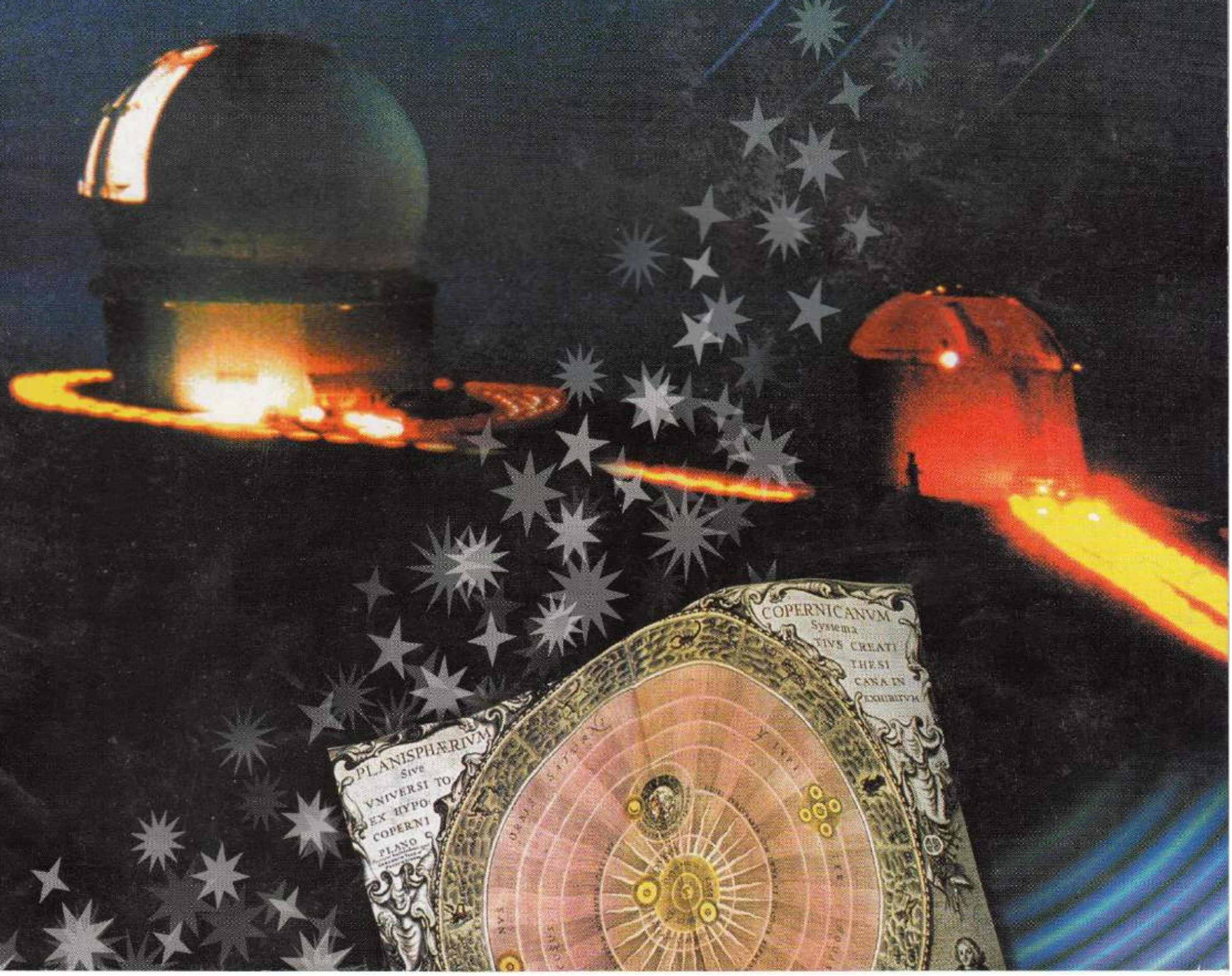
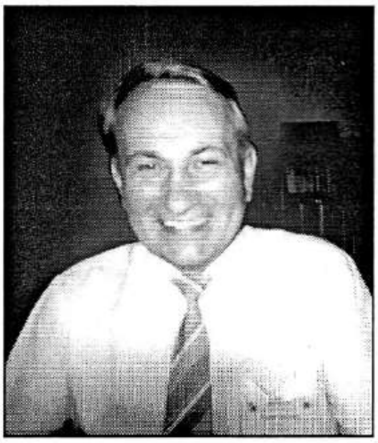
# Світ фізики

№ 2
2000

науково-популярний журнал

## У XXI сторіччя: з гороскопами чи телескопами?





Академік НАН України
Ярослав Яцків

# *УКРАЇНСЬКІЙ АСТРОНОМІЧНІЙ АСОЦІАЦІЇ – 10 РОКІВ*

*„ ... Як поєднати все це багатство, яке має Україна в єдине русло і без болю перейти на інноваційний розвиток в астрономії ...”*

*Із доповіді президента УАА на V з'їзді*
*Ярослава Яцківа*

***24 січня 1991 року створено Українську астрономічну асоціацію (УАА) для сприяння розвитку астрономії в Україні, розширення міжнародного співробітництва, захисту інтелектуальної власності, піднесення ролі наукових кадрів. Колективними членами УАА є 16 установ України, два асоціативних члени, 32 індивідуальних – з них 7 іноземні громадяни. З 1992 року УАА –член Европейського астрономічного товариства (ЕАТ), а з 1993 року – Міжнародної астрономічної спілки (МАС). Сьогодні в МАС входять 112 українських астрономів, в ЕАТ – 41.***

***5-8 червня 2000 року в м. Києві на базі Головної астрономічної обсерваторії НАН України відбувся V з'їзд УАА та міжнародна конференція „Астрономія в Україні-2000 (вплив міжнародного співробітництва)”. На з'їзді із звітом виступив президент асоціації, академік Ярослав Яцків.***

***„...Україна – велика астрономічна держава, займає провідне місце в світі за кількістю астрономів (декілька сотень кандидатів наук, майже сотня докторів наук). Коли подивитись на кількість публікацій, на те, що роблять астрономи в Україні, то це дивує. Є публікації, є рейтинґ, є роботи, які переважно виконані в зарубіжних колективах, ми якось інтеґруємось з міжнародною спільнотою. За індексом цитування в іноземних журналах астрономія є один із лідерів поряд з математикою та деякими галузями фізики. Але ми живемо завдяки надбанням минулого. Крім двометрового телескопу, ми не маємо нового астрономічного обладнання. Україна не бере серйозної участі в наукових астрономічних експериментах з борту космічний апаратів. Інші космічні проекти належать переважно до сфери дистанційного зондування Землі. Якщо ми не будемо мати сучасної інструментальної бази, ми незабаром вийдемо в число тих, хто не зможе готовати справжніх фахівців з астрономії. Це повинно турбувати нас усіх! Слід зконцентрувати зусилля на конкредних інструментальних комплексах, де ми можемо зайняти провідне положення у світі.***

***... УАА відпрацьовувала проект служби Сонця України на замовлення Кабінету Міністрів, брала участь у національній космічній програмі України, зокрема в організації конкурсів проектів, які будуть реалізовуватись на міжнародній космічній станції.***

***... Великі зусилля УАА приділяла подоланню того стану, в якому опинилася астрономічна освіта. Астрономія зараз не є базовим предметом у школах. УАА неодноразово ініціювала наради за участю представників Міністерства освіти з питань викладання астрономії в школі. На Загальних зборах відділення фізики й астрономії НАН України це питання отримало підтримку, прийнято Звернення до Президента та Прем'єр-Міністра. Рішенням УАА проведений конкурс навчальних програм з астрономії. УАА проводить Всеукраїнські та Міжнародні олімпіади з астрономії. Остання Міжнародна олімпіада школярів з астрономії відбулася 1999 року на базі Кримської астрофізичної обсерваторії ...”***

СВІТ ФІЗИКИ
науково-популярний журнал

2(10) '2000

# Дорогий Читачу!

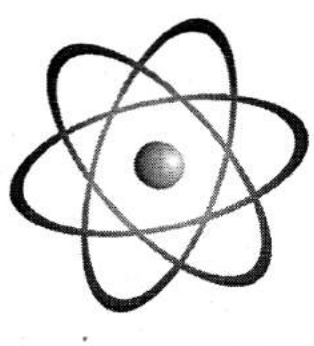
*Уже четвертий рік виходить журнал „Світ фізики” і сьогодні Ви тримаєте в руках його десяте число. Це маленька віха в біографії нашого журналу. На цьому пройденому вже шляху викристалізовувалась концепція журналу, ми розв'язували різні організаційні проблеми, шукали нові рубрики, нові форми подачі матеріалу, нових авторів. Ми намагались донести найновішу інформацію про те, над чим сьогодні працюють учені, які фізичні явища вони досліджують, намагались ознайомити своїх читачів із здобутками українських та зарубіжних фізиків.*

*Редакція журналу завжди велику увагу приділяла нашим юним читачам. Для них ми постійно публікували матеріали Всеукраїнських олімпіад та турнірів юних фізиків. Ми переконані, що людина, яка вирішила присвятити своє життя науковій праці, повинна розпочинати її як якомога раніше – у студентські або ще ліпше – шкільні роки.*

*За цей час багато здібних молодих людей залучились до наукової роботи, опублікували на сторінках журналу свої перші результати. Вони набули досвіду, розкрили свої здібності, а дехто навіть дістав визнання авторитетних учених.*

*На сторінках журналу ми порушували деякі гострі проблеми викладання фізики та астрономії у навчальних закладах України. Наші матеріали привернули увагу до цих проблем як учителів, так і науковців. Це обнадіює і вселяє оптимізм, щодо майбутнього.*

*Ми сподіваємось, що журнал „Світ фізики” й надалі буде цікавим і корисним для Вас, шановні Читачі, будитиме зацікавленість до самостійної наукової творчості.*



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"



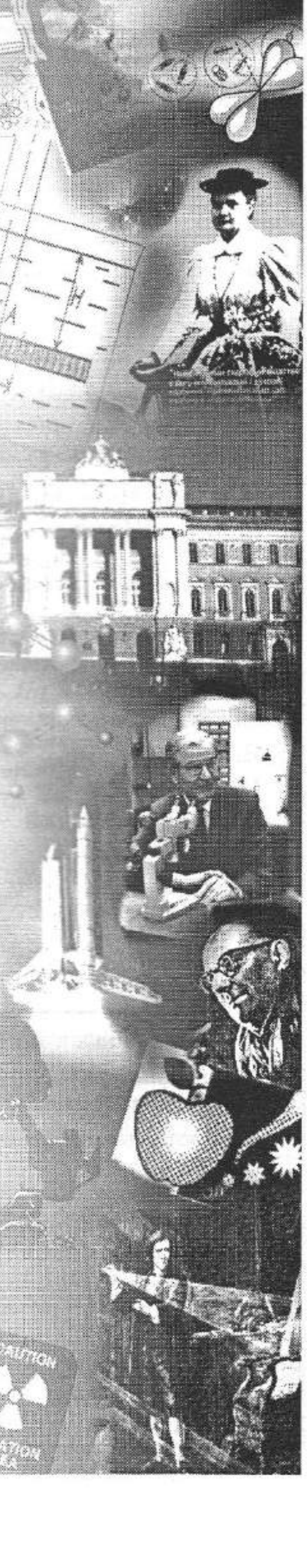
**Адреса редакції:**
редакція журналу „Світ фізики”
вул. Саксаганського, 1,
79005 м. Львів,
Україна

тел./факс 380 0322 72 68 11
sf@ktf.franko.lviv.ua
www.franko.lviv.ua/publish/phworld

**Передплатний індекс 22577**

# ЗМІСТ





# *Чому б не інтеґрувати другий закон Ньютона лише чисельно?*

**Гаральд ІРО**

*Інститут теоретичної фізики,*
*університет Йоганна Кеплера, Лінц, Австрія*

*Цю статтю я присвячую пам'яті*
*професора Романа Ґайди.*

## 1. Вступ

Запитання, що винесене в заголовок статті, часто виникає, коли Ви читаєте будь-яку книжку з класичної механіки. Для чого тут ця суєта стосовно динаміки Лаґранжа, законів збереження, канонічних рівнянь руху Гамільтона тощо? Чому б не зупинитися відразу після приведення рівняння руху Ньютона (РРН) і подати лише чисельні результати для деяких випадків, що нас цікавлять? У цій статті я висвітлю деякі сучасні аспекти класичної механіки[1], про які навіть у сучасних книжках або курсах лекцій з теоретичної механіки ледь згадується. Пошук загальних аспектів і властивостей РРН, а не просто їх інтеґрування на комп'ютері сьогодні є ціннішим, ніж будь-коли раніше (припускаємо, що жодний розсудливий фізик не діяв би так).

Маючи усього декілька ($N$) точкових частинок, досить легко чисельно інтеґрувати рівняння руху Ньютона:

$$m_i \ddot{\mathrm{r}} = \mathrm{F}_i\left(\{\mathrm{r}_j\}\right), \quad i = 1, \cdots, N, \qquad \text{(РРН)}$$

де $m_i$, $\mathrm{r}_i(t)$ відповідно маси і вектори положення частинок (надалі розглядатимемо лише консервативні системи), тобто $\mathrm{F}_i\left(\{\mathrm{r}_j\}\right) = -\nabla_i V\left(\{\mathrm{r}_j\}\right)$, де $V$ – потенціал, також надалі будемо використовувати позначення $\dot{a} = \dfrac{da}{dt}$, так що

$$m_i \ddot{r}_i = m_i \frac{d^2 r_i}{dt^2} .$$

Проте ніхто не був би задоволений від простого роздруку результуючої сукупності координат (див. табл.). Принаймні вони спробували б зобразити результати графічно. Отже, зобразімо орбіти частинок ($r_1(t)$, $r_2(t)$, ...). Орбіта має вигляд еліпса, який обертається, напр., як орбіта Меркурія. Кутова швидкість орбіти $\dot{\phi}$ (як видно з $m_2$) завжди має той самий знак, наприклад $\dot{\phi} > 0$. Проте, стартуючи з інших початкових умов, результат може бути таким, як зображено на

| | |
|---|---|
| 5.197753757238388E-002 | -.1036242246627808 |
| .1033616736531258 | -.1011988669633865 |
| .1535586565732956 | -9.733060747385025E-002 |
| .2019750475883484 | -9.227080643177032E-002 |
| .2480203658342361 | -8.635251969099045E-002 |
| .2911123335361481 | -7.997277379035955E-002 |
| .3306850492954254 | -7.357125729322433E-002 |
| .3661999404430389 | -6.760651618242264E-002 |
| .397159218788147 | -6.253085285425186E-002 |
| .4231205582618713 | -5.876516923308372E-002 |
| .4437121450901031 | -5.667513236403465E-002 |
| .4586465954780579 | -5.654985830187798E-002 |
| .4677322208881378 | -5.858432129025459E-002 |
| .4708806276321411 | -6.286641210317612E-002 |
| .468109667301178 | -6.936939060688019E-002 |
| .4595413208007812 | -7.795010507106781E-002 |
| .4453944265842438 | -8.835316449403763E-002 |
| .4259730875492096 | -.1002207696437836 |
| .4016517102718353 | -.1131077483296394 |
| .372857928276062 | -.1265010088682175 |
| .3400549590587616 | -.1398424804210663 |
| ................... | ..................... |

рис. 2. Тут важливо зазначити те, що $\dot{\phi}$ змінює знак, тобто спостерігається як $\dot{\phi} \geq 0$, так і $\dot{\phi} \leq 0$. Для декількох частинок зростає імовірність того, що орбіти можуть перетинатися і переплітатися. Графічне представлення орбіт має також обмежену цінність, оскільки важко прослідкувати за частинками.

Існує можливість представити динаміку однозначно. Розгляньмо дві множини незалежних динамічних змінних $\{\mathrm{r}_i\}$ і $\{\mathrm{p}_i = m_i \dot{\mathrm{r}}_i\}$ (вони незалежні, оскільки РРН – це диференційні рівняння другого порядку). Для кожної частинки вони є координатами у шестивимірному фазовому просторі. РРН у цих змінних є об'єднаними диференційними рівняннями першого порядку:

[1]Детальніше з цим можна ознайомитись у моїй книзі: Класична механіка. Львів: ЛНУ ім. І.Франка, 1999.- 464 с.

$$p_i = m_i \dot{r}_i$$

$$\dot{p}_{\mathrm{i}} = F_{\mathrm{i}}(\{r_{\mathrm{j}}\}), \quad i = 1, \cdots, N \ .$$

При досить загальних припущеннях їхні розв'язки, траєкторії $((r_i(t), p_i(t))$, не перетинаються. Проте виникає нова проблема: як зобразити графічно шестивимірний простір? Як зменшити кількість вимірів необхідних, для графічного представлення?

Тепер нам варто знайти корисні загальні властивості (тобто такі, що не залежать від обчислювальних можливостей комп'ютера) РРН та їхніх розв'язків[2].

Динаміка системи представлена у фазовому просторі траєкторіями багатьох різних вихідних величин – це потік у фазовому просторі. Важливим питанням є стійкість системи: чи траєкторії, які розміщені близько одна до одної в конкретний момент часу залишаються близькими? Причина, чому нас цікавить відповідь на це запитання, очевидна. Щоб передбачити майбутній стан системи не важливо точно знати початкові умови, адже вихідні значення координат у фазовому просторі відомі нам лише з деякою точністю.

Крім того, хотілося б знати, яку частину фазового простору займає потік? Чи він залишається у цій ділянці постійно? У багатьох випадках можна використати загальні властивості потоку у фазовому просторі. Важливу роль відіграють тут так звані **перші інтеґрали**. Це функції динамічних змінних $dI_k/dt = 0$,

$$\frac{d}{dt} I_{\mathrm{k}}(\{\mathrm{r}_i(t)\}, \{\mathrm{p}_i(t)\}, t) = 0 \, .$$

Якщо величина $I_{\mathrm{k}}$ не залежать від часу, її називаємо **збережною величиною**; це наприклад, енергія чи момент імпульсу. Закон збереження такої величини зменшує розмір і „заплутаність" тієї частини фазового простору, що вкрита траєкторіями. При деяких не надто обмежених фізичних допущеннях існує (в абстрактному математичному сенсі) $3N$ перших інтеґралів, з яких можна отримати (вилучити $t$ з одного із інтеґралів) $3N$-1 збережних величин

$$I_{\mathrm{k}}(\{r_i(t)\}, \{p_i(t)\}) \text{ з } dI_k/dt = 0 \, .$$

Якщо такі величини існують в принципі, то дуже часто вони не можуть бути дані достатньо точно; такі перші інтеґрали є некорисні, або, кажучи технічно, вони не є ізольованими.

[2]Чому ми (фізики) узагалі шукаємо загальні риси? Та тому, що ми віримо, що вони відображають симетрію, красу, ощадливість природи (Е.Мах).

Якщо відома достатня кількість ізольованих незалежних перших інтеґралів, тоді відомий розв'язок задачі: це так званий **інтеґровний випадок**. Існує дуже мало таких випадків (їх зазвичай вивчають на лекціях і подають у підручниках). Переважна більшість задач не є інтеґровними і навіть демонструють хаотичну поведінку. Це означає, що є вкрай чутлива залежність майбутнього стану такої системи від незначних змін у початкових умовах.

Проте для багатьох цих неінтеґровних систем існує інтеґровний граничний випадок, коли деякий параметр вилучається. Може виникнути запитання: яким чином інтеґровність переходить у неінтеґровність? Часткову відповідь дає **теорема КАМ**. У вільному викладі вона стверджує: малі збурення інтеґровних систем руйнують лише „слабкі" траєкторії, „сильні" – зберігаються. У цьому випадку фазовий простір ділиться на області із деякою регулярністю і такі, що були спершу зайняті слабкими траєкторіями, а зараз є хаотичними. Застосування цієї теореми до стійкості Сонячної системи дає не надто переконливий результат.

