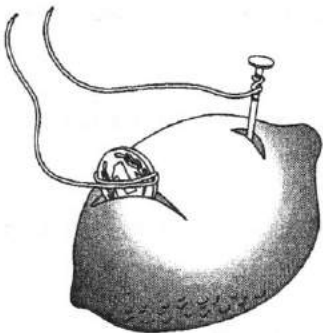


Як Роберт Вуд створив міраж і торнадо

Щоб влаштувати собі мініатюрний оазис, Роберт Вуд добув чотири пласкі залізні листи, завдовжки майже 1,5 м і завширшки 0,2 м. Він поклав їх кінцем до кінця, закріпивши на залізних підставках, – вийшов довгий плаский горизонтальний майданчик, який він посипав піском. На віддаленому кінці його було закріплено дзеркало, яке відображало зображення неба у вікні. Низка мініатюрних гір і декілька пальм, які було вирізано з паперу і розміщено на піску перед дзеркалом, зображали горизонт пустинного ландшафту, який знизу підігрівався декількома маленькими газовими пальниками під залізними листами – замість сонця, яке світило зверху. Чи працюватиме установка в такому масштабі? Він запалив пальники і почав спостерігати. Гори і пальми давали виразний силует на яскравому тлі неба, але раптом перед ними з'явилася виблискуюча поверхня води – біля самого підніжжя гір. Якщо підняти очі на декілька сантиметрів над рівнем піску, “озеро” зникало, але знову з'являлося, як тільки очі наближалися до поверхні “пустелі” – точно як справжній міраж, якщо ви піднімаєтесь на пагорб. Далі “озеро” збільшилося, і в ньому з'явилася віддзеркалення гір, а якщо опустити око ще нижче, підніжжя гір зникало в уявному озері, яке перетворювалось у цілу повінь.



За допомогою тієї ж установки Р. Вуд змоделивав торнадо. Торнадо – це піщані смерчі. Атмосферні умови (шар гарячого повітря, біля землі, над нею – холодніший), які спостерігаються при міражі, приводять до виникнення “піщаних вихорів”, що часто можна бачити на рівнинах Америки, і – у великому масштабі – до торнадо. Один із металевих листів (обчищений від піску) був посипаний дрібним порошком кремнезему і підігрітий декількома пальниками. За декілька хвилин красиві маленькі вихори забігали по поверхні, згортаючи легкий порошок у лунки, які деколи існували десять – п'ятнадцять секунд. Посипавши великий лист заліза нашатирем і ще дужче нагріваючи його пальником, Вуд отримав білий дим, і раптом у центрі листа злетів на висоту майже 2 м чудовий мініатюрний смерч – торнадо – з білого диму.



За книжкою В. Сибрук. Роберт Вуд

Лимон-батерея

Візьміть мідну монету, лимон, оцинкований цвях і мідний дріт. Стисніть лимон, щоб він став м'яким. Далі зробіть два маленькі розрізи і вставте в них цвях і монету, приєднавши до них невеликі шматочки дроту. Якщо лизнете кінці дроту, то відчуєте подразнення струмом.

Наукове обґрунтування.

У цій саморобній гальванічній батареї цвях, який покритий цинком, діє як від'ємний електрод, а покрита міддю монета – як додатний. Електролітом є лимонний сік, його позитивно заряджені йони водню взаємодіють із цинком.

Серія "Бібліотека "Світ фізики"

Життя, віддане науці. Збірник на пошану Богдана Николина / Упорядник Ігор Николин. – Львів: Євросвіт, 2006. – 110 с.: іл.

У книжці, підготовленій на пошану доктора фізико-математичних наук Богдана Николина, відображено основні етапи його життя, наукової, педагогічної, громадської діяльності. Показчик друкованих праць знайомить читача з доробком науковця.

Для науковців, викладачів, аспірантів, студентів та усіх, хто цікавиться історією науки.