## 2. Приклади

### 2.1. Одновимірні системи: маятник

Рівняння руху для консервативних 1 - $d$ систем є завжди інтеґровними, тобто зводяться до інтеґралу (див. також нижче). У частковому випадку це також справджується, коли сила є нелінійною функцією узагальненої координати як у прикладі математичного маятника (точкова маса прикріплена до кінця невагомого стрижня довжиною $l$, рух якого обмежений площиною). Діє лише сила тяжіння, яку тут вважаємо константою:

$$F = mg \ .$$

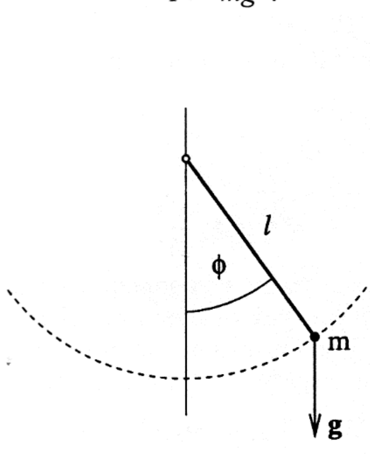



Рис. 1. *Математичний маятник*

Рівняння руху Ньютона для цієї системи:

$$\ddot{\phi} + \omega^2 \sin\phi = 0 \ ,$$

де $\omega^2 = g/l$. Помноживши рівняння на $\dot{\phi}$ відразу знайдемо, що енергія

$E = \frac{\dot{\phi}^2}{2} - \omega^2 \cos\phi$ є збережною величиною.

$$E = const$$

(із збереження легко отримаємо $\dot{\phi} = f(\phi)$) і тоді

$$t = \int d\phi / f(\phi)).$$

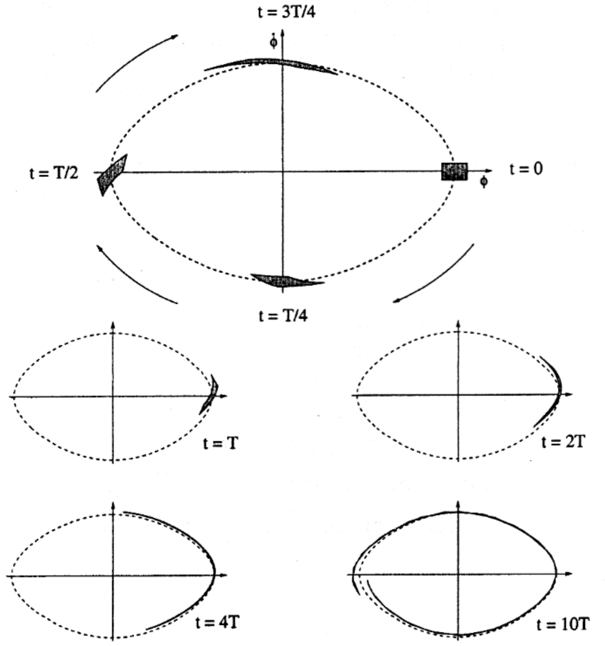



Рис. 2. *Зміна форми спершу прямокутної області початкових точок для різних положень коливного маятника*

Збереження енергії завдячує незалежності системи від вибору початкового моменту часу. Інакше кажучи: усі властивості маятника є тими ж у будь-який час (завдяки незалежності від часу *m*, *l*, *g*). Для невеликих початкових швидкостей $\dot{\phi}_0$ і невеликих значень $\phi_0$ орбіти $\phi(t)$ залишаються в межах області $(-\pi, \pi)$. Відповідні траєкторії ($\phi(t)$, $p_\phi(t) = \dot{\phi}$) обчислюються з рівнянь:

$$p_\phi = \dot{\phi}$$

$$p_\phi = -\omega^2 \sin\phi$$

і подібні до еліпсів (див. пунктирні лінії на рис. 2).

Розгляньмо коливання маятника в багатьох експериментах. Домовимось, що початкові умови для положення $\phi$ і швидкостей $\dot{\phi}$ є такими, що утворюють, за вибором, прямокутник, зображений при $t = 0$ на рис. 2. Тепер розгляньмо рух у фазовому просторі ($\phi$, $\dot{\phi}$). З часом спостерігаємо деформацію прямокутника, як зображено на рис. 2. Отже, вже для $t = 10T$ різні реалізації поширюються вздовж пунктирної траєкторії, яка позначає поведінку центра прямокутника: початково близькі точки не залишаються такими. Проте всі точки в межах прямокутника залишаються близько до пунктирної траєкторії: близькі траєкторії залишаються близькими. Система є не повністю стійкою: якщо існує невизначеність щодо початкових умов (а точність визначення початкових значень завжди є обмежена), майбутнє положення у фазовому просторі не може бути передбачене з такою ж невизначеністю. Ми всього лише можемо сказати, що траєкторії залишаються близькими.

### 2.2. Двовимірні системи: лінійний та нелінійний осцилятори

#### 2.2.1. Гармонічний осцилятор

Розгляньмо спершу лінійну 2-вимірну модельну систему, гармонічний осцилятор:

$$\ddot{x} + \omega_1^2 x = 0$$

$$\ddot{y} + \omega_2^2 y = 0$$

Ці рівняння руху можна знову отримати, розглядаючи математичний маятник, рух якого не обмежено площиною, і дозволеними є тільки малі відхилення від положення рівноваги

$(x = 0, \ y = 0)$.

Для загальних значень відношення $\omega = \omega_1/\omega_2$ маємо 2 збережні величини:

енергію *x*-моди $E_x = \frac{1}{2}\left(\dot{x}^2 + \omega_1^2 x^2\right)$ і *y*-моди

$E_y = \frac{1}{2}\left(\dot{y}^2 + \omega_2^2 y^2\right)$ (легко переконатися, що їхні похідні за часом дорівнюють нулеві). Звичайно, повна енергія $E = E_x + E_y$ також зберігається.

Спочатку розгляньмо **ізотропний випадок**:

$$\omega_1 = \omega_2 \ .$$

Тепер маємо три збережні величини: енергію *x*-моди $E_x$, енергію *y*-моди $E_y$ і момент імпульсу $L = x\dot{y} - y\dot{x}$. Додаткове збереження $L$ завдячує

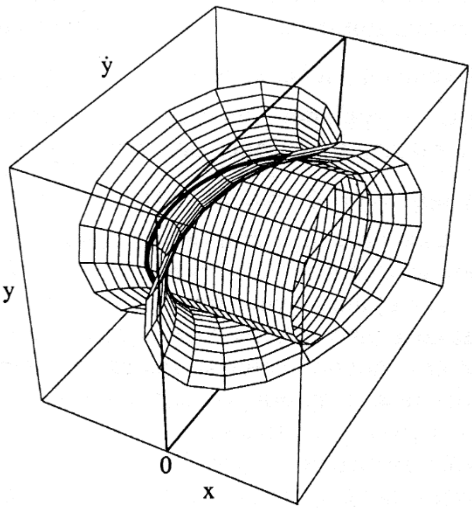



Рис. 3. *Траєкторія ізотропного осцилятора у редукованому фазовому просторі*

ротаційній симетрії системи. Траєкторії розміщені у 4-вимірному фазовому просторі, що важко зобразити наочно. Але можна скористатись постійністю $E_x$, щоб виразити $\dot{x}$ як функцію $x$ і так зменшити кількість вимірів, тоді представити траєкторії графічно. Ми розглядаємо цей редукований фазовий простір $(x,\ y,\ \dot{y})$ і шукаємо траєкторію ($x(t)$, $y(t)$, $p_y(t) = \dot{y}$). Вона має задовольняти законам збереження $E_y$ і $L$. Обом відповідають траєкторії в редукованому фазовому просторі. Це зображено на рис. 3. Еліптичний циліндр – це поверхня $E_y = const$, а гіперболічний циліндр – отримуємо при $L = const$. Траєкторія – це лінія перетину чи дотику (як на рис.) поверхонь. З рисунка можемо, побачити, що траєкторія перетинає площину $x = 0$ лише у двох точках. Орбіта, еліпс, є просто проєкцією траєкторії на площину $(x, y)$.

Тепер повернімось до **анізотропного випадку**: $\omega_1/\omega_2$ довільне, але $\neq 1$. Заплутаність орбіт $(x(t), y(t))$ залежить від відношення $\omega_1/\omega_2$. Вони утворюють добре відомі **фігури Ліссажу**. Деякі приклади подано ліворуч на рис. 5 і 6. Траєкторії $(x(t), y(t),\ p_x(t) = \dot{x},\ p_y(t) = \dot{y})$ – це криві у 4-вимірному просторі. Використовуючи збереження повної енергії, можемо знову зменшити кількість координат, необхідних для графічного представлення у фазовому просторі.

Пояснимо метод, запропонований Пуанкаре, щоб представити динаміку такої системи у двох вимірах. Якщо поверхня у цьому 3-вимірному просторі вибрана так, що послідовність точок перетину траєкторії відображає динаміку (порівняйте з рис. 4; див. також приклади нижче), тому поверхню називаємо **поверхнею перетину Пуанкаре** (ППП) (зазвичай, беремо до уваги лише перетини з тими траєкторіями, що входять у площину з одного вибраного боку; так на рис. 4 нехтуємо, наприклад, точками, де траєкторія входить знизу поверхні).

Застосуємо це поняття до гармонічного осцилятора. Зменшимо вимірність фазового простору, використовуючи закон збереження енергії

$$E = E_x + E_y = const\,,$$

це дає $\dot{x}$ як функцію змінних, що залишилися:

$$\dot{x} = f(x, y, \dot{y}).$$

Представимо поверхню $x = 0$ як ППП (і можемо допустити лише точки з, наприклад, $\dot{y} > 0$ ).

Рис. 4. *Послідовність точок перетину траєкторії на площині Пуанкаре*

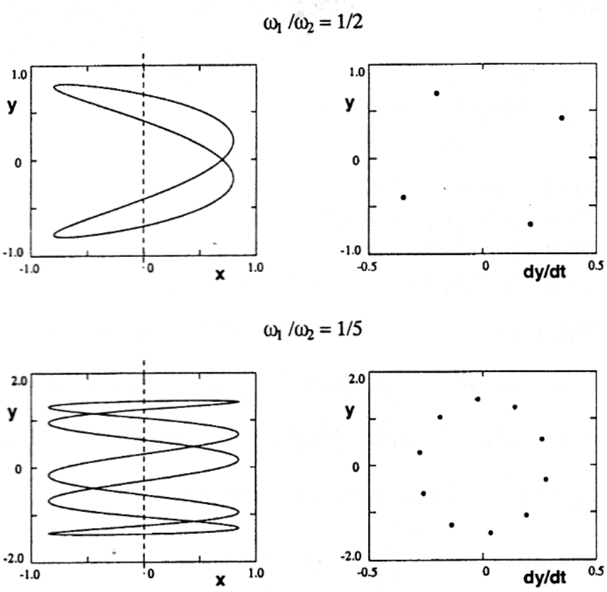



Рис. 5. *Траєкторії і точки ППП 2-вимірного гармонічного осцилятора для раціональних відношень частот*

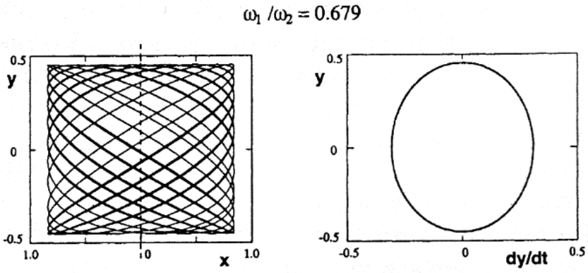



Рис. 6. *Траєкторії і точки ППП 2-вимірного гармонічного осцилятора для ірраціональних відношень частот*

Розгляньмо спершу два приклади для раціонального відношення частот $\omega = \omega_1/\omega_2$ (рис. 5). Як видно з рисунка на лівій частині, траєкторії замкнені. Вони утворюють добре відомі фігури Ліссажу, поява яких залежить від відношення $\omega$. Праворуч зображено відповідні точки ППП: є лише скінчена їх кількість, що залежать також від $\omega$ (на рисунках зображено усі точки перетину).

Розгляньмо ірраціональні значення $\omega$. У цьому випадку траєкторії не замкнені (див. рис. 6); з часом траєкторія покриє всю площу, дозволену законом збереження енергії. Такі орбіти називаємо **майже періодичними**. Маємо безмежну кількість точок ППП на кривій, що є лінією перетину поверхні $E_y = const$ з ППП. Тобто умова того, щоб точки ППП лежали на кривій – це існування збережної величини, яка тут є простою функцією координат $y$ і $\dot{y}$. Такий інтеґрал називаємо ізолювальним.

### 2.2.2. Система Ено-Ейлеса

Рівняння руху

$$\ddot{x} = -x - 2xy$$

$$\ddot{y} = -y + y^2 - x^2$$

запропонували Ено (M.Henon) і Ейлес (C.Heiles) (Astron. J **69**, 73 (1964)) при моделюванні галактичної системи. Їх також можна розглядати як рівняння руху ангармонічного осцилятора. Єдиним точно відомим першим інтеґралом є енергія

$$E = \frac{1}{2}\left(\dot{x}^2 + \dot{y}^2\right) + V(x, y),$$

де потенціал

$$V(x, y) = \frac{1}{2}\left(x^2 + y^2\right) + x^2 y - \frac{1}{3} y^3$$

(рис. 7). Обмежений рух спостерігається лише для значень енергії у межах:

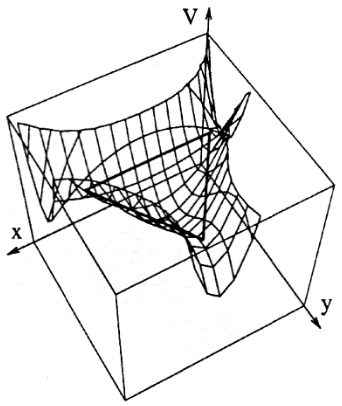
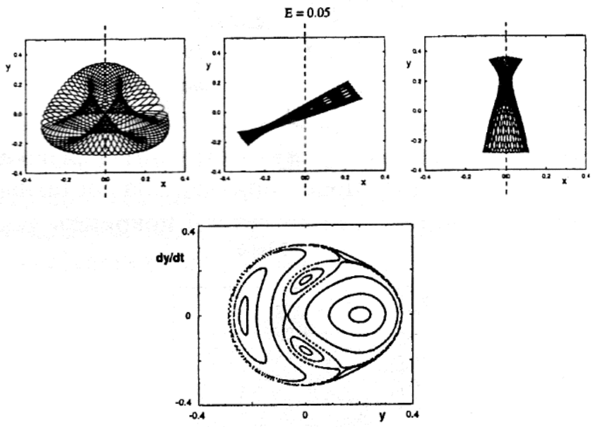



Рис. 7. *Потенціал системи Ено-Ейлеса*

$$0 \le E \le 1/6 = 0{,}1666\,.$$

У цьому випадку рух обмежено рівностороннім трикутником.

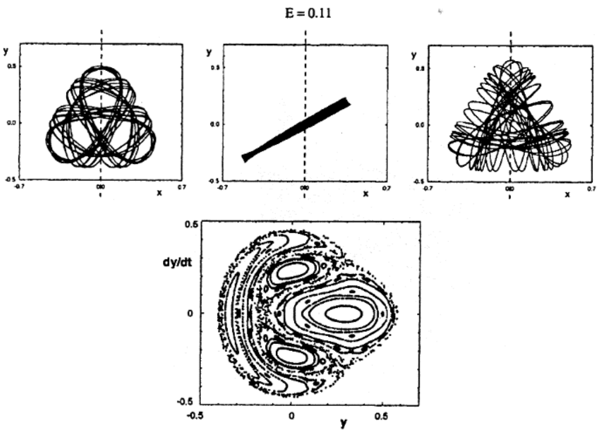
На наступних рисунках зображено траєкторії (ряд угорі) і ППП (внизу) для зростаючих значень енергії $E$ = 0,05; 0,11 ... Для малого значення енергії $E$ = 0,05, траєкторії мають вигляд заплутаних фігур Ліссажу. Усі точки ППП лежать на явно гладких кривих. Кожна крива породжена траєкторією, що починається у окремій множині початкових значень.




Це, схоже, вказує на існування додаткової збережної величини $I_2$ (як у випадку гармонічного осцилятора): різні криві у ППП тоді відповідали б різним значенням $I_2$ ($I_2 = const$).

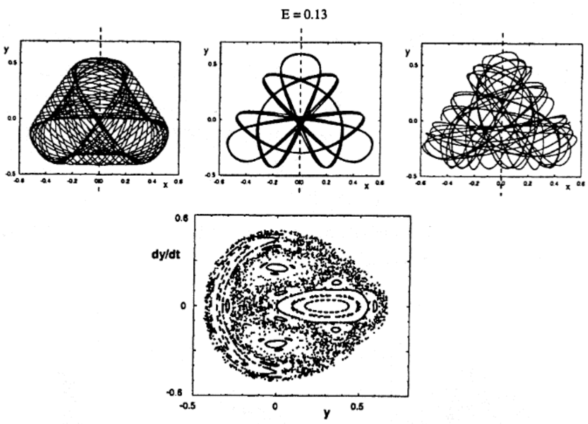
Уже для $E$ = 0,11 деякі траєкторії стають хаотичними. Для деяких початкових значень точки ППП не лежать на гладких кривих; вони розкидані у деяких малих областях.

Зі зростанням енергії далі до $E$ = 0,13 кількість хаотичних орбіт також зростає. Проте цікавіше є збільшення області в ППП, що вкрита розкида-

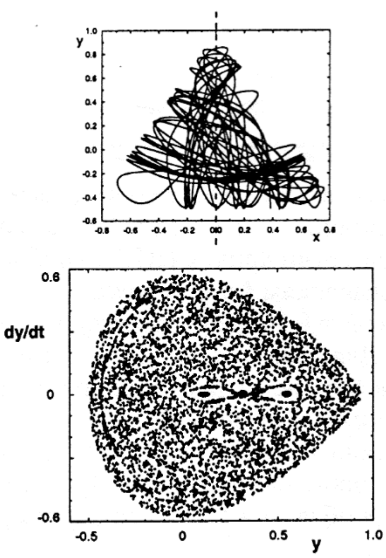



ними точками. Усі ці точки належать лише до двох різних траєкторій.

Переходячи нарешті до максимального значення енергії для обмеженого руху ($E$ = 0,1666),




траєкторії стають повністю хаотичними (ми показали лише один типовий приклад). За достатньо великий час ($t \to \infty$) траєкторії покриють усю




трикутну область (рис. 7). У ППП **усі** розкидані точки належать лише до **однієї** траєкторії. Ґуставсон спробував обчислити перший інтеґрал для системи Ено-Ейлеса, застосовуючи теорію збурень. Отримані результати добре узгоджується із числовими розрахунками до значень $E$ = 1/12 (рис. 8). Далі маємо невідповідність. Результат Ґуставсона не може показати хаотичну поведінку системи, завдяки основному припущенню будь-якої теорії збурень: гладка залежність результату від параметра збурень. Отже, перш, ніж починати безпосереднє інтеґрування рівнянь руху, важливо перевірити розв'язки чисельно.

### 2.3. Хаотична поведінка

Коли поведінку системи називаємо хаотичною? Тоді, коли спостерігається вкрай чутлива залежність майбутнього стану від початкових значень. Уже незначна відмінність у початковому стані приводить до повністю різних значень у майбутньому. Важливою результуючою ознакою хаотичної системи є непередбачуваність її майбутнього стану, оскільки вихідні початкові значення завжди відомі лише з деякою точністю. Математичніше

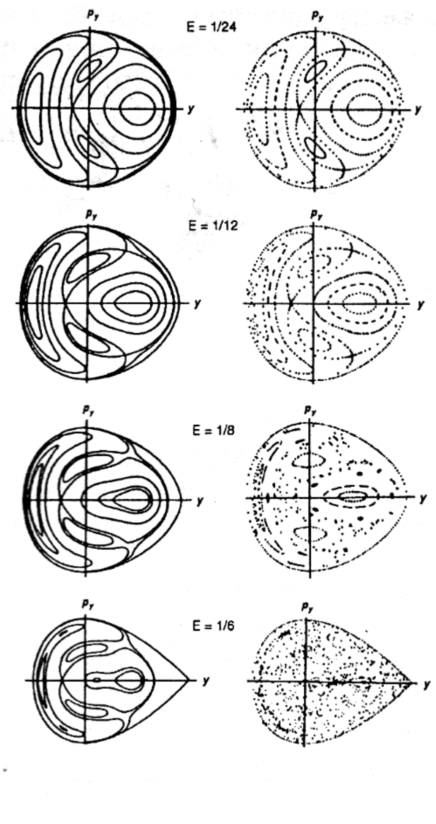



Рис. 8. *Порівняння результату Густавсона, отриманого методом теорії збурень, із чисельними даними*

формулювання: хаотична поведінка може з'явитися у системі із більш, ніж двох автоколивних нелінійних диференційних рівнянь

$$\dot{x}_i = g(x_1, \ldots, x_f),\ i = 1, \ldots, f,\ f \geq 3,$$

де $g$ – нелінійна функція $\{x_i\}$. Розгляньмо формальний розв'язок: $x_i = x_i(\{x_j^o\}, t)$,

де $x_j^o = x_j(\{x_k^o\}, t = 0)$

для двох близьких вихідних значень

$$\{x_j^0\} \ \text{ і } \ \{x_j^0 + \delta x_j^0\}.$$

У хаотичному випадку величини $x_i = x_i(\{x_j^0\}, t)$ і $\bar{x}_i = x_i(\{x_j^0 + \delta x_j^0\}, t)$ можуть стати як завгодно віддаленими з часом. Відстань $\|\bar{x}_i - x_i\|$ повинна залежати від часу експоненційно:

$$\lim_{t \to \infty} \|\bar{x}_i - x_i\| = const \times e^{\lambda t},$$

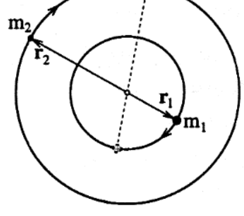
де **показник Ляпунова** $\lambda$ має бути додатнім.

Рівняння руху у фазовому просторі для консервативної системи із незалежним від часу потенціалом у загальному випадку є системою автономних нелінійних рівнянь першого порядку. Тому вже для однієї частинки у двох вимірах ($N = 1$ і $d = 2$) може з'явитися хаотична поведінка, як у системі Ено-Ейлеса. У хаотичних механічних системах надто багато перших інтеґралів, які існують в принципі! – є незбережними величинами (некорисними). Щоб зрозуміти поняття такого інтеґралу, уявіть собі криву в фазовому просторі, схожу на фігуру Ліссажу для відношення частот близького до ірраціонального значення: крива складатиметься із багатьох дуже коротких ділянок, де інтеґрал є єдиним (а тому корисним).

**2.4. Системи трьох тіл**

Розгляньмо три частинки, що взаємодіють попарно через ґравітаційні сили:

$$\vec{F}_{ij}(\vec{r}_i, \vec{r}_j) = -\frac{Gm_i m_j}{|\vec{r}_i - \vec{r}_j|^3}(\vec{r}_i - \vec{r}_j), \qquad i, j = 1, 2, 3,$$




У загальному випадку рух трьох мас є складним, проте існує специфічна ситуація, яку легше розглянути: так звана обмежена задача трьох тіл.

Дві важкі частинки $m_1, m_2$ рухаються під дією взаємних ґравітаційних сил по колових Кеплерових орбітах. Крім того, маємо легку масу $m \ll m_1, m_2$ (тобто $m$ не впливає на рух $m_1$ і $m_2$), що здійснює рух тільки в цій заданій площині.

Рух маси $m$ зручно розглядати у системі координат, що обертається навколо центра мас частинок $m_1$ і $m_2$. Єдиний перший інтеґрал результуючих рівнянь руху – це енергія $E$, яка у приведених одиницях $(m = \omega = 1)$ і $\mu = m_1/(m_1 + m_2)$ має

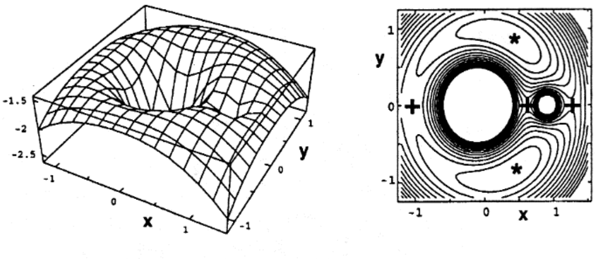



Рис. 9. *Потенціал обмеженої системи трьох тіл*

вигляд:

$$E = \frac{1}{2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) + V(x, y),$$

де $V = -\frac{1}{2}(x^2 + y^2) - \frac{\mu}{r_1} - \frac{1-\mu}{r_2}$ ($r_1$, $r_2$ – приведені відстані до мас $m_1$ і $m_2$ відповідно), що діє на $m$ у системі, яка обертається для $\mu = 0.1$ (рис. 9). Тут маємо п'ять так званих Лагранжевих точок: Два максимуми потенціалу $V$ (позначені * на рис. 9) і три сідлові точки – (позначені +).

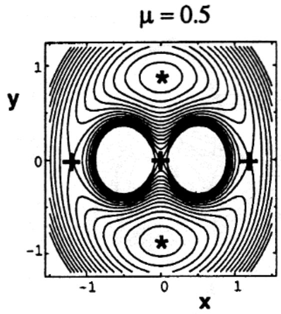



Рис. 10. *Потенціал у системі, що обертається, для μ = 0,5*

Надалі покажемо траєкторію для $\mu = 0.5$ (тобто $m_1 = m_2$). Якщо $E \leq -2$, тоді енергія менша за величину потенціалу у сідловій точці між двома масами, $V(0,0) = -2$, і траєкторії залишаються поблизу однієї із мас. На рис. 11 з ображено схожу до регулярної траєкторію для енергії $E = -2{,}25$. Проте з наближенням до $E = -2$ криві вказують на те, що з легкою частинкою щось відбувається при енергіях $E \le -2$ (рис. 12).

Якщо $-2 \le E \le 1{,}743$, де $1{,}743$ – значення потенціалу $V$ у двох інших сідлових точках $\left(\pm\sqrt{5}/2{,}0\right)$, траєкторії все ще обмежені і проходять навколо обох мас (див. рис. 13.). Зображена траєкторія явно не регулярна і навіть має риси хаотичної. Це можна вивести із ППП (доведення

E = -2.25

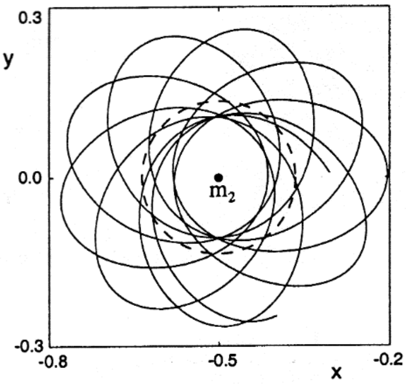



Рис. 11. *Схожа до регулярної орбіта навколо однієї із важких мас*

не наводимо, оскільки їх можна знайти в оригінальних працях). Лінійний аналіз стійкості показує, що для значень $\mu < 0{,}038$ також дві Лагранжеві точки (позначені *) є стійкими (не рухомими

E = -2

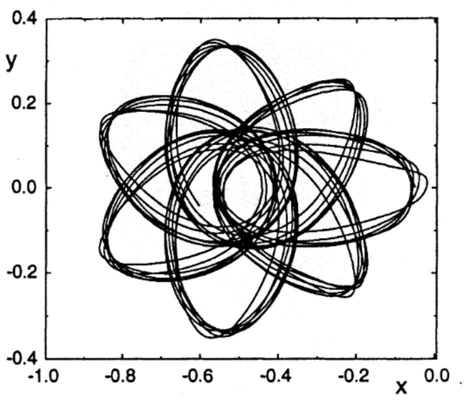



Рис. 12. *Не настільки регулярна траєкторія навколо однієї із важких мас*

E = -1.75

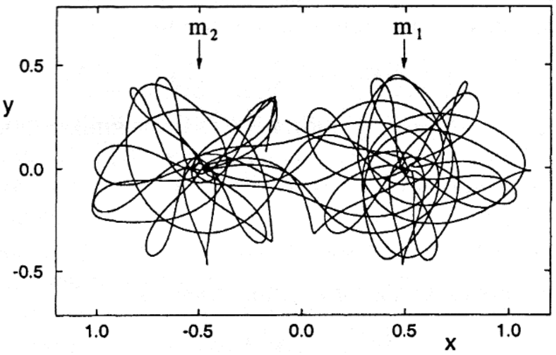
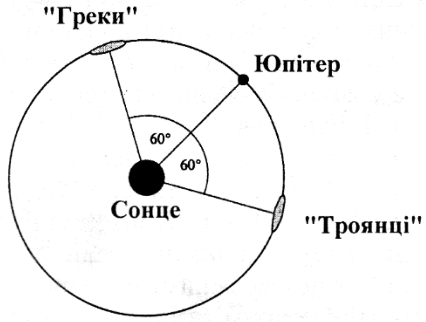



Рис. 13. *Явно хаотична траєкторія навколо обох мас*

розв'язками рівнянь руху): маємо невелику область стійкого, обмеженого руху поблизу цих максимумів $V$. Рух стабілізується силами Коріоліса. Система, до якої можна застосувати ці міркування – це дві групи астероїдів (**Греки** і **Троянці**) у конфігурації, що зображена нижче; важкими масами тут є Сонце та Юпітер.




**2.5. Чи стійка Сонячна система?**

Розгляньмо модель Сонячної системи, що складається лише з Сонця, Юпітера і Землі. Відношення їхніх мас – $m_с : m_ю : m_з = 330000 : 318 : 1$. Чи буде ця система стійкою? Щоб одержати відповідь, використовуючи аналітичні методи, виходимо із „незбуреної системи", яка складається лише із Сонця та Юпітера. Не беручи до уваги орбіту Сонця навколо спільного центру мас, Юпітер утворює Кеплерів еліпс навколо Сонця з періодом $T_ю$ приблизно 12 років; відповідна частота $\omega = 1/T_ю$. Щоб обчислити орбіту Землі аналітично, використовуємо канонічну теорію збурень із параметром розкладу

$$\varepsilon \sim m_З/(m_С + m_Ю).$$

Тепер настав той момент, коли починає спрацьовувати теорія Гамільтона-Якобі, яка ґрунтується на аналітичній механіці Лаґранжа і принципі Гамільтона. Для систематичної теорії збурень теорія Гамільтона-Якобі необхідна, але це не є предметом нашого викладу. Ми лише зауважимо, що результат, одержаний у теорії збурень, буде не хаотичним завдяки методові (як результат Ґуставсона, зображений на рис. 8 для системи Ено-Ейлеса). Але ми знаємо, що тут є хаотичні розв'язки. І їх можемо знайти лише чисельно. Чи буде розв'язок хаотичним чи реґулярним, не можна встановити без аналітичних і чисельних досліджень. Стосовно аналітичного наближення маємо теорему **КАМ** (Колмогоров, Арнольд, Мозер): для деяких частот $\omega$ незбурених траєкторій мале збурення величиною $\varepsilon$ лише трохи змінить траєкторію і не зруйнує її. Ілюстративнішим наслідком теореми КАМ є розподіл мас у кільцях Сатурна (див. рис. 14.). Кільця завдячують малим масам, що притягаються Сатурном. Один із внутрішніх Супутників (Мімас) відіграє роль збурення.

Повертаючись до системи Сонце-Юпітер-Земля: із астрономічних даних можемо вивести, що $\omega = 1/T_ю$ є однією із цих „стійких" частот (або

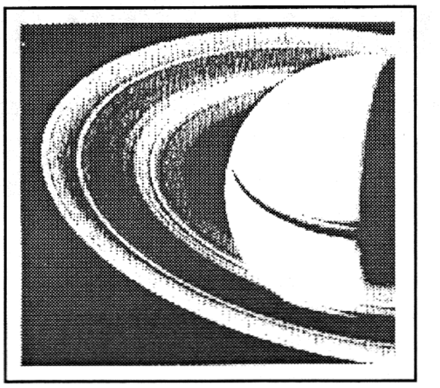
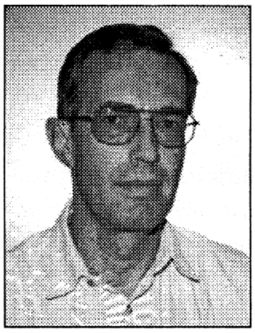


Рис. 14. *Кільця Сатурна*

принаймні дуже близькою). Переходячи до Сонячної системи шляхом додавання інших планет врахуємо, що із зростанням кількості частинок збільшується хаотична область, так що у результаті система повністю хаотична. Висновок, який можна одержати щодо Сонячної системи: **„Не є неможливо, що Сонячна система стійка"**, але це дуже малоймовірно; лише дуже довгі (порівняно з часом життя Сонця) характеристичні часи для хаотичної поведінки можуть вберегти нас від хаосу.

*Це запис лекції, прочитаної у Львівському національному університеті імені Івана Франка. Я хочу висловити найщирішу подяку ректорові, професору Іванові Вакарчукові і докторові Юрію Головачеві за їх запрошення взяти участь у презентації моєї книжки і теплу гостинність упродовж мого перебування у Львові. Юрієві, я, окрім того, зобов'язаний за усі зусилля стосовно опублікування українського видання моєї книжки, з якої взято більшість наведених ілюстрацій. Також я вдячний професорові У.Тітулаеру (університет м. Лінц, Австрія) за корисні зауваження у підготовці цього рукопису.*

Переклала **Вікторія Блаватська**,
*студентка V курсу Львівського національного університету імені Івана Франка*



## Гаральд Іро,

**відомий австрійський фізик-теоретик, доцент Інституту теоретичної фізики університету Йоганна Кеплера у Лінці (Австрія). Діапазон його наукових інтересів – це загальна теорія фазових переходів, дослідження феромагнетного впорядкування у реґулярних та структурно-невпорядкованих системах, хаотична поведінка Гамільтонових систем. Упродовж багатьох років доктор Гаральд Іро читає лекції з теоретичної фізики студентам техніко-природничого факультету університету міста Лінц.**

**Автор численних наукових публікацій та підручника *Класична механіка*. В Австрії підручник витримав уже три видання: 1993, 1995 і 1996 р. Український переклад (Львів: ЛНУ ім. Івана Франка, 1999) зроблено на підставі німецького тексту, підготовленого для видання в Австрії 2000 р.**

# ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ РОЗМІРНОСТІ

**Олег Орлянський**

доцент кафедри теоретичної фізики
Дніпропетровського держуніверситету

*„ ... ті, хто справді розуміє природу того або іншого явища, повинні одержувати основні закони з міркувань розмірності."*

Е.Фермі

Коли ми вимірюємо, ми порівнюємо. Свій зріст з метром, масу – з кілограмом. Кількісне значення обов'язково супроводжується найменуванням одиниці виміру. Еталони довжини (до 1960 р.) й маси – платиноіридієвий стержень зі штрихами і циліндрична гиря зберігаються у Міжнародному бюро мір та ваг у Севрі поблизу Парижу. Фізика оперує великою кількістю розмірних величин, для їх позначення не вистачає навіть літер (великою літерою *P* ми позначаємо і тиск, і потужність, і вагу). Здавалося б, кількість еталонних одиниць повинна бути не меншою. Проте завдяки тому, що різноманітні фізичні величини пов'язані між собою фізичними закономірностями, ми не потребуємо великої кількості еталонних одиниць, фактично вимірюючи лише проміжки довжини та інтервали часу (наприклад, про значення сили ми судимо або за прискоренням, або за деформацією). Структура фізичних законів, які пов'язують між собою величини різних розмірностей, відображається в розмірних сталих. Ґравітаційна стала

$$G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}\ \text{Нм}^2/\text{кг}^2$$

подається з найменуванням, в якому неважко вгадати закон всесвітнього тяжіння:

$$[G] = \left[Fr^2/m_1 m_2\right].$$

Якщо записати розмірність ґравітаційної сталої у системі СІ, а саме виразити її одиницю виміру через основні одиниці – метр, секунду та кілограм, матимемо: $[G] = \text{м}^3/\text{кг}\cdot\text{с}^2$, тобто $[G] = \left[r^3/m \cdot t^2\right]$, або $\left[t^2/r^3\right] = [1/Gm]$. Інтерпретуючи в останньому виразі $t$ як період руху супутника по орбіті з характерною відстанню $r$ навколо центральної маси $m$, одержимо третій закон Кеплера.

Під *розмірністю фізичної величини* розуміють вираження її через одиниці виміру основних величин. У механіці за *основні*, або *первинні*, одиниці виміру прийняті довжина $L$, час $T$, маса $M$. 1832 р. К.Гаусс назвав ці одиниці абсолютними. За основні одиниці виміру можна вибрати й інші, наприклад, довжина, час і сила, інколи це спрощує обчислення. Решту одиниць виміру називають *похідними*, або *вторинними*, і виражають їх через основні. Наприклад, швидкість: $[v] = L/T$. Історично могло б скластися інакше, і швидкість вимірювалася б так: $T/L$, а її зміст визначався б часом, необхідним для подолання одиничної відстані. Чи користуємося ми сьогодні таким визначенням швидкості? Звичайно. Згадаймо, як за допомогою годинника ми оцінюємо свою швидкість при русі до школи, на вокзал, чи до театру. Ожеледиця – і на ту ж саму відстань ми витрачаємо значно більше часу, отже рухаємося повільніше.

Наступні два твердження зобов'язані своєю появою Ж. Фур'є („Аналітична теорія теплоти". 1822):

1. Вторинні одиниці виміру записуються через основні за допомогою степеневих виразів. Інакше це твердження називається *формулою розмірності* і формулюється так:

**Розмірність довільної фізичної величини може бути лише добутком степенів величин, які прийняті за основні**.

У механіці:

$$[\text{\textit{Фізична величина}}] = L^a T^b M^c,$$

де $a$, $b$, $c$ - деякі сталі. Безрозмірна фізична величина має нульову розмірність:

$$[\text{\textit{Безрозмірна фізична величина}}] = L^0 T^0 M^0 = 1.$$

2. **Додавати і віднімати можна лише величини однакової розмірності (однорідність за розмірністю).** Наприклад, з точки зору фізики запис $S - vt = m - \rho V$ – безглуздий, хоча математично усе правильно: 0 = 0. (Аналогічно: „я не маю грошей" ≠ „я не маю проблем").

Розгляньмо найпростіші приклади застосування теорії розмірності.

***Теорема Піфагора.*** Доведімо теорему Піфагора. Прямокутний трикутник може бути побудований за гіпотенузою $c$ і одним з гострих кутів $\alpha$ (другий кут $\pi/2$-$\alpha$). Побудувавши трикутник, ми зможемо знайти всі його параметри: довжину бісектриси, висоти, кут між медіаною і стороною, площу $\alpha$. Отже, будь-яка з характеристик прямокутного трикутника може виражатися тільки через $c$ і $\alpha$, де $c$ має розмірність довжини, $\alpha$ – безрозмірна величина. Зважаючи на те, що розмірність площі – це довжина у квадраті, а зрівнювати можна лише величини однакової розмірності, маємо вигляд формули для площі трикутника: $S = c^2 f(\alpha)$, де $f(\alpha)$ – безрозмірна функція від безрозмірної змінної. Висота, яку опущено з прямого кута на гіпотенузу, ділить трикутник на два подібних йому прямокутних трикутники (рис. 1).

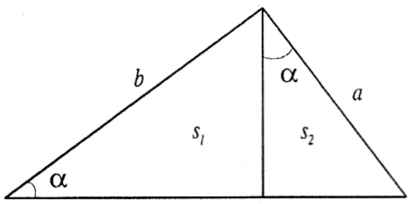



Рис. 1.