Ващенко В., Літинський В., Перій С. Геодезичні прилади і приладдя. Навчальний посібник. 2-ге вид. – Львів: Євросвіт, 2006. – 208 с.

Друге, доповнене видання.

Книжка містить інформацію про геодезичні прилади, які використовують для створення геодезичної знімальної основи, виконання контурного та тахеометричного знімання, нівелювання та топографічного знімання. Особливу увагу приділено перевірці цих приладів. Розглянуто прилади та приладдя, які використовують для вимірювання площ, створення та викреслювання топографічних карт і профілів.

Для студентів, які вивчають загальний курс геодезії або топографію та фахівців у цій галузі.

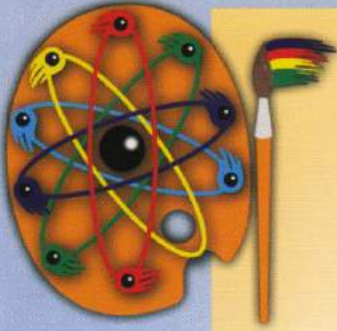
ВИДАВНИЦТВО „ЄВРОСВІТ” ПРОПОНУЄ:

НАУКОВУ ТА НАВЧАЛЬНУ ЛІТЕРАТУРУ:

1. Всеукраїнські олімпіади з фізики. Задачі та розв'язки. 2-ге вид./ За ред. Б. Кременського. – Львів: Євросвіт, 2006. – 312 с.
2. Алексейчук В., Гальчинський О., Шопя Г. Обласні олімпіади з фізики. Задачі та розв'язки. 2-ге вид. – Львів: Євросвіт, 2004. – 250 с.
3. Краус Іво. Вільгельм Конрад Рентген. Нашадок щасливої випадковості/ Пер. з чеської В. Іванової-Станкевич. – Львів: Євросвіт, 2002. – 84 с.
4. Штоль Іван. Крістіан Доплер/ Пер. з чеської В. Іванової-Станкевич. – Львів: Євросвіт, 2004. – 72 с.
5. Довгий Ярослав. Чарівне явище надпровідність. – Львів: Євросвіт, 2000. – 440 с.
6. Біланюк Олекса. Тахіони. – Львів: Євросвіт, 2002. – 160 с.
7. С. Поп., І. Шароді. Фізична електроніка. – Львів: Євросвіт, 2001. – 240 с.
8. Іван Вакарчук. Вступ до проблеми багатьох тіл. Посібник. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 1999. – 220 с.
9. Іван Болеста. Фізика твердого тіла. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2003. – 480 с.
10. Іван Вакарчук. Теорія зоряних спектрів. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2002. – 359 с.
11. Клим М., Якібчук П. Молекулярна фізика. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2003. – 544 с.
12. Астрономічний енцикл. словник/За ред. І. Климишина. – Львів: ЛНУ ім. І. Франка, 2003. – 548 с.
13. Геодезичний енциклопедичний словник/За ред. В. Літинського. – Львів: Євросвіт, 2001. – 700 с.

Приймаємо замовлення за адресою:

„Євросвіт”, м. Львів, 79005, а/с 6700; phworld@franko.lviv.ua



МИСТЕЦЬКА
СТОРІНКА
ЖУРНАЛУ
"СВІТ ФІЗИКИ"



Іван Франко
(27.08.1856 – 28.05.1916)

"Після Тараса Шевченка українська культура не знала діяча, рівного Іванові Франку за титанічними масштабами діяльності. Вічний революціонер, співець трудового народу, один з перших в європейських літературах співців робітничого класу, найвизначніший письменник пошевченківської доби, глибокий мислитель — таким є для нас Іван Франко."

Олесь Гончар

"Іван Франко — це розум і серце нашого народу. Це боротьба, мука і передчуття щастя України. України і людськості"

Максим Рильський

"... І знов я бачу тя, село моє родинне ..."

Іван Франко