У першому з них гіпотенузою є $b$, у другому – $a$, отже, площі першого і другого трикутників запишемо у вигляді $S_1 = b^2 f(\alpha)$, $S_2 = a^2 f(\alpha)$. Підставивши в $S = S_1 + S_2$ і скоротивши на невідому функцію $f(\alpha)$, знайдемо $a^2 + b^2 = c^2$. *При доведенні враховувалось, що сума кутів трикутника дорівнює $\pi$, і трикутники з однаковими кутами подібні, що абсолютно правильно в евклідовій геометрії. Однак для викривлених геометрій це не так. Уже в найпростіших випадках геометрії Лобачевського з постійною негативною кривиною і геометрії Римана з постійною позитивною кривиною сума кутів трикутника не дорівнює $\pi$ і залежить від площі трикутника. Кожний трикутник унікальний і не має подібних собі більшого або меншого за розміром. Ці геометрії характеризуються єдиним розмірним параметром R. Тому, якщо навіть припустити, що, знаючи гіпотенузу і один гострий кут, можна побудувати прямокутний трикутник, формула для площі за рахунок появи розмірної сталої повинна бути змінена: $S = c^2 f(\alpha, c/R)$ або $S = R^2 g(\alpha, c/R)$. У цьому випадку просто отримати аналог теореми Піфагора не вдається, однак при $c/R << 1$ (невеликі трикутники порівняно з характерною кривиною простору) теорема Піфагора в загальновідомій формі відновлює своє значення. Річ у тому, що, згідно з сучасним уявленням, простір (точніше простір-час) у нашому світі викривлений. Причиною такого викривлення є матерія, а теорія, яка встановлює взаємозв'язок матерії і геометрії – загальна теорія відносності або теорія гравітації.*

***Робота газу***. Визначімо роботу, яку здійснює газ за один цикл, що є колом, яке зображено на рис. 2. Зміна стану газу здійснюється за годинниковою стрілкою. Як відомо, робота газу за один цикл чисельно дорівнює площі, яку обмежує цикл.

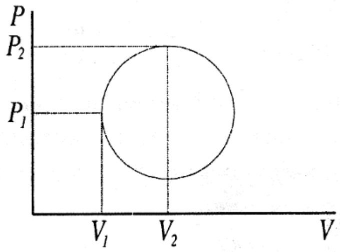



Рис. 2

Площа кола $\pi r^2$. Однак спроби взяти замість радіуса $P_2$ - $P_1$ або $V_2$ - $V_1$ приводять до безглуздих результатів: робота вимірюватиметься або у квадратних Паскалях, або в метрах у шостому степені (при відповідних одиницях виміру осей). Розмірність вимагає, щоб робота вимірювалась у Джоулях, які є добутком Паскалей на метри кубічні. Це можливо тільки, якщо $r^2$ розглядати як добуток двох взаємно перпендикулярних радіусів. За один з них слід узяти $P_2$ - $P_1$, а за інший – $V_2$ - $V_1$. Отже, робота, яку виконує газ за один цикл, $A = \pi (P_2 - P_1)(V_2 - V_1)$. Зрозуміло, що ця величина не залежать від того, які масштаби та одиниці виміру ми вибрали при побудові графіка. Але ж коло неодмінно змінить свою форму, якщо по осі ординат замість Паскалей відкласти мм. рт. ст., а по осі абсцис замість кубічних метрів, наприклад, літри. Рівняння одиничного кола з центром на початку координат $x^2 + y^2 = 1$ після розтягування вздовж осі $OX$ в $a$ разів, а вздовж осі $OY$ в $b$ разів набуває вигляду $x^2/a^2 + y^2/b^2 = 1$ – рівняння еліпса. Отже, еліпс є колом, що розтягнуте вздовж перпендикулярних напрямків, і його площа – $S = \pi ab$. Аналогічно об'єм еліпсоїда, рівняння якого $x^2/a^2 + y^2/b^2 + z^2/c^2 = 1$, отримуємо з об'єму кулі: $V = \frac{4}{3}\pi abc$ .

Як бачимо з прикладів, застосовувати теорію розмірності доречно не тільки у фізиці, але й у математиці. Відзначимо, що до Вієта принцип однорідності за розмірностями витримувався навіть при розв'язуванні квадратних рівнянь. Та й зараз, розкривши математичний довідник, переконуємось, що всі геометричні співвідношення обов'язково задовольняють розмірним вимогам. Наприклад, формула Герона для обчислення площі трикутника за трьома сторонами

$$S = \sqrt{p(p-a)(p-b)(p-c)} ,$$

або об'єм зрізаної піраміди висотою $h$, площі основ якої $S_1$ і $S_2$:

$$V = (S_1 + \sqrt{S_1 S_2} + S_2)h/3 .$$

Від загальних ідей перейдімо до методики розв'язування фізичних задач методом розмірностей. Визначімо період плоских коливань математичного маятника.

***Математичний маятник*** – це невеликий за розміром тягарць масою $m$, який прикріплений до невагомої нитки довжиною $l$, що не розтягується. Нитка потрібна для того, щоб матеріальна точка рухалось вздовж сферичної поверхні. Тому замість нитки можна використати легкий стержень, або помістити матеріальну точку всередину гладкої сферичної поверхні.

1. Виберімо фізично значущі для цієї задачі змінні й сталі (*на цьому етапі розв'язування важливішими є Ваші фізична інтуїція і рішучість*).

Період коливань математичного мятника залежатиме, крім параметрів $m$ і $l$, характеристики сили тяжіння – прискорення вільного падіння $g$, також від безрозмірної величини максимального кута відхилення $\alpha$ .

2. Запишімо розмірності вибраних величин (*це можна зробити відразу при виборі фізично значущих змінних) або не робити взагалі – у простих випадках і при деяких навичках*):

$$[T] = T,\ [m] = M,\ [l] = L,\ [g] = LT^{-2} .$$

3. Виразімо величину, яку шукаємо, у вигляді добутку інших розмірних величин, взятих у довільних степенях (*безрозмірні величини запишімо як аргументи деяких функцій. У подальшому в задачах з більшою кількістю параметрів рекомендуємо виписувати всі можливі безрозмірні комбінації*).

$$T = f(\alpha)m^a l^b g^c .$$

4. Підставмо одиниці виміру

$$T = M^a L^b (LT^{-2})^c .$$

5. Порівняймо степені при однакових основних одиницях виміру і розв'яжімо отриману систему рівнянь:

$$\begin{cases} 1 = -2c \\ 0 = a \\ 0 = b + c \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} c = -1/2 \\ a = 0 \\ b = 1/2 \end{cases}$$

6. Підставмо знайдені коефіцієнти (*пам'ятаємо, що ця формула правильна з точністю до безрозмірного множника*).

$$T = f(\alpha)m^0 l^{1/2} g^{-1/2} = f(\alpha)\sqrt{l/g}$$

Як бачимо, період коливань математичного маятника від маси не залежить. Якщо коливання маятника малі – $\alpha \to 0$, тоді період коливань практично не залежить і від конкретного значення кута $\alpha : T = f(0)\sqrt{l/g}$ . Як ми знаємо з аналітичного розв'язку, $f(0) = 2\pi$ . Розкладаючи функцію $f(\alpha)$ у степеневий ряд і враховуючи, що вона повинна бути парною (ліве і праве відхилення від положення рівноваги рівноправні), знаходимо, що перша поправка до періоду малих коливань математичного маятника пропорційна $\alpha^2$ або вищого парного степеня. Часто запитують, як змінюватиметься період маятника, якщо вантажем є скринька, з якої висипається пісок? Відповідь „змінюватися не буде, бо період від маси не залежить" занадто поспішна, щоб бути правильною. Навіть якщо знехтувати різними ефектами, які пов'язані з процесом висипання, і вважати, що отвір не порушує симетрії скриньки, залишається пониження центра ваги піску в скриньці за рахунок його висипання. З цього робимо висновок, що період маятника збільшується внаслідок збільшення деякої ефективної довжини нитки $l$. Навіть якщо припустити, що маятник все ще можна вважати математичним, таке твердження неправильне, бо пониження рівня піску не означає пониження центра ваги і піску, і скриньки разом. Справді, нехай на початку центр ваги скриньки і центр ваги піску збігаються, тоді ця точка буде також центром ваги всієї системи. У процесі висипання піску центр ваги системи зміщується, однак на той момент, коли висипеться остання піщинка, центр ваги повернеться в первинне положення. Тому центр ваги як опускається, так і піднімається.

А тепер скажіть відверто, все ж таки, яка з формул для визначення періоду Вам більше подобається:

$$T = f(\alpha)\sqrt{l/g} \quad \text{чи} \quad T = 2\pi\sqrt{l/g}\ ?$$

Мабуть більшість зупинить свій вибір на

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}\ ,$$

адже за допомогою цієї формули можна одержати конкретні числа, які неважко перевірити. Зрозуміло, що формула $T = f(\alpha)\sqrt{l/g}$ загальніша, але що нам з того, якщо ми не знаємо функції? Річ у тім, що формула $T = f(\alpha)\sqrt{l/g}$ загальніша не тільки тому, що визначає період при великих відхиленнях математичного маятника. Вона визначає період коливань будь-якого тіла, яке має масу і деякий лінійний розмір *l*, тобто описує коливання фізичного маятника. Зауважмо, що в цьому випадку функція $f(\alpha)$ залежатиме від геометричної форми тіла. Тепер уявіть, що у Вашому місті з'явилися оголошення про грандіозне шоу з тоталізатором. Сталевий стовп довжиною 20 м і діаметром 20 см відхиляють на деякий кут. Приймаються ставки. Потім стовп відпускають. Той, хто найточніше вкаже період коливань стовпа, отримає чималий виграш. Якщо Ви думаєте, що, користуючись формулою $T = 2\pi\sqrt{l/g}$, зможете дозволити собі пляшку кока-коли під час літнього відпочинку десь на Багамах, на Вас чекає гірке розчарування. По-перше, кут відхилення може бути великим, по-друге, стовп не є математичним маятником. Користуватися формулою

$$T = 2\pi\sqrt{l/g}$$

ніяк не можна. Та не будемо засмучуватись. Адже в нашому розпорядженні є формула

$$T = f(\alpha)\sqrt{l/g}\ .$$

Візьмімо відрізок двоміліметрової сталевої дротини довжиною $l_0 = 20$ см. Це буде модель стовпа. Якщо немає двоміліметрової дротини, можна взяти будь-яку іншу, навіть не сталеву і не обов'язково дротину. Головне, щоб довжина однорідного циліндра $l_0$ була у 100 разів більшою за його діаметр $d_0$, і тоді модель за формою буде геометрично подібною до свого прототипу. При цьому бажано, щоб і відношення густини циліндра до густини середовища у моделі й у стовпа було однаковим. Відхилімо модель від положення рівноваги на один кут і визначімо період, потім на другий кут, третій … Побудуймо таблицю (чи графік) залежності періоду коливань

$$T_0 = f(\alpha)\sqrt{l_0/g}$$

від кута $\alpha$. Період коливань стовпа *T* відрізнятиметься від $T_0$ при однакових кутах відхилення $\alpha$

у $\dfrac{T}{T_0} = \dfrac{f(\alpha)\sqrt{l/g}}{f(\alpha)\sqrt{l_0/g}} = \sqrt{\dfrac{l}{l_0}}$ разів.

Ось приблизно так, вивчаючи поведінку моделі літака в аеродинамічній трубі чи моделі корабля у басейні, конструктори роблять висновки щодо поведінки справжніх машин у реальних умовах.

***Космічні швидкості***. Ще давні греки знали, чому дорівнює радіус і густина Землі. Безумовно, вони розуміли, що таке швидкість і могли її порівнювати. При певній винахідливості вони могли б випередити Ґалілея і визначити збільшення швидкості тіл при вільному падінні – прискорення вільного падіння. Чи можна з цих величин визначити швидкість штучного супутника Землі? Випишімо розмірності:

$[v] = LT^{-1}$, $[R] = L$, $[\rho] = ML^{-3}$, $[g] = MT^{-2}$.

Спробуймо підійти до аналізу розмірностей неформально. Зважаючи на те, що розмірність маси, за винятком густини, не входить ні до однієї з інших величин, а тому їй ні з чим буде скоротитися, встановлюємо, що густина в кінцеву формулу не ввійде. Це радує, бо греки хоча і могли припускати, що густина Землі загалом більша від густини Землі на поверхні, але кількісно це визначити не змогли б, і тому значення густини було б найменше надійне. Час *T*, що стоїть у знаменникові розмірності швидкості, міститься лише в знаменникові розмірності прискорення, причому у квадраті. Єдина можливість їх зрівняти – це поставити прискорення під знак кореня. Але тоді розмірності довжини будуть рівні тільки в тому випадку, якщо $\sqrt{g}$ помножити на $\sqrt{R}$. Отже, вираз для деякої характерної швидкості, пов'язаної з Землею, буде таким: $v = C\sqrt{gR}$. Для першої космічної швидкості стала $C = 1$, для другої – $C = \sqrt{2}$. Але звідки теорія розмірності „знає", що під $g$ ми розуміли прискорення вільного падіння, а під $R$ радіус Землі? З точки зору розмірностей $g$ – це просто прискорення. Якщо замінити $g$ на $a$ і виразити з отриманої формули, матимемо:

$$a = \frac{1}{C^2}\frac{v^2}{R}\ .$$

Це характерне прискорення при русі тіла зі швидкістю $v$ по колу радіусом $R$. У виразі для доцентрового прискорення $C = 1$. Тоді чому під $R$ ми розуміємо саме радіус, а не просто якусь відстань $S$? Зробімо заміну:

$$S = \frac{1}{C^2}\frac{v^2}{a}\ .$$

Якщо $C = \sqrt{2}$ маємо вираз для шляху, який проходить тіло, рухаючись із стану спокою з прискоренням $a$, де $v$ – кінцева швидкість. Якщо під $v$ розуміти середню швидкість рівноприскореного руху, тоді $C = 1/\sqrt{2}$. Розв'язуючи одну задачу, ми розв'язуємо й декілька інших. Теорія розмірності завжди дає правильну відповідь, але не завжди це відповідь саме на те запитання, яке, як нам здавалося, ми ставили. Розв'яжіть самостійно таку експериментальну задачу:

***Цунамі у ванні.***

*Довжина хвилі цунамі в океані 1 км. Визначіть її швидкість.*

Обладнання: *ванна, вода, годинник чи секундомір, вимірювальна лінійка.*

Звернімо увагу на те, що безрозмірний параметр $C$, який не можна визначити за допомогою теорії розмірності, є ані дуже великим, ані дуже малим і, зазвичай, знаходиться у межах від 0,1 до 10. Головні причини цього такі:

– швидкість світла, заряд електрона, число Авоґадро, інші розмірні сталі, які в цій системі одиниць виміру мають дуже великі або дуже малі чисельні значення, залишаються в символьній формі, а саме – $c$, $e$, $N_A$;

– формулювання фізичних законів, відбиттям яких є розмірні співвідношення, не містять великих або малих чисельних коефіцієнтів – все забирають розмірні сталі;

– при точному розв'язку фізичних задач, при диференціюванні або інтеґруванні здебільшого не виникає занадто великих або малих чисел.

Причина цього – у простоті й гармонії світу, який нас оточує. Чи багато Ви знаєте фізичних законів, у яких показник степеня був би більшим від 10, або меншим від 0,1? Видатний фізик-теоретик, нобелівський лауреат Поль Дірак написав: „Фізичний закон має бути математично вишуканим".

При оцінних розрахунках методом розмірностей вважають, що безрозмірний коефіцієнт дорівнює одиниці. У зв'язку з цим виникає ідея, яку висловив видатний фізик XX сторіччя Альберт Айнштайн 1911 року в праці „Елементарний розгляд теплового руху в твердих тілах". Слід вибрати фізичні величини, між якими підозрюється залежність, і сконструювати з них безрозмірну комбінацію. Якщо остання після підстановки характерних значень вибраних величин виявиться порядку одиниці, можна, не вагаючись, братися за роботу і шукати залежність. Спробуйте й Ви взяти, наприклад, таблицю „Теплові властивості твердих тіл" з будь-якого шкільного збірника задач і поекспериментувати з розмірностями. На Вас чекають приємні несподіванки. А якщо Ви до того ж маєте талант дослідника, то, можливо навіть, і невелике відкриття.

***Швидкість звуку***. Оцінімо швидкість звуку в повітрі, виходячи з теорії розмірності. Швидкість звуку в газі $v$ – це швидкість поширення згущень і розріджень – може залежати від густини повітря $\rho$ і його тиску $P$. При такому виборі величин немає сенсу враховувати залежність швидкості від температури $T$, бо остання визначається через $\rho$ і $P$ з рівняння стану ідеального газу. Справді, щоб скоротити розмірність температури, необхідно ввести універсальну газову сталу $R$, а її введення потребує введення молярної маси для скорочення молей. Ця комбінація $RT/\mu$ має ту саму розмірність, що і $P/\rho$. Зрівнявши $RT/\mu$ і $P/\rho$, отримаємо рівняння стану ідеального газу

$$P = \frac{\rho}{\mu} RT .$$

Припустімо, що швидкість звуку залежить від довжини хвилі $\lambda$ подібно до того, як залежить від довжини хвилі швидкість поширення світла у середовищі. Запишімо розмірності вибраних величин:

$$[v] = LT^{-1}, \qquad [\rho] = ML^{-3},$$

$$[P] = [F/S] = [ma/S] = ML^{-1}T^{-2}, \ [\lambda] = L .$$

Знайдімо вираз для швидкості у вигляді:

$$v = C\rho^a P^b \lambda^c .$$

Підставмо розмірності й зрівняймо степені при однакових одиницях виміру:

$$LT^{-1} = (ML^{-3})^a (ML^{-1}T^{-2})^b L^c .$$

$$\begin{cases} 1 = -3a - b + c \\ -1 = -2b \\ 0 = a + b \end{cases} \qquad \begin{cases} b = 1/2 \\ a = -1/2 \\ c = 0 \end{cases}$$

Звідси $v = C\sqrt{\frac{P}{\rho}}$. При оцінюванні величини швидкості звука вважатимемо, що $C = 1$, атмосферний тиск $P = 10^5$ Па, густина повітря за нормальних умов $\rho = 1{,}3$ кг/м$^3$. Підставивши ці значення у формулу, отримаємо – $v \approx 300$ м/с. Непогана точність. Зазначимо, що $C$ може бути функцією від такого безрозмірного параметра, як кількість степенів свободи молекул газу $i$.

Для рідин або твердих речовин цю формулу використати не можна, бо для них, на відміну від ідеального газу, зміна густини (за сталої температури) не пропорційна зміні зовнішнього тиску. Пружні властивості твердих речовин характеризуються модулем Юнга $E$. Швидкість звуку залежатиме також від густини $\rho$ і абсолютного зміщення $\Delta l$.

***Точковий вибух***. Оцінімо зону суцільних руйнувань під час вибуху атомної бомби, скинутої на Хіросіму (тротиловий еквівалент – 20 кілотони). Перш, ніж розпочати будь-які обчислення, слід з'ясувати, під дією чого відбуваються руйнування? Основною причиною є перепад тиску вибухової хвилі й навколишньої атмосфери. Тому для оцінки зони суцільних руйнувань треба прирівняти характерний тиск вибухової хвилі на відстані $r$ від точки вибуху до атмосферного тиску. Тиск вибухової хвилі $P$, безумовно, залежить від відстані $r$ та енергії вибуху $W$. Також він залежатиме від параметрів середовища, у якому хвиля поширюється. Таким параметром є густина $\rho$, яка одночасно і міра інертності, і міра кількості одиничного об'єму речовини. Оскільки вже через мить після вибуху область, що буде охоплена фронтом вибухової хвилі, значно перевищить розміри вибухового пристрою, а маса втягнутого у рух повітря – його масу, у перелік визначальних фізичних параметрів розміри і масу атомної бомби можна не включати. Випишімо розмірності величин, що використовуються:

$$[P] = M L^{-1} T^{-2}, \quad [r] = L,$$

$$[W] = [mv^2] = M L^2 T^{-2}, \quad [\rho] = ML^{-3} .$$

Запишімо степеневий вираз для $r$:

$$r = CP^a W^b \rho^c .$$

Підставмо розмірності:

$$L = (ML^{-1}T^{-2})^a (ML^2T^{-2})^b (ML^{-3})^c .$$

Порівняймо степені при однакових одиницях виміру і розв'яжімо отриману систему:

$$\begin{cases} 1 = -a + 2b - 3c \\ 0 = -2a - 2b \\ 0 = a + b + c \end{cases} \qquad \begin{cases} a = -1/3 \\ b = 1/3 \\ c = 0 \end{cases}$$

Отже, $r = C\sqrt[3]{\frac{W}{P}}$ і, всупереч очікуванню, від густини не залежить. Щоб оцінити $r$, вважаймо $C = 1$. Підставмо чисельні дані. Атмосферний тиск – $P = 10^5$ Па, енергія вибуху – $W = qm$, де $m = 2 \cdot 10^7$ кг, $q$ – теплота згоряння тротилу. Якщо Ви не пам'ятаєте, чому дорівнює теплота згоряння тротилу та серед Ваших знайомих немає кваліфікованих підривників, а під рукою – відповідного довідника, все одно не відкладайте задачу на потім. Майже в кожному випадку можна досить точно оцінити необхідну величину. Згадаймо якунебудь іншу теплоту згоряння, наприклад, печива або шоколаду – на кожному розфасованому продукті вказана його калорійність (300 – 600 ккал на 100 г). Але ж чи можна порівнювати тротил і печиво? Бомби, як відомо, начиняють тротилом, а не тортами (на жаль), і здається, що теплота згоряння тротилу повинна бути значно більшою. Тут ми припускаємося логічної помилки, адже перша вимога до тротилу – швидкість згоряння, вибух. У той час, як продукти харчування повинні задовольняти зовсім іншому – повільність окислювальних процесів, рівномірний розподіл енерговиділення. З точки зору ефективного функціонування живих істот теплота окислення органічних сполук повинна бути досить високою. Оскільки ми тільки оцінюємо результат, припустімо, що теплота згоряння тротилу

$$q = 100 \text{ ккал/г} \approx 4{,}210^6 \text{ Дж/кг} .$$

Як не дивно, це збігається з точним значенням $q$. Підставмо числові значення:

$$r = C\sqrt[3]{\frac{W}{P}} = \sqrt[3]{\frac{2\cdot10^7\cdot4{,}2\cdot10^6}{10^5}} \approx 10^3 \text{ м} .$$

Наступний етап руху стиснутих шарів повітря буде зворотним у зв'язку з тим, що в центрі утворилась би ділянка пониженого тиску. Захоплені доцентровим рухом до епіцентра уламки і пил будуть викинуті вертикально догори у вигляді гриба.

На третьому етапі Всеукраїнської олімпіади з фізики 1999 – 2000 навчального року для школярів 10-х класів була запропонована задача:

*Відомо, що мінімальна напруженість однорідного електричного поля, яке розриває на дві частини провідну незаряджену тонкостінну сферу, дорівнює $E_0$. Визначіть мінімальну напруженість $E_1$ поля, яке розірве сферу вдвічі більшого радіуса, якщо товщина її стінок залишається незмінною.*

***Розв'язок***. Сфера розірветься, коли механічна напруга досягне свого максимального значення (межі міцності матеріалу сфери). Припустімо, що товщина сферичної оболонки дорівнює $d$. Тоді, враховуючи те, що сфера тонкостінна, маємо площу її екваторіального перерізу:

$$S = 2\pi Rd \quad \text{і} \quad \sigma = \frac{F}{2\pi Rd} .$$

Від чого може залежати сила $F$? По-перше, від напруженості поля $E$, по-друге, від радіусу сфери $R$. Оскільки сфера тонкостінна (а заряди розташовуються біля її поверхні), товщину сфери враховувати не будемо. Звичайно, треба взяти ще електричну сталу $\varepsilon_0$. Здається все. Трохи непокоїть те, що кількість фізичних параметрів, через які буде виражатися $F$: $E, R, \varepsilon_0$, менша за кількість основних одиниць виміру в електростатиці (довжина, час, маса і заряд), тобто кількість рівнянь буде на одиницю більшою, ніж кількість невідомих. Застосуймо теорію розмірності і переконаймося, що ніяких суперечностей не виникає:

$$F = C\varepsilon_0 E^2 R^2 ,$$

де $C$ – безрозмірна стала. Отже,

$$\sigma = C\frac{\varepsilon_0 E^2 R}{2\pi d} .$$

Механічні напруження в обох випадках будуть однакові, тому порівнюючи їх і скорочуючи сталі, отримаємо:

$$E_1 = E_0\sqrt{\frac{R_0}{R_1}\frac{d_1}{d_2}} .$$

За умовою $R_1 = 2R_0$, $d_1 = d_0$. Отже, $E_1 = E_0/\sqrt{2}$ .

На жаль, задача така, що для її розв'язку методом розмірностей не пригодилися знання ні про електризацію, ні про відсутність електричного поля всередині провідника. Її можна розв'язати, зовсім не розуміючи фізичної природи явища. Що ж, коли маєш справу з теорією розмірності, бува й таке. І все ж таки, трохи фізики. Оцінімо напруженість електричного поля, яке розриває сталеву сферу:

$$E \approx \sqrt{\frac{2\pi\sigma d}{\varepsilon_0 R}} \approx 2\cdot10^{10}\sqrt{\frac{d}{R}} \quad \text{В/м} .$$

Навіть якщо $d/R = 1/500$ (наприклад, сфера метрового діаметра при товщині стінок 1 мм) матимемо значення напруженості $E \approx 10^9$ В/м . Воно лише на порядок менше за напруженость електричного поля в атомі $\approx 10^{10}$ В/м і перевищує електричну міцність навіть твердих діелектриків. Електричний пробій повітря при нормальних умовах настає при $E \approx 3\cdot10^6$ В/м .

Спробуйте самостійно розв'язати подібну задачу.

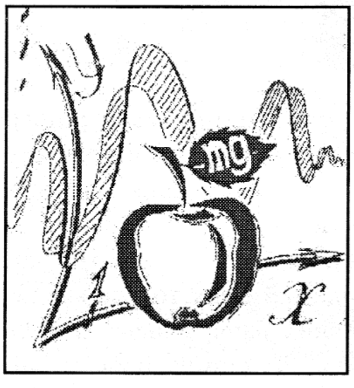
***Дві кулі***. *Суцільна сталева куля діаметром $D_0$, яку помістили у повітрі в однорідне електричне поле напруженістю $E_0$, трохи деформувалася. Її* *довжина вздовж ліній напруженості збільшилась на $\Delta D_0$. Визначіть аналогічне збільшення розмірів мідної кулі удвічі більшого радіуса, яку помістили в таке ж поле. Оцініть відносні видовження куль в обох випадках.*

Якщо кількість фізичних величин, які визначають задачу, перевищує кількість основних одиниць виміру більш, ніж на одиницю $N - K > 1$, теорія розмірності не дає однозначної відповіді. У зв'язку з цим Хантлі розвинув (і реалізував на великій кількості прикладів) ідею Вільямса про збільшення кількості основних одиниць за рахунок „розкладу" розмірності довжини за трьома перпендикулярними напрямками. Нові розмірності $L_x$, $L_y$, $L_z$ він назвав векторними одиницями довжини, на відміну від скалярної – $L$. Можливо, точніше було б назвати $L_x$, $L_y$, $L_z$ координатними одиницями довжини, на відміну від модуля векторної $L$. Оскільки при застосуванні теорії розмірності до тензорних величин аналогічна ідея теж правомірна, тому найдоцільнішим, на нашу думку, є вираз: „компонентні розмірності". Причиною того, що „розщеплення" одиниці довжини на координатні складові виявилось ефективним при розв'язанні багатьох задач, є анізотропія умов цих задач. Простір, однорідний та ізотропний в космологічних масштабах, має зовсім інші властивості в конкретних випадках. Наявність електричного поля або поля тяжіння, упорядкованого руху частинок зумовлює певний напрям, уздовж якого проекції законів руху мають інший вигляд, ніж такі ж проекції у поперечному напрямку.

Можливо хтось захоче самостійно розробляти компонентну теорію розмірності. Тим паче, що вона ще остаточно не завершена, приблизно як механіка за часів Ґалілея. Що ж – на нього чекатиме непроста, але цікава подорож. Деякі безрозмірні величини стануть розмірними, а величини, що мали однакову розмірність, перестануть родичатися. Довільні функції загублять свободу, а розпливчасті відповіді знайдуть чітку форму.

З іншого боку, не слід перебільшувати значення теорії розмірності, вона ніколи не замінить точних обчислень, але, можливо, вкаже на найкоротшу дорогу до них, допоможе краще зрозуміти природу явищ, розвине фізичну інтуїцію.

Автор статті використав теорію розмірності, щоб поговорити про фізику, а фізика – це найвища форма спілкування з природою, частинками якої є і ми з вами.




# Всеукраїнська студентська наукова конференція з фізики

*15-17 травня 2000 року у м. Львові вже вчетверте відбулася студентська наукова конференція з фізики. Офіційний статус Всеукраїнської конференція набула вперше. Організаторами конференції були – Студентське товариство ЛНУ імені Івана Франка, Студентське братство ДУ „Львівська політехніка", Фізичний факультет ЛНУ імені Івана Франка.*

*Учасників конференції привітав декан фізичного факультету ЛНУ імені Івана Франка, професор Йосип Стахіра. Ректор університету, професор Іван Вакарчук прочитав лекцію „Що таке квантова телепортація?", яка буде опублікована в наступних числах журналу „Світ фізики".*

*У конференції взяли участь студенти з багатьох вищих навчальних закладів України з Дніпропетровська, Донецька, Дрогобича, Львова, Одеси, Рівного, Чернівців, Ужгорода. Це свідчить про зацікавленість українського студентства до неї. Робота конференції проходила у чотирьох секціях: оптика, радіофізика, теоретична фізика та астрофізика, фізика твердого тіла.*

*Кращі студентські роботи відзначені дипломами – це Ольга Балтрук (Університет „Львівська політехніка"), Юрій Еліяшевський, Тарас Костюк, Сергій Поплавський, Андрій Невідомський (Львівський національний університет імені Івана Франка), Владислав Іванов (Одеський державний університет імені І. Мечнікова), Ольга Білецька (Дніпропетровський державний університет), Володимир Кругляк (Донецький державний університет), Ярослава Прокопивнюк (Рівненський державний гуманітарний університет), Олексій Татарин (Львівський фізико-математичний ліцей).*

*Редакція журналу „Світ фізики" подарувала кожному учасникові конференції журнал, а за кращі роботи – річну передплату видання на 2000 рік.*

*Наступного року організатори планують провести Міжнародну студентську наукову конференцію з фізики.*

# ПРОФЕСОР САВИЦЬКИЙ

19 травня 2000 року виповнилося 70 років від дня народження відомого фізика, лауреата Державної премії України в галузі науки і техніки, академіка Академії вищої школи України та Академії зв'язку України, доктора фізико-математичних наук, професора Вадима Григоровича Савицького.

Основна частина яскравої та багатогранної наукової діяльності В. Савицького пов'язана з Львівським університетом імені Івана Франка. Він пройшов шлях від студента фізико-математичного факультету до авторитетного вченого в галузі напівпровідникового матеріалознавства.

Вадим Григорович Савицький народився в містечку Дубровиця Рівненської області (в тодішній Польщі) у сім'ї Григорія та Ольги Савицьких. Навчання розпочав з семи років у польській школі, а після 1939 року – в українській (м. Рівне). 1940 року сім'я Савицьких переїжджає в село Висоцьк Рівненської області, а під час війни (1941) знову повертається в Дубровицю. Під час окупації з великими перервами продовжував навчання у школі. Бажання вчитися було у хлопця великим, навіть під час війни він розшукував книги і багато читав. 1946 року отримав атестат про закінчення семирічної школи.

1946 року батька Вадима, Григорія Трохимовича, за доносом ув'язнили на 20 років, де він і помер. Лише 1994 року, коли відкрили архіви, сім'я довідалась, що він помер 17 травня 1950 року в м. Чусовому, Пермської області. Того ж року Вадим переїхав до Львова (до старшого брата) і вступив на навчання у будівельний технікум. Він швидко зрозумів, що помилився у виборі професії, оскільки йому дуже подобалась фізика. Після першого семестру хлопець залишив технікум і почав готуватися до здачі екзаменів за десятирічку. Одержавши атестат про закінчення середньої школи, 1947 року В. Савицький вступив на перший курс фізико-математичного факультету Львівського державного університету імені Івана Франка. Під час навчання в університеті він продемонстрував неабиякий потяг до знань, здібність до наукової роботи. Його науковим керівником був відомий фізик, тоді ще кандидат фізико-математичних наук, доцент Василь Степанович Міліянчук. Дипломну роботу „До питання про зміщення термів водню" В.Савицький захистив 1952 року.

Після закінчення університету В. Савицького скерували на роботу в науково-дослідний інститут нафтового машинобудування (м. Ангарськ, Росія), де розпочався перший період його активної наукової праці.

День 1-го серпня 1952 року Вадим Савицький завжди згадував як день, коли почалась його трудова діяльність. Цього дня він під проливним дощем на відкритій вантажній машині із в'язанкою книг приїхав з Іркутська в Ангарськ. Пізніше до нього приїхала мати, яка все своє життя прожила разом з ним.

У Ангарську молодий учений провів низку важливих досліджень, присвячених фізичним та технічним проблемам руйнування металів при низьких температурах. Він детально вивчив механічні властивості сталі при низьких температурах та проаналізував механізми низькотемпературного руйнування металів. Результати цих робіт підсумовані в кандидатській дисертації, яку В. Савицький захистив 1962 року в м.Томську, а також у монографії „Низкотемпературная хрупкость стали и деталей машин" (М., Машиностроение, 1969), яку написав у співавторстві з К. Поповим. Пізніше Вадим Григорович з великою теплотою згадував роки в Ангарську та людей, з якими там звела його доля.

Повернувшись 1964 року до Львівського університету імені Івана Франка, В. Савицький започатковує важливий цикл фізико-технологічних досліджень монокристалів окисних сполук, що володіють різного типу фазовими переходами, зокрема переходами напівпровідник-метал. Його праці з поляронного механізму провідності в окисних монокристалах покладено в основу ориґінальних розробок електронних пристроїв з від'ємним диференційним опором. У цей період учений впровадив перспективний метод високочастотного плазмового розпилення для одержання плівок ZnO як матеріалу для гіперзвукових акустичних перетворювачів, а також нового сегнетоелектрика барій-стронцій-ніобат і деяких нелінійних оптичних матеріалів, зокрема, гадолінієвих гранатів.

На початку 1970-х років у сферу основних наукових інтересів В.Савицького увійшли вузькозонні напівпровідники. Він здійснив ґрунтовні дослідження фізичних властивостей вузькощілинних тонкоплівкових напівпровідників на основі сполук $A_2B_6$, розробив фізико-технологічні основи епітаксійного росту цих матеріалів та створення приймачів інфрачервоного (ІЧ) випромінювання на їхній основі. Запропонований ученим двозонний метод ізотермічного епітаксійного вирощування напівпровідникових шарів CdHgTe дав змогу подолати чимало технологічних труднощів, зумовлених контролем тиску ртуті в зоні росту та дав можливість отримувати високоякісні епітаксійні структури. Незважаючи на розробки ряду нових методик епітаксії, що зумовили значний проґрес в епітаксійній технології CdHgTe, метод, який запропонував В.Савицький, завдяки своїй простоті та відтворювальності результатів використовується й до нині для створення досконалих матеріалів для ІЧ приймачів. У цей період під науковим керівництвом В. Савицького розробили ориґінальний метод отримання шарів CdHgTe за допомогою високочастотного (ВЧ) розпилення в ртутній плазмі. Комплекс технологічних робіт, присвячений широкому класу напівпровідників типу $A_2B_6$, поєднувався з експериментальними дослідженнями структурних, гальваномагнетних, оптичних та фотоелектричних властивостей. За результатами цих досліджень В.Савицький 1982 року захистив докторську дисертацію, а 1986 року за цикл фундаментальних та прикладних досліджень вузькощілинних напівпровідників став лауреатом Державної премії України в галузі науки і техніки.

У 1990-х роках професор Вадим Савицький очолював Інститут прикладної фізики, де основним напрямом його наукової діяльності була насамперед розробка детекторів ІЧ випромінювання для систем теплобачення та термографії. Ці дослідження проводились згідно з програмою Міносвіти України, науковим керівником якої він був, і спрямовувались на розробку фізико-технологічних основ промислового виробництва ІЧ

*Зустріч українських учених з представниками національного космічного аґентства (НАСА). 1994. Вашінґтон, США* детекторів. Це вимагало налагодження співпраці з багатьма організаціями, і вчений був координатором сумісних робіт.

1994 року В.Савицький разом з делегацією українських учених був запрошений до США.

Незважаючи на значну адміністративну зайнятість, професор В. Савицький був ініціатором важливих досліджень вузькощілинних напівпровідників, спрямованих на з'ясування механізмів росту епітаксійних шарів та модифікації їх властивостей під дією лазерного та йонізуючого випромінювання, при швидких термічних відпалах. Велике значення вчений приділяв впровадженню нових методів експериментального дослідження напівпровідників, зокрема методу скануючої тунельної спектроскопії. Під керівництвом професора В. Савицького розпочались роботи з теоретичного моделювання фізичних процесів у варізонних структурах: теоретично передбачили явища антистоксівського випромінювання у варізонних напівпровідниках в умовах магнетоконцентраційного ефекту; струмової нестійкості $N$-типу у варізонних структурах у схрещених електричних та магнетних полях; ефекти розподіленої інжекції та екстракції у напівпровідниках з просторово неоднорідною зонною структурою.

У науковому доробку вченого понад 300 праць, серед яких: 2 монографії та 23 авторські свідоцтва на винаходи. Під його керівництвом захищено 18 кандидатських та одну докторську дисертації.

Не лише науковою роботою жив Вадим Савицький, багато хто знав його як завзятого мисливця і рибалку. Він щиро любив край свого дитинства – Полісся, де мав багато друзів і куди часто їздив полювати, рибалити та збирати гриби.

Професор В.Савицький проводив велику навчально-педагогічну та науково-організаційну роботу, був чудовим лектором. Він був заступником голови експертної ради з фізики Міносвіти України, членом секції фізики Комітету з Державних премій України в галузі науки і техніки, членом експертної ради ВАК України, членом редколегій „Українського фізичного журналу", журналів „Фізична електроніка" та „Фізика напівпровідників, квантова та оптоелектроніка". Він ініціював та організовував проведення багатьох наукових

*Вадим Савицький на полюванні*

конференцій з фізики та технології напівпровідникових матеріалів. Професор В. Савицький був членом Українського та Американського фізичних товариств, членом Европейського радіофізичного товариства. Кембріджський бібліографічний центр визнав Вадима Савицького „людиною 1997 року", його ім'я внесено до бібліографічного довідника „Хто є хто в світі". 1998 року професорові В. Савицькому як одному з найавторитетніших учених присуджено ґрант Міжнародного наукового фонду.

Вадим Савицький був одним з ініціаторів щорічних українсько-польських семінарів з фізики і хімії твердого тіла, які проводились з 1996 року.

Несподівана смерть 18 грудня 1998 року обірвала життя проф. В. Савицького в розквіті його творчих сил та задумів.

З 31 травня до 4 червня 2000 року в Любіні Великому відбувся науковий семінар за участю українських та польських учених, присвячений пам'яті Вадима Савицького.

*Час повертає нам тих, кого ми втратили, через мудрість і спогади ...*

**Йосип СТАХІРА,**
*професор,*
*д-р фіз.-мат. наук*

# У XXI СТОРІЧЧЯ: З ГОРОСКОПАМИ ЧИ ТЕЛЕСКОПАМИ?

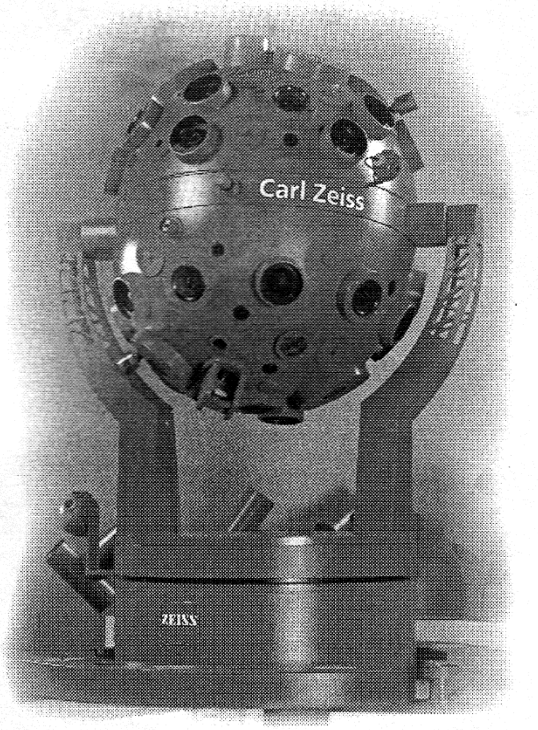
**Богдан Новосядлий**

Старший науковий співробітник
Астрономічної обсерваторії ЛНУ ім. Івана Франка,
кандидат фізико-математичних наук

На зламі тисячоліть ми часто озираємось у минуле, щоб зрозуміти своє місце у світі сьогодні, відчути ходу століть, щоб думками торкнутись майбутнього. Які злети чи потрясіння чекають на народження ще ненароджених внуків і правнуків наших? Чи не є ми творцями сьогодні їхньої долі у наступаючому тисячолітті? XX сторіччя, яке минає, круто змінило хід розвитку і характер нашої цивілізації. Вона стала цивілізацією планетарного масштабу за засобами зв'язку, пересування і техногенного тиску на природу. XX сторіччя ввібрало всі злети думки попередніх поколінь, і піднесло її до небачених висот. Зусиллями всього двох поколінь учених Людина заглянула в атом і ступила на Місяць, створила нові матеріали, яких не було в природі, і зрозуміла як повторити живі істоти, які були. І в цій ході сторічь до комп'ютера, Інтернету і космічних телескопів є вклад і громадян України.

Перший університет на території України заснували у Львові ще 1661 року, а сьогодні маємо їх декілька десятків, академій та інших вищих навчальних закладів. Бурхливий розвиток фундаметальних та прикладних наук у XX сторіччі привів до створення багатьох науково-дослідних закладів Академії наук та галузевих міністерств. А це численна кількість кандидатів та докторів наук з різних галузей знань. Здавалось би, така кількість вчених, університетів, інших навчальних закладів та науково-дослідних інститутів мала б впливати на зростання загальноосвітнього рівня громадян, сприяти популяризації знань та їхньому відображенню в суспільній свідомості. Якщо до цього додати засоби масової інформації – десятки телевізійних каналів та сотні друкованих видань, то так би і мало бути. А що ж ми маємо насправді?

Дзеркалом реальної картини може бути теле- та радіоефір, книжкові полиці та масові періодичні видання. У кожній газеті можна знайти гороскоп чи астрологічний прогноз. Хто не має часу читати, може почути їх декілька разів на день з різних каналів телебачення і радіо, у тому числі і з державних. Лише зрідка з'являються новини науки, і то дуже лаконічно, – щоб читач, слухач чи глядач не знудився, і, не дай Боже, не перемкнув на інший канал, бо ще ж реклама. Наприклад, на інформацію про таке цікаве і видовищне явище, як метеорна злива Леоніди, яке спостерігав увесь світ Львівське радіо виділило аж три хвилини. Інші канали ще менше. Або замість того, щоб показати людям комп'ютерну модель параду планет (3 травня 2000 року), яка б наочно продемонструвала це рідкісне величне явище, всі канали телебачення показали нам астролога Глобу з його фантазіями на задану тему – планети кажуть, що нам скоро буде краще. На це ефірного часу і місця в газетах не шкода. Але може так і треба? Тоді з'ясуймо, що таке астрологія і чи так вона вже нам потрібна?




*Проектор зоряного неба для планетарію „Starmaster" фірми Карл Цейс Йена*

## Гороскопи з погляду кінця XX століття

Гороскопи прийшли до нас з часів, коли в людській уяві Земля була центром світу, а небо населяли боги, які пильно стежили за кожною людиною і визначали її майбутню долю у момент появи на світ. (Правда, деякі сучасні астрологи пішли вперед і стверджують, що визначальним є момент зачаття, а не народження людини. Ось так! Отож не дивуйтесь, якщо ваш гороскоп складений за датою вашого народження не справджується). А волю богів начебто можна було розгадати за тим, в якому сузір'ї знаходиться Сонце в цей момент. Складніші астрологічні системи враховували ще й розташування Місяця та планет.

**Що каже про це Церква?**

Вдумлива людина вже в самій можливості передбачати волю Всевишнього побачить суперечність вченню Христа, а віруюча – перехреститься і відвернеться. Бо ж сказано: шляхи Господні незбагненні. Тому Церква вважала і вважає астрологію породженням диявола, справою не гідною християнина.

**А що каже про це наука?**

Ані Земля, ані наше Сонце, ані навіть наша Галактика не є центром світу. Сонце справді визначає долю Землі й усього живого, що на ній є, бо є єдиним джерелом енергії для них. Зорі, які складають сузір'я, за своєю природою такі ж як і наше світило, але знаходяться на величезних відстанях від нас і ніякого впливу не те, що на нас, але й на Землю, Сонце і Сонячну систему не мають. Світло зір, які ми бачимо на небі, випромінене ними задовго до нашого з вами народження, чи навіть до появи перших живих істот на Землі. Земля обертається навколо Сонця майже по коловій орбіті, нахиленій до площини екватора під кутом приблизно 23°. Сонце при цьому проєктується на деякі сузір'я й упродовж року проходить через

12 з них (тепер уже 13), які називають зодіакальними. Усіх сузір'їв на небі 88. Об'єднання зір у сузір'я умовне, і покликане спростити нашу орієнтацію на небі. Вигляд зоряного неба визначений взаємним розташуванням зір нашої зоряної системи – Галактики, і змінюється з часом, бо всі вони перебувають у неперервному русі. Але помітні зміни в обрисах сузір'їв можна бачити лише зіставляючи карти неба через сотні і тисячі років.

Зорі одного сузір'я єднає тільки їх кутова близькість у проєкції на небесну сферу з положення Землі, хоча у просторі вони знаходяться далеко одна від одної і ніякої єдиної системи не творять. А отже, для припущення про їхній якийнебудь вплив на долю землян за проєкцією Сонця, Місяця чи планет на них не має ні логічних, ні фізичних арґументів. Звідси випливає, що астрологія і система гороскопів не мають під собою ніякого підґрунтя.

Чому ж так вперто вони проростають всупереч здоровому глузду? Відповідь проста і очевидна. У майбутнє, близьке і далеке, неможливо підглянути, щоб зробити правильний крок сьогодні. А так хочеться ... Людина рухається в часі, немов на межі світла й тіні, тому виникає непереборне бажання посвітити вперед, для впевненості чим небудь: ворожінням на руці, на картах чи на кавовій гущі. Але на це купуються в наш час одиниці. А от на зорях ... це виглядає солідніше. Королі колись мали своїх астрологів! Газети щодня пишуть! З екрану телевізорів пророкують. Знайома живе за гороскопом: все що напишуть – так ніби про неї. Що справдилося – запам'ятали, що ні – викинули і забули. Отак і тримається міф. А суть та ж, що і в ворожінні на кавовій гущі: вміння ворожбита формулювати передбачення настільки загально, щоб кожен міг щось на себе приміряти. Тому з погляду кінця XX сторіччя можемо сказати, що науці відомі три рівні брехні:

просто брехня, велика брехня і гороскопи.

Вернімося до попередньої теми про рівень освіченості наших громадян на межі тисячоліть.

Іншим критерієм освіченості може бути попит на науково-популярні видання. В Україні вже декілька років видаються науково-популярні журнали („Пульсар", „Наше Небо", „Світ фізики", „Світ науки"), покликані донести до людей наукові відкриття і досягнення останніх років, повернути науці належне їй місце у свідомості її громадян, щоб не відколотись, як крижина, від Европи й усього цивілізованого світу. Але спробуйте купити їх у кіосках, або знайти в бібліотеках. Боюсь, що вам не вистачить настирливості задовольнити потребу розуму і серця. Для кіосків вони „не ходовий товар", а бібліотеки не мають коштів на їх придбання. Меценатство ж, чи доброчинні пожертви на освіту, науку і культуру – явища не нашого суспільства. На жаль. От і виросло в Україні вже ціле покоління школярів, які не бачили науково-популярних журналів. Їх не має і вчитель, який міг би підтримувати свій науково-освітній рівень і розвивати допитливість в учнів. Якщо не виробити потребу в такій літературі у шкільному віці, то вона не з'явиться сама собою і пізніше.

Проте найпоказовішим є світоглядний рівень студентів у галузі природничих знань, будови Всесвіту та місця людини в ньому. Мова звичайно йде про середній рівень, який неупинно падає і наближається до критичної межі. Маємо вже випадки, коли студенти (вже не можна сказати деякі, на жаль, бо їх кількість вже аж надто велика) природничих факультетів не можуть пояснити природу зміни дня і ночі, причини припливів-відпливів, а дехто навіть вважає, що Сонце обертається навколо Землі. Тобто за своїми уявленнями вони знаходяться в докоперниківській епосі! Відповіді величезної кількості студентів природничих факультетів варті того, щоб їх видати окремою книжкою з красномовною назвою „Страшне перо не в гусака ... а в студента", або „Навмисно не придумаєш". Очевидно, це прямий наслідок вилучення астрономії як окремого предмета з програми середньої школи, скорочення програми з фізики, вилучення її зі списку обов'язкових випускних та вступних іспитів. Студентам фізичного, географічного, геологічного та філософського факультетів Львівського національного університету імені Івана Франка поталанило, вони ще мають шанс виправити прогалини шкільної програми на студентській лаві: рішенням учених рад цих факультетів астрофізику внесено до навчальної програми, як в усіх університетах такого рівня. Але більшість випускників шкіл і вищих навчальних закладів України залишається без базових знань про світ, в якому ми живемо. А вони ж будуть провідниками нашого народу і держави у наступному сторіччі, коли представники інших націй вже сьогодні готуються ступити на Марс у 2008-му році.

Отже, підсумок сумний: уявлення про Землю, космос і Всесвіт, як серед школярів, студентів, так і пересічних громадян загалом не відповідають вимогам часу і статусу України як космічної держави. Відставання суспільної свідомості від сучасних наукових уявлень про світ небезпечне своїми наслідками: падінням наукового та економічного потенціалу держави, можливістю залишитись на узбіччі цивілізації, зростанням апатії та окультизму серед громадян. І чи не призведе це до того, що ми станемо, як у фільмі „Заморожений" – реліктами минулих епох у потягу XXI сторіччя, на який ми не встигли.

Зарадити цьому можна тільки негайними і комлексними заходами: удосконалити шкільні програми з природничих наук, запровадити курс загальної астрофізики на всіх факультетах університетів, видавати науково-популярні видання різного рівня, створити такі осередки популяризації науки, як планетарії. У розвинутих країнах вони є чи не у всіх наукових центрах. За допомогою сучасних демонстраційних технічних засобів та програм планетарій може ефективно сприяти зростанню освіченості наших громадян з комплексу природничих знань, бути центром залучення шкільної молоді до знань про Всесвіт, до творчості на космічну тематику. Планетарій покликаний зближати людину з космосом, показувати її місце в ньому, знайомити з останніми досягненнями науки про Землю і Всесвіт. Очевидно, знати про те, що в нас над головою має право кожна людина.

На зламі тисячоліть, напередодні першої висадки людини на Марс нарешті заплановано створити такий центр у Львові. Метою проєкту є створити науково-просвітницький центр "Планетарій", який включатиме лекційно-демостраційний зал – зоряний театр, музей астрономії та космонавтики, астрономічно-космічний атракціон, а також конференцзали з відповідною інфраструктурою для проведення міжнародних конференцій та науково-технічних виставок. За його допомогою можна задовольнити зацікавленість космосом усіх допитливих, будь-якого віку та освіти. І не тільки космосом. Це буде центр популяризації знань з різних галузей природознавства, адже сучасні космічні дослідження включають всі знання людства – від елементарної частинки та клітини до позаземних цивілізацій і Всесвіту як цілого.

Як це зробити і за які гроші? У світі сучасні планетарії є цілком самоокупними, навіть прибутковими. За досить консервативними оцінками сучасний планетарій разом з центром для проведення конференцій міг би окупити себе за 3-4 роки. Для початку можна скористатися обладнанням, яке може надати для тимчасового користування Київський планетарій. Астрономічна обсерваторія Львівського національного університету імені Івана Франка готова подарувати такому планетарію професійний телескоп АВР-2. Впевнений, що знайдуться люди, які захочуть вкласти гроші у таку справу. Цікаво, що у світі музеї природи та космосу (обов'язково з планетарієм) є чи не в кожному більш-менш науково розвинутому місті. Тамтешні меценати не шкодують астрономічних сум на створення потужних телескопів, які часто називають їхніми іменами, проведення фундаментальних досліджень у різних галузях знань, створення музеїв та заповідників. Наприклад, американець У. Кек пожертвував 130 млн. дол. на конструювання і побудову двох найбільших телескопів діаметром 10 м. Телескопи Кек1 і Кек2 встановлені на горі Мауна-Кеа Гавайського архіпелагу і діють з 1996 року.

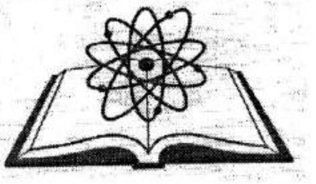
Львів, як перлина европейської архітектури минулих сторіч, ще не здивував нікого шедевром сучасної архітектурної думки. Будівля планетарію – дуже вдячна тема для зодчих. Львів заслуговує на те, щоб такий планетарій став пам'яткою архітектури XXI сторіччя.

**БОГДАН НОВОСЯДЛИЙ**

***старший науковий співробітник астрономічної обсерваторії Львівського національного університету імені Івана Франка.***

***Коло наукових інтересів – проблема походження галактик, їх скупчень, квазарів та великомасштабної структури Всесвіту, фізичні процеси, пов'язані з формуванням анізотропії температури реліктового випромінювання, фізика раннього Всесвіту. Є членом Міжнародної астрономічної спілки, Европейського астрономічного товариства, Української астрономічної асоціації, Наукового товариства ім. Шевченка. Співпрацює з ученими Росії, Італії, Німеччини, Швайцарії.***

***Велику увагу приділяє українській молоді – керує науковими роботами студентів та учнів, членів Малої академії наук, активно популяризує українську науку.***



## *V Всеукраїнська наукова конференція „Фундаментальна та професійна підготовка фахівців з фізики”*

***7-8 червня 2000 року в м. Києві проходила V Всеукраїнська наукова конференція „Фундаментальна та професійна підготовка фахівців з фізики", присвячена 80-й річниці Національного педагогічного університету імені М.Драгоманова. На конференції розглядалися актуальні питання професійної підготовки фахівців з фізики та проблеми удосконалення навчання фізики в умовах ступеневої освіти. В роботі взяли участь як освітяни, так і науковці вищих навчальних закладів України. Конференція проходила у творчій атмосфері, виступи та дискусії були конструктивними, що свідчить про актуальність і гостроту піднятих проблем. Велика заслуга у цьому співголів конференції – доктора фізико-математичних наук, професора, чл.-кор. АПН України М.І.Шута та кандидата фізико-математичних наук, доцента Г.П.Грищенка. Учасники конференції зустрілись з редактором журналу „Світ фізики” Г.М.Шопою, на сторінках якого постійно аналізуються актуальні проблеми викладання фізики у вищих та середніх навчальних закладах України.***

*100 років від дня народження*

помилка і зауважив, що пасажири відчуватимуть невагомість відразу ж після того, як корабель вийде за межі земної атмосфери. Пізніше, коли він уже сформувався як учений, фізична інтуїція не полишала його. Завдяки їй він зробив більшість своїх відкритів.

1918 року Паулі вступив до Мюнхенського університету, де вивчав фізику під керівництвом відомого ученого Арнольда Зоммерфельда. Там, вивчаючи будову атома, він вперше ознайомився з постулатами Бора. Як і для більшості фізиків, що сформувались на засадах класичної фізики, квантова теорія Бора викликала у молодого Паулі подив і потрясіння. Згодом, працюючи над розвитком саме цієї теорії, Паулі здобув загальне визнання як учений.

У цей час німецький математик Фелікс Кляйн видавав математичну енциклопедію. Він запропонував Зоммерфельдові написати огляд загальної та спеціальної теорії відносності Айнштайна, а той попросив написати цю статтю 20-річного Паулі. Вольфґанґ швидко написав статтю, обсягом 250 сторінок, яку Зоммерфельд та сам Айнштайн відзначили як професійну.

# ВОЛЬФҐАНҐ ПАУЛІ

Вольфґанґ Ернст Паулі народився 25 квітня 1900 року в Відні. Його батько Вольфґанґ Йозеф Паулі був відомим фізиком та біохіміком, професором колоїдної хімії у Віденському університеті. Його мати Берта Паулі була письменницею. Вона спілкувалася з театральними та журналістськими колами Австрії. Відомий фізик та філософ Ернст Мах був його хрещеним батьком. Навчаючись у середній школі, Паулі виявив математичні здібності. Однак заняття в школі він вважав нецікавими, тому захопився самостійним вивченням вищої математики.

Уже в школі, у Відні, В.Паулі отримав ґрунтовні знання класичної фізики й ознайомився з новою на той час теорією відносності Айнштайна. Його вроджена фізична інтуїція виявилась досить рано. Ще у шкільні роки він читав сестрі Герді романи Жуля Верна. В одному з них „Із гармати на Місяць" він прочитав, що пасажири відчуватимуть невагомість у момент, коли досягнуть точки, в якій притягання до Місяця точно дорівнюватиме притяганню до Землі. Вольфґанґ одразу ж зрозумів, що це суттєва фізична

1921 року Паулі захистив докторську дисертацію з теорії молекули водню і переїхав до Ґеттінґену, де зайнявся науковими дослідженнями разом з Максом Борном та Джеймсом Франком.

1922 року Паулі зустрівся з Нільсом Бором, коли той читав лекції в Ґеттінґенському університеті. У цей час учений готував до видання своєї праці німецькою мовою і йому був потрібний фахівець, який добре володів німецькою мовою. Він запросив для цієї роботи Паулі. Наприкінці 1922 року Паулі почав працювати асистентом Нільса Бора в Копенгазі.

Під впливом Зоммерфельда, Борна, Франка та Бора в Паулі зростала зацікавленість до нової галузі фізики – квантової теорії, що займалась вивченням атома і субатомних частинок. І Паулі зосередився на проблемах, що постали перед фізиками у цій галузі. У цей час ще до кінця не були зрозумілі межі застосування принципів класичної фізики і деякі учені явища мікросвіту намагались зрозуміти за допомогою законів класичної фізики. Особливо складною (сумнівною) видавалась планетарна модель атома, згідно з якою електрони рухались по замкнутих орбітах навколо позитивно зарядженого ядра атома. За принципами класичної фізики, електрони, що рухаються з прискоренням (рух по криволінійній траєкторії неможливий без доцентрового прискорення) повинні неперервно випромінювати електромагнетні хвилі, втрачаючи при цьому енергію, і наближатись по спіралі до ядра.

1913 року Бор висунув гіпотезу, що електрони в атомі знаходяться на дозволених орбітах і не випромінюють електромагнетні хвилі; всі проміжні орбіти заборонені. Електрон може випромінювати або поглинати світло, здійснивши квантовий перехід з однієї дозволеної орбіти на іншу. Атомна модель Бора в загальних рисах правильно пояснювала атомні спектри: кожна лінія в атомних спектрах є випромінюванням, що виникає при переході електрона з вищої дозволеної орбіти на нижчу. Ця модель передбачила основні спектроскопічні характеристики найпростішого атомного спектра – спектра водню.

Але були відомі й суттєві недоліки моделі Бора, які привернули наукові інтереси Паулі до цієї галузі фізики й згодом дозволили зробити свій внесок у створення квантової теорії. По-перше, модель Бора не могла пояснити деякі тонкі деталі в спектрі водню. Наприклад, коли атомний газ знаходився в магнетному полі, відбувалось розщеплення деяких спектральних ліній на декілька близько розміщених (явище вперше помітив Пітер Зееман). По-друге, за допомогою цієї моделі не вдавалось пояснити спектри складніших атомів. Важливішим було те, що стійкість електронних орбіт не знаходила свого вичерпного пояснення. Зрозуміло, що згідно з гіпотезою Бора, електрони не можуть неперервно випромінювати електромагнетні хвилі, однак ніщо їм не забороняє спускатись стрибками, переходячи з однієї дозволеної орбіти на іншу і врешті зібратись на найнижчому енергетичному рівні. Ці „білі плями" в атомній теорії ще чекали свого пояснення.

1925 року Паулі став асистент-професором теоретичної фізики Гамбурзького університету. Тут він займався атомною фізикою, розробляв теорію ефекту Зеемана та інших видів спектрального розщеплення. Він передбачив, що електрони володіють деякою властивістю, яку пізніше Семуель Ґаудсміт і Джордж Уленбек назвали спіном. У магнетному полі спін електрона має дві можливі орієнтації: спін може бути спрямований в той же бік, або в протилежний. Орбітальний рух електрона в атомі визначає ще одну вісь, яка орієнтується по-різному залежно від прикладеного зовнішнього поля. Різні можливі комбінації спінової та орбітальної орієнтації мало відрізняються енергіями, що приводить до збільшення кількості атомних енергетичних станів. Переходи електронів з кожного із цих підрівнів на іншу орбіту і пояснює тонке розщеплення спектральних ліній. Згодом, як Паулі ввів властивість „двозначності" електрона, він пояснив, чому всі електрони в атомі не займають найнижчий енергетичний рівень. У доповненій ним моделі Бора допустимі енергетичні стани описуються 4-ма квантовими числами для кожного електрона. Ці числа визначаються енергетичним рівнем електрона, його орбітальним моментом, магнетним моментом і орієнтацією його спіна. Кожне із цих квантових чисел може набувати лише деяких визначених значень. Однак, допустимими є лише деякі комбінації цих значень. В.Паулі сформулював закон, який став відомим як **принцип заборони Паулі,** згідно з яким *жодні два електрони в атомній системі не можуть мати однакові комбінації квантових чисел.* Тому кожна оболонка атома може містити лише певну кількість електронних орбіт, що визначаються значеннями квантових чисел.

Принцип заборони Паулі має важливе значення для розуміння будови і поведінки атомів, атомних ядер, для розуміння заповнення електронних оболонок атома та пояснення атомних і молекулярних спектрів. Він пояснює хімічну взаємодію елементів і їхнє розміщення в періодичній системі хімічних елементів. Сам Паулі використовував принцип заборони для того, щоб зрозуміти також магнетні властивості простих металів і деяких газів. Згодом принцип заборони Паулі знайшов теоретичне обґрунтування в роботах Ервіна Шредінґера, Вернера Гайзенберґа та Поля Дірака. Атомну модель Бора замінила квантово-механічна, яка успішно пояснила спектри випромінювання й поглинання та інші атомні явища. Що ж до досягнень Паулі у цій галузі, то вони дали змогу поширити квантову механіку на такі галузі, як фізика частинок високих енергій, взаємодія частинок з електромагнетними полями. Ці галузі згодом стали відомі як релятивістська квантова електродинаміка.

1928 року Паулі зайняв посаду професора Федерального технологічного інституту (Цюріх), на якій залишався до кінця життя. Недовго (1935-1936) Паулі працював у Інституті фундаментальних досліджень у Прінстоні (штат Нью Джерсі). У роки Другої світової війни, коли виникла небезпека окупації Швайцарії, учений повернувся у цей же інститут, де очолював кафедру теоретичної фізики з 1940 до 1946 року.

Згодом Паулі зробив ще один великий внесок у фізичну науку. Спостереження за β-розпадом атомних ядер, при якому нейтрон у ядрі випромінює електрон, перетворюючись при цьому в протон, привернули увагу до проблеми виконання закону збереження енергії. Енергія після розпаду усіх продуктів цього процесу виявилася меншою, ніж енергія до розпаду. 1930 року Паулі висловив гіпотезу, що під час β-розпаду випромінюється якась невідома ще нейтральна частинка з півцілим спіном та масою спокою, близькою до нуля, яка забирає виявлений раніше дефіцит енергії. Згодом Енріко Фермі назвав цю частинку **нейтрино**. Упродовж 20-ти років з часу народження гіпотези про нейтрино експериментатори не могли його виявити. Нейтрино вдалося зареєструвати лише 1956 року.

1945 року Паулі одержав Нобелівську премію з фізики за „відкриття принципу заборони, який також називають принципом Паулі".

1946 року Паулі повернувся зі Сполучених Штатів Америки до Швайцарії, де працював над проблемами взаємодії частинок високої енергії та над проблемою ролі симетрії у мікросвіті, тобто він працював у тій галузі фізики, яку сьогодні називають фізикою високих енергій.

Колеги називали Паулі „совістю фізики", оскільки володіючи фантастичними здібностями та вмінням глибоко проникати у суть фізичних проблем, він був нестерпний до туманних арґументів і поверхових суджень. Одного разу він заявив: *„Я нічого не маю проти того, що Ви повільно думаєте, але мені не подобається, що Ви публікуєте статті швидше, ніж обдумуєте їх"*. Власні роботи він настільки ретельно вивіряв, що у його публікаціях фактично немає помилок. Наукових праць у нього було небагато, і то зі значним інтервалом. Його праці були продуктом тривалого процесу осмислення, під час якого доведення шліфувались знову й знову.

Віктор Вайскопф розповідав, коли він виявив помилку у своїй статті, то в розпачі пішов до В.Паулі, який був його професором, і запитав чи повинен він кинути фізику. „*Ні*, – заспокоїв його Паулі, – *усі роблять помилки. Крім мене*."

Інтелектуальні здібності Паулі знаходились у різкому дисонансі з його „вмінням" працювати руками. Колеги зазвичай жартували з приводу таємничого „ефекту Паулі", коли одна тільки присутність невисокого і повнуватого ученого в лабораторії викликала усі можливі неполадки і аварії. Із документально зареєстрованих проявів „ефекту Паулі" найдивовижнішим, безсумнівно, є такий. Одного разу в лабораторії Джеймса Франка в Ґеттінґені відбувся вибух, що зруйнував експериментальне обладнання. Час цієї події був точно зафіксований. Як з'ясувалося пізніше, вибух відбувся саме у той момент, коли поїзд, у якому Паулі їхав із Цюріха в Копенгаґен, зупинився на 8 хвилин у Ґеттінґені.

Учений цікавився також філософією і психологією, високо цінував мистецтво, музику і театр. Під час відпустки займався плаванням і любив мандрувати горами й лісами Швайцарії.

Вольфґанг Паулі був членом багатьох фізичних товариств, зокрема Американського фізичного товариства, Швайцарського фізичного товариства, іноземним членом Лондонського королівського товариства. Крім Нобелівської премії, Паулі нагороджений медаллю Франкліна Франклінського інституту (1952) і медаллю Макса Планка Німецького фізичного товариства (1958).

Помер Вольфґанг Паулі 15 грудня 1958 року.

**Галина Шопа,**
**Олександр Гальчинський**

У незаповнені клітинки впишіть прізвища п'яти учених, що починаються з літери Д.

1. Давній мислитель-засновник атомістичної гіпотези будови речовини. 2. Один з перших учнів академіка А. Йоффе. 3. Учений, який відкрив закон теплової дії електричного струму. 4. Учений, який є одним із авторів квантової механіки. 5. Французький учений, який встановив існування двох видів електрики, назвавши їх „скляним" і „сургучним".

Із книги М.М.Горбань *„На уроці та після ..."*

# Аспірантура в Північній Америці. Що вона може дати?*

**Марко Горбач**
Йоркський університет, Торонто, Канада

Хочу поділитися тут своїми думками про освіту в фізичних науках на двох континентах, щоби молоді фізики в Україні могли самі застановитися над запитанням, поставленим у заголовку. Я маю 46 років, звання професора фізики, і відбув перший рік керівництва відділом фізики й астрономії, який налічує 26 професорів. Студіював теоретичну фізику в Німеччині (диплом і докторат з Ґете університету у Франкфурті-над-Майном), куди щорічно їжджу продовжувати наукову співпрацю. Отже, я ознайомлений зі станом фізичної освіти з обидвох боків Атлантичного океану.

Якщо говорити про аспірантські програми (graduate programs) у Північній Америці, то мій особистий досвід походить з Канади, але особливих різниць поміж університетськими системами США не надто багато, а проблеми дуже подібні. Університети у Північній Америці поділені на три категорії: так зв. найкращі (їх 20-30), нормальні (їх понад 100) та третьої категорії. Мої завваги стосуватимуться університетів другої категорії, бо мій університет до неї належить (хоча заоохочую кандидатів подаватися на аспірантуру очевидно і до найкращих). Праця, яка виконується в аспірантурах університетів категорії 1 і 2 подібна якістю, бо фінансується вона тими самими науковими аґенціями, і праці публікуються в тих самих рецензованих журналах. Для кандидатів з України університети 2-ої категорії мають ту перевагу, що ці університети мають труднощі дібрати достатнє число досить кваліфікованих аспірантів, і тому дуже зацікавлені в припливі свіжих сил. Часто найкращі їхні випускники підставових студій (andergraduate studies) не залишаються там на аспірантуру, а вибирають собі інші університети на дальші студії.

Найбільша різниця між аспірантурою в Україні та у Північній Америці (або в Західній Европі) є та, що аспірант на Заході – це студент, прожиток якого тимчасово фінансується ґрантом і оплатою за навчання молодших студентів (andergraduate). Ґранти походять від національних агенцій і виділяються професорам на підставі пропонованих ними проектів, а також попередніх успіхів. Це частково ґарантує рівень науки. Професор, який опікується аспірантом не має дальших зобов'язань перед аспірантом, який закінчив маґістерку або докторат (за винятком писання рекомендаційних листів). Найкращих випускників опікун поручає далі на постдокторські позиції. Професор-опікун (supervisor) особисто зацікавлений в успіхах аспіранта під час студій, бо майбутнє його ґранту залежить від цього. Натомість в Україні існує традиція, що прийняття до аспірантури в академічний інститут – це робота на життя (при чому це колись давало непогані привілеї). Нині ця традиція не має великого значення, бо платня в інститутах мізерна, але ще й бракує напевно нових традицій, цебто можливості для кар'єри в університеті чи академічнім інституті після закінчення аспірантури поза межами України. Цю прогалину слід заповнити адміністраторам інститутів і університетів, бо інакше проґавиться можливість розвитку академічних установ.

З цього випливає, що аспірант у Північній Америці – це молода людина з великою ініціативою, яка не має ґарантій на успіх та все ж таки вірить у своє майбутнє. Це і є той великий мотивуючий фактор, що додає аспірантам потрібних сил до завершення маґістерської, а відтак докторської праці. Щодо закінчень-дипломів, то слід зазначити різниці поміж системами: чотирирічні студії в Канаді завершують т.зв. бакалавратом з відзначенням (Honours B.Sc.). Це відповідає українському диплому з фізики. Натомість диплом з фізики (чи інших природознавчих ділянок) з Німеччини (й інших західноевропейських країн) включає наукову працю, над якою кандидат працював принаймні 12 місяців, і тому він радше відповідає маґістерському ступеневі у Північній Америці. З іншого боку, адміністрація аспірантури гнучка: аспірант прийнятий на маґістерку, може бути переведеним до докторської програми після першого року аспірантури без формального закінчення маґістерки. У США маґістерка не має великого значення, вона часто передбачена для кандидатів, що не закінчать докторату.

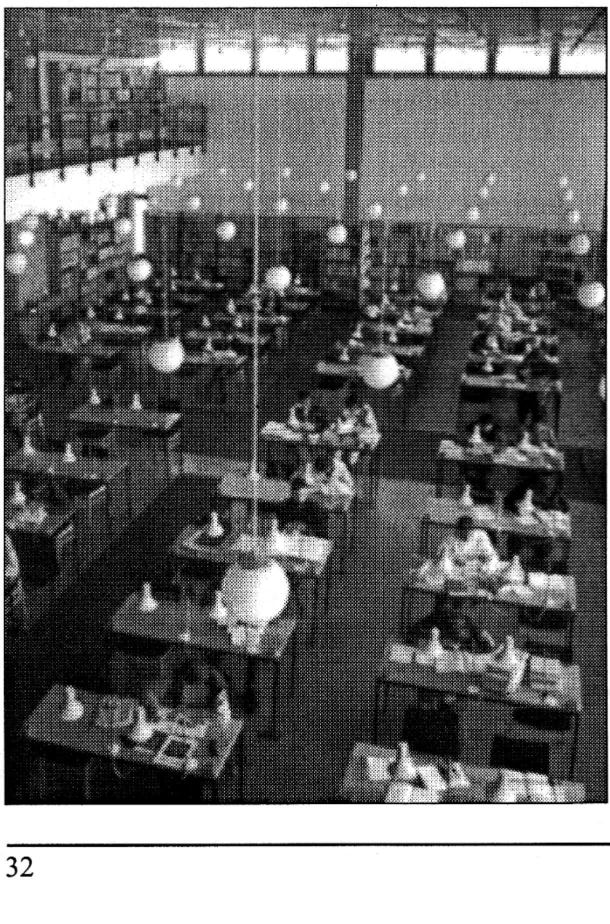
До аспірантури належать виклади (курси) з приписаними і вибірковими частинами. Приписані виклади, зазвичай, читають на рівні курсу теоретичної фізики Ландау-Ліфшиць (переважно на підставі американських підручників). Мета такого підходу – зрівняти знання студентів, які часто приходять з різною підготовкою. Студенти, які мають курси такого рівня можуть повторити й поглибити розуміння матеріалу. Додаткові курси (для яких студенти зі східної Европи та Азії часто не дуже приготовлені) – це курси заавансованих методів

*У статті зберігається правопис автора.

обчислювальної математики (фізики), в яких часто вимагають завершення малого проекту на доказ того, що студент зумів виконати якусь роботу незалежно.

Головна мета аспірантури – це помогти молодій людині, що має підставові знання стати незалежно думаючою людиною. Велика більшість випусників аспірантських програм працює після закінчення в індустрії, або самостійно як консультанти. Більшість випускників програм у фізичних науках працює в галузі застосування комп'ютерів. Винятком є фізики-експериментатори, зокрема фізики, що працювали з лазерами, оскільки на них є дуже великий попит в індустріях, пов'язаних з комунікаційною революцією (fibre optics). Професори-опікуни в цих ділянках нарікають, що втрачають навіть слабших випусників аспірантури, яким індустрія офірує високоплатні посади. Взагалі в експериментальній фізиці бракує охочих продовжувати наукову кар'єру.

Скільки випусників аспірантури мають шанси приміститися в науковому світі (переважно на професурі при університеті, бо за останні десятиліття активність у незалежних наукових інститутах в Америці і Канаді поважно зменшилася) багато залежить від кон'юнктури. Університетська система у Північній Америці поважно розбудувалася у 1960-их роках, коли збільшилася кількість університетів другої категорії. До початку 1990-х років дуже мало було нових затруднень, а за наступні роки буде велика потреба замінити ґенерацію затруднену в 1960-х р. Щоправда немале число професури з фізики буде перенесене до сусідних галузей (яких фізики створили, або розвинули). До них належить комунікаційна технологія (електрична інженерія), комп'ютерні науки (інформатика, кібернетика), прикладна математика, фінансова математика та інші. Університети у Північній Америці (а за ними слідкують теж західноевропейські) орієнтуються на студентський ринок, оскільки вони є підприємствами (з публічним фінансуванням). А цей ринок фаворизує сильно інформатику і деякі ділянки інженерії. Впроваджуються теж нові галузі студій, де комбінують фізику з практичною економією, щоби дати підставу випускникам, які хочуть працювати самостійно на вільному ринку.



Щоби пізнати краще різницю поміж аспірантурами в Европі й Північній Америці, треба зрозуміти їхні структури. У Північній Америці немає по відділах пірамідальної структури. Молоді й старші професори рівноправні та змагаються на рівних засадах за ґранти, якими підтримується наукова праця. Молоді професори затруднюються як так зв. професори-асистенти (таки зовсім незалежні), і нормально проґресують на своїй посаді до вищих ступенів (associate professor with tenure; full professor). Поскільки їхнє стажування залежить від успішної наукової кар'єри (число і якість учнів-аспірантів при цьому важливі), то від них можна очікувати великого зацікавлення поступом роботи аспіранта. Найважливішим критерієм в оцінюванні молодого науковця у прийнятті на посаду професора-асистента (це можливе після типово двох постдокторських років, цебто після короткої асистентури) є готовність кандидата до керування власною науковою роботою. У цім питанні можливо найбільше відрізняється східна система від західної.

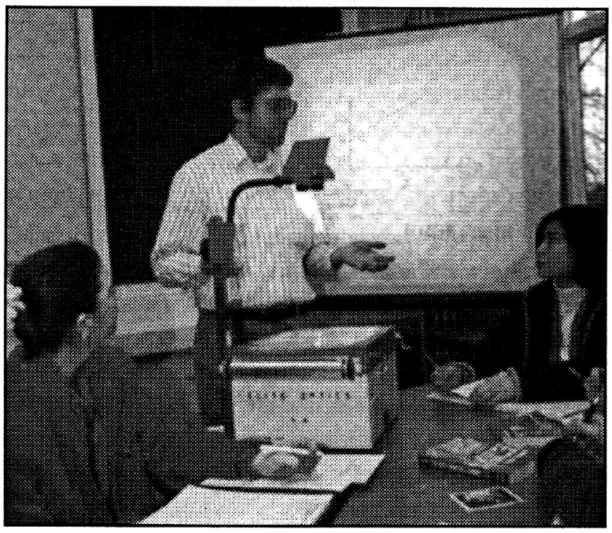
У східноевропейських академічних інститутах розвинулися пірамідальні структури. Цим структурам сприяли обставини, коли над проблемами працювали цілі армії науковців з дуже високим рівнем спеціалізації. Рівень спеціалізації допроваджував до того, що навіть середні і старші наукові співробітники не вчилися керувати своїми працями, а були залежними від своїх шефів. Ці шефи пильнували, щоби співробітники були постійно зайнятими частинними аспектами роботи і не мали надто багато часу займатися ширшою проблематикою. У цьому питанні мабуть існує найбільше потреби для перебудови академічного світу в Україні.

Для тих старших співробітників, які виїхали на Захід, це означало, що їм університетська кар'єра практично закрита через слабкі знання мови і практику затруднення молодих професорів. Якщо тут затруднюють старших, то очікується дуже високого рівня (багато наукових публікацій, оригінальність праць тощо). Радо використовується фахове знання для затруднення як постдоктора-асистента, але отримати справжню посаду вдало невеликій кількості недавно прибулих еміґрантів.

Ці зауваги повинні допомогти зрозуміти студентам і випускникам фізичних програм України, що аспірантура в Північній Америці може бути для них дуже корисною. Моя мета вербувати їх на цей континент не полягає в тому, щоби побільшити діаспору (рішення на еміґрацію для кожної людини особиста річ), а щоби допомогти Україні скріпити молоді сили з модерною освітою та добре розвинутим змислом для незалежного думання. Можливості для отримання такого вишколу в Північній Америці майже невичерпні. Цей вишкіл практично безкоштовний.

Аспірант у Північній Америці потребує фінансування на 15-20 тисяч доларів річно (канандські долари у Канаді, а американські – у США). З того можна скромно жити. Аспірантські програми переважно ґарантують це фінансування. Подання на аспірантуру вносять індивідуально самі кандидати. За останніх 10-15 років до Північної Америки прибуло чимало аспірантів з Китаю та інших країн Азії; тепер чути російську мову по коридорах, професори поручають румунських аспірантів тощо. Можливості для юних українських фізиків тут непогані, при чому в неодному університетському місті існує українська громада, шо може допомогти молодій людині тимчасово прижитися.

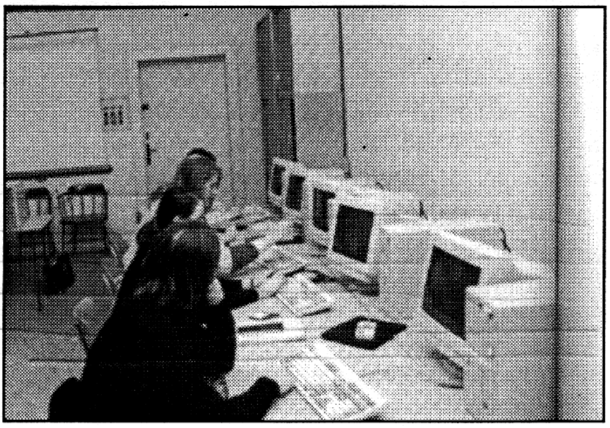
Фізика в Північній Америці, як згадано вище, від деякого часу поставлена під натиск повернути до себе більшу кількість студентів, зокрема на підставових студіях. Цей натиск збільшується останнім часом тому, що наближається час, коли відійде на пенсію добра половина професорського складу багатьох відділів. У багатьох відділах реформується стиль навчання: залишаються формальні підходи на боці, а наголошуються на зрозумінні проблем, оскільки цей аспект важливіший для вишколення змислу примінювати засоби думання за інші проблеми (чи в промисловому світі, чи в інших галузях науки).



У курсах математичних методів фізики користуються програмами символічного числення (Maple, Mathematica), щоби виробити математичну інтуїцію на підставі рисунків функцій, і щоби уникати довгих нудних обчислень, які відвертають увагу від суті математичної чи фізичної проблеми. У цьому контексті можна б і дати пораду впорядникам конкурсів фізики (і редакторам журналу) менше бити на задачі, де сполучені опори в якийсь ніби хитрий спосіб, а радше, ставити наголос на цікавіший зміст (як напр. у статті Хороза В., Лесівціва В. „Радіометр" („Світ фізики". 1999, № 4. С. 34-36) або у статті Невідомського А. „Незвичайний маятник" („Світ фізики". 1999, № 2. С. 36-40). Можна за допомогою комп'ютерів вивчати цікаві закони фізики без знання диференціально-інтеґрального числення, а саме відкривати для себе те, що Ньютон і Ляйбніц відкрили за допомогою числення скінченими різницями. Це і чудово приготовляє до елементарних досліджень хаосу, фракталів тощо. У вищих курсах фізики символічні програми дають змогу студентам позбутися страху перед математикою: задача власних чисел та векторів у Гільбертовім просторі розв'язується в наближений спосіб для будь-якого потенціалу в одному вимірі, і теж для багатовимірних проблем із симетріями; пов'язання між матричною механікою Гайзенберґа і хвильовим рівнянням Шредінґера стає очевидним на підставі швидко виконаних обчислень; менше часу віддається вивченню властивостей спеціальних функцій тощо.

Я навів ці приклади пожвавлення фізичної педагогії, щоби повернутися до запитання, поставленого в заголовку. Аспірант з України має змогу усе це засвоїти і отримати інтелектуальне стимулювання не тільки від професора-опікуна, але й через гурт аспірантів (у типовому університеті другої категорії аспірантів фізики буде 30-40), ну й через середовище. Через кон'юнктуру вищих технологій фізика знову стає модною і це позитивно впливає на мотивацію аспірантів.

Хочу закінчити кількома практичними заувагами. Зацікавлені юні фізики й астрономи повинні насамперед використати засоби Інтернету, щоби ознайомитися з аспірантськими програмами різних університетів. Кожна така програма (graduate program) подає склад професорів, їхні зацікавлення, електронні адреси, заголовки і посилання новіших наукових праць на сторінках мережі. Для успішного пошуку треба знати кілька основних фактів. Канадські університети мають адреси типу: www.vorku.ca, www.utoronto.ca, www.mcmaster.edu, www.ubc.ca, а американські користуються скороченнями як – www.rutgers.edu, www.mit.edu, www.harvard.edu, www.stanford.edu. Сторінки відділів фізики можна завжди віднайти через головну сторінку університету.



Очевидно, що зацікавлений кандидат мусить наперед попрацювати над знаннями англійської мови (читати, писати, а перед приїздом і по-трохи розмовляти). Переглянувши кілька університетів, варто ознайомитися з запитанням, які в них ділянки видаються активними і чи є бажана ділянка серед них. Далі треба поцікавитися статтями кількох професорів (звичайно спільних з аспірантами або постдокторами), щоби розпочати змістовний електронний контакт. Після першого контакту кандидат до аспірантури буде спрямований до адміністрації, де отримає всі інформації про формальності (до яких остаточно буде і належати оплата за формальне внесення подання, зазвичай це 50 $). Кандидатові надішлють поштою анкети, яких мають заповнити принаймні два професори, у яких навчалися кандидат чи кандидатка. Там ставляться запитання як про здібності і пильність студента, так і про правдоподібність успішного закінчення аспірантури. Вимагається складення іспиту англійської мови в акредитованій інституції (напр. TOEFL). Багато програм вимагає складення загального іспиту готовости до аспірантури (GRE). Остаточне прийняття після виповнення формальностей залежить від згоди професора-опікуна, хоча при більших університетах практикується теж прийняття на перший рік без опікуна. На підставі прийняття до аспірантури з підтвердженням забезпечення фінансування можна отримати в консуляті студентську візу.

Як виглядають роки аспірантури? На першому році аспірант бере кілька курсів і починає запізнаватися з тематикою наукової праці. Курси дають змогу запізнатися з іншими аспірантами, а теж дають керівникам аспірантської програми оцінити студентів на рівних засадах. Навчальні зобов'язання аспіранта можуть включати поправлення задач, демонстрування і нагляд за лабораторними заняттями, а також групові вправи (туторії). Початок академічного року у серпні-вересні, а при кінці першого літа професор-опікун (часто разом з комітетом, до якого входять звичайно ще два професори) на підставі представлених перших кроків праці аспірантом творить собі образ чи аспірант надається до докторату (Ph.D.), а чи ліпше закінчити на маґістерському ступені. Два-три дальших років інтенсивної наукової праці ведуть до перших наукових статей у міжнародних журналах, цебто творять початок наукової кар'єри. Після захисту дисертації подальші кроки залежать від успіху забезпечити собі постдокторську посаду. Цю асистентуру слід відбути деінде, в Північній Америці небажаний науковий „інцест", а вимагається поширення горизонту молодої людини. Знайти постдокторське місце допомагають перші виступи на наукових конференціях, ну і контакти професора-опікуна.

У читача мабуть виринуло запитання, чому це аспірантські програми в Північній Америці шукають кваліфікованих студентів з усього світу? Тут є декілька причин. Я тільки наведу одну-дві без дальших пояснень, бо це тема на окрему статтю. Насамперед шкільна освітня система перебуває в кризі (маємо багато некваліфікованих учителів природознавчих наук). Далі, маємо справу з відносно молодими суспільствами з великим припливом економічних еміґрантів (часто без вищої освіти), які виконують сірі та чорні роботи, і для яких університет має насамперед дати дітям підставу до заробітку, а не до розвинення інтелекту. Ці діти переважно прямують після основних студій до професійних шкіл (медицина, дентистика, правничі студії, економія, інженерія). Часто ці студенти люблять фізику і пильно вчаться, але на аспірантуру в фізиці їх намовити важко. Дехто з кращих випусників уважає, що аспірантура вимагає забагато праці за надто малий фінансовий зиск. Тут власне є добрі шанси для молодих фізиків з України. Професори зацікавлені у тому, щоби хтось здібний і пильний опрацьовував їхні ідеї. Тому вони готові прийняти кандидатів з далеких країн. Оскільки запанувало деяке розчарування аспірантами з Китаю (більшість з них дуже пильно виконували кожний побажаний крок, але ніколи не осягнули стану незалежного думання, а така ситуація для професора-опікуна стає нецікавою), то і виник попит на студентів зі Східної Европи.

Напрошується запитання, кому варто зважитися на такий крок? Вимагає цей крок відваги і самовпевнености. Хто має диплом з добрими оцінками і кому не бракує віри у свої сили – мабуть готовий на тимчасовий скік поза океан. Оскільки студентська віза зобов'язує кандидата повернутися до своєї країни походження, то вірю, що цей мій заклик допоможе молодим фізикам допомогти своїй батьківщині.

*Нобелівську премію з фізики 1991 року Шведська Королівська Академія наук присудила П'єру-Жіллю де Женну (Pierre-Gilles de Gennes) за відкриття того, що методи розвинуті для дослідження явищ впорядкування у простих системах можуть бути узагальнені для складніших форм матерії, таких як рідкі кристали та полімери.*

# НОБЕЛІВСЬКІ ЛАУРЕАТИ

# 1991

*П'єр-Жілль де Женн*

## Нові ідеї у вивченні рідких кристалів та полімерів

П'єр-Жілль де Женн народився 1932 року в Парижі, фізик-теоретик, який відомий своїми працями в різних ділянках сучасної фізики – від надпровідності та надплинності рідкого гелію-3 до фізики рідких кристалів й полімерів. У цих галузях фізики він отримав вагомі й оригінальні результати.

Свою наукову діяльність П'єр де Женн розпочав 1955 року в Атомному Енергетичному Центрі вивченням фазових переходів, пов'язаних з магнетними властивостями речовини та розсіюванням нейтронів. 1957 року захистив докторську дисертацію, після (1959) П'єр де Женн перебував на науковому стажуванні в Берклі (США). Згодом в 1960-1970 роках учений зайнявся дослідженням явища впорядкування в різних його виявах: перехід до надпровідної фази в металах, перехід від впорядкованого до невпорядкованого стану в рідких кристалах та полімерах. Ці системи доволі складні, і фізики, вивчаючи їх раніше, не зауважували загальних рис їхньої поведінки. П'єр де Женн показав, що фазові переходи в таких різних фізичних об'єктах, як магнетики, надпровідники, рідкі кристали та полімери можна описати однією математичною моделлю.

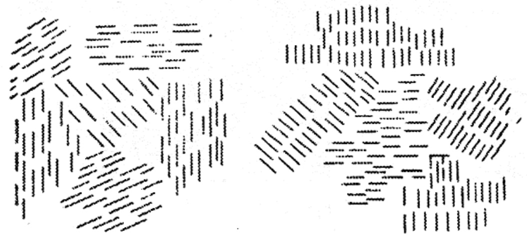
1968 року П'єр де Женн сформував і очолив дослідницьку групу в Інституті фізики твердого тіла університету в Орсе (передмістя Парижу), що зайнялась вивченням рідких кристалів. У дослідженнях взяли участь як теоретики, так і експериментатори. Згодом ця дослідницька група стала провідним центром у світі з вивчення рідких кристалів.

Рідкі кристали – це специфічний стан речовини, якому властиві риси як рідини, так і кристала. До рідких кристалів належать чисті речовини з молекулами, що мають вигляд паличок або пластинок, а також розчини деяких речовин. У рідкокристалічному стані речовина перебуває лише у певному температурному інтервалі. За типом просторової структури рідкі кристали поділяють на **нематичні** та **смектичні**. У нематичних рідких кристалах (рис. 1, а) є далекий орієнтаційний порядок: осі молекул впорядковуються вздовж певного напрямку, але порядку в розташуванні центрів цих молекул немає. У смектичних рідких кристалах (рис.1, б) молекули, орієнтовані за напрямком своїх повздовжніх осей розташовуються у чітко виражені „шеренги" – площини, що проходять через кінці молекул і перпендикулярні до їхніх осей.

Смектичні рідкі кристали відрізняються більшою впорядкованістю, бо у їхніх молекулах є ланки бічної взаємодії, але у розташуванні центрів молекул далекий порядок також відсутній. У них нижчий температурний інтервал існування.

У нематичних рідких кристалах молекули мають змогу поступально зміщуватися, тому в'язкість речовини у нематичній фазі мало відрізняється від в'язкості в рідинно-аморфному стані. Плинність смектичних рідких кристалів забезпечується ковзанням однієї „шеренги" молекул по іншій. Деякі рідкі кристали можуть перебувати в обох станах – нематичному і смектичному.

При нагріванні таких кристалів спостерігається типова послідовність фазових переходів першого роду: твердий кристал – смектична фаза – нематична – аморфно-рідинна. У деяких: кристал – смектична фаза – рідина. Теплота фазових переходів незначна. Із зростанням температури анізотропія рідких кристалів поступово зменшується, оскільки зменшується орієнтаційна впорядкованість їхніх молекул. В електричному і магнетному полі, навпаки, молекули рідкого кристала мають значну одновісну впорядкованість. У рідких кристалах спостерігаються явища оптичної активності та електрооптичного ефекту.



*а* *б*

Рис. 1. *Схематична структура рідких кристалів: а – нематичні, б – смектичні*

Сукупність цих цінних фізичних властивостей спричинила їх широке застосування в пристроях відображення інформації. Електронна техніка вже давно відчувала гостру потребу в дешевих та економних символьних індикаторах. І, як з'ясувалось, цим вимогам найкраще задовольняють рідко-кристалічні індикатори (плоскі комірки з прозорими електродами, між якими розміщено тонкий шар рідко-кристалічної речовини).

Фізичні дослідження рідких кристалів, що передували їх практичному використанню, широко розгорнулись у 1960-х рр. 1962 року було опубліковано майже 20 статей з фізики та хімії рідких кристалів, а в 1975-1976 р. – близько тисячі. Внесок дослідницької групи з Орсе, яку очолював П'єр де Женн, у вивчення рідких кристалів був одним із найвагоміших. Вони опублікували сотні статей; 1974 року П'єр де Женн написав ґрунтовну монографію „Фізика рідких кристалів", яка стала настільною книгою для спеціалістів у цій галузі. П'єр де Женн пояснив природу аномального розсіювання світла нематичними рідкими кристалами (це розсіювання зумовлене флуктуаціями орієнтаційного впорядкування молекул), а також передбачив їхню поведінку в змінному електричному полі. Крім того, П'єр де Женн встановив важливі аналогії у поведінці рідких кристалів та надпровідників. Аналогія, яку він виявив, дала змогу передбачити ще одну особливість рідкокристалічного стан у. Якщо в надпровідниках під впливом магнетного поля виникає впорядкована структура магнетних вихорів (вихори Абрикосова), то в рідких кристалах можлива аналогічна структура, утворена лінійними дефектами (так званими дисклінаціями). Згодом свої дослідження вчений поширив на полімери.

Полімери – це речовини, у молекулах яких міститься певна група атомів (мономер), що багаторазово повторюється. Кількість повторень мономера в молекулі полімеру називають ступенем полімеризації. Полімери можуть бути лінійними (ланцюжкові молекули), так і просторовими (тривимірні молекули). У просторових полімерах розгалуження молекул у різних напрямах веде до утворення тривимірної просторової структури, подібної до клубка ниток. Макромолекула (клубок) може здійснювати хаотичні рухи в трьох вимірах. П'єр де Женн показав, що поведінка молекули полімеру подібна до поведінки магнетного домену. В обох випадках можливі фазові переходи (впорядкований стан – розупорядкування). Такий підхід відкрив нові можливості для вивчення структурного впорядкування полімерів і дав змогу П'єру де Женну передбачити динаміку полімерних ланцюжків, тобто характер переміщень їхніх фрагментів. Експериментальні дослідження динаміки полімерів, виконані за допомогою розсіювання нейтронів, підтвердили передбачену П'єром де Женном поведінку полімерів. Ці ідеї пізніше він поширив на нетрадиційні для фізики об'єкти: гелі, інші м'які та пористі системи.

Заслуга П'єра де Женна перед наукою в тому, що він виділив фізичні явища в різних фізичних системах, які описуються як перехід „порядок – безладдя" і на основі цього виявив характерні особливості динаміки молекул цих систем. До появи його праць багато хто мав сумнів, що для таких складних об'єктів (рідкі кристали, полімери) можливий єдиний фізичний опис.

П'єр де Женн висунув нові ідеї фізичних досліджень складних систем, стимулював теоретичні й експериментальні дослідження в цих напрямах. Його дослідження стали підґрунтям для практичного використання рідких кристалів та полімерів – матеріалів, що мають широке технічне застосування.

Очевидно, віддаючи належне йому як одному з новаторів фізики XX сторіччя, колеги назвали П'єра де Женна „Ньютоном нашого часу".

**Олександр ГАЛЬЧИНСЬКИЙ,**
*канд. фіз.-мат. наук*

# БУКОВИНА ПРИЙМАЛА XXXVII ВСЕУКРАЇНСЬКУ ОЛІМПІАДУ ЮНИХ ФІЗИКІВ

Вже стало доброю традицією проводити Всеукраїнські олімпіади під час весняних шкільних канікул. Цього року такі олімпіади проводилися в 15 містах України. Чернівцям випала честь приймати юних фізиків. І цей вибір не випадковий, адже на базі Чернівецького державного університету склалася потужна фізична школа, в області діють спеціалізовані середні навчальні заклади та окремі класи з фізико-математичним профілем.

У IV етапі Всеукраїнської олімпіади з фізики, яка проходила з 25 березня до 2 квітня, брали участь 177 учнів – переможців обласних олімпіад з 25 областей, міста Києва, Севастополя, окремою командою виступив Український фізико-математичний ліцей Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Найчисельнішими були – Рівненська, Львівська та Одеська команди.

57 членів журі – науковців, методистів, провідних викладачів та вчителів фізики з різних регіонів України відповідали за об'єктивність оцінювання олімпіадних робіт.

Кожна олімпіада має свій підготовчий період, від якого і залежить її успішне проведення. Завдяки своєчасній організаційній роботі членів оргкомітету на чолі з його головою М.Бауером з перших хвилин перебування на буковинській землі учасники олімпіади та члени журі відчули теплоту і турботу господарів.

На урочистому відкритті олімпіади, яке відбулося в Обласному Центрі дитячої творчості „Юність Буковини" зі словами вітань до присутніх звернулися М.Бауер – начальник управління освіти облдержадміністрації, М.Березовський – заступник голови облдержадміністрації, Б.Кремінський – завідувач відділом Науково-методичного центру середньої освіти Міністерства освіти і науки України, І.Пінкевич – заступник голови журі, завідувач кафедри теоретичної фізики Київського національного університету ім. Т.Шевченка. Завершилося відкриття святковою програмою, до створення якої долучилися вихованці Центру „Юність Буковини".

А далі – виконання завдань олімпіади, традиційно, в два етапи – теоретичний та експериментальний тури. До проведення XXXVII олімпіади внесено деякі зміни, що відповідають стандартам міжнародних олімпіад. Юні фізики успішно справились з завданнями, продемонстрували при цьому оригінальність та нестандартність у підході до розв'язків. А в дні, коли учасники відпочивали, на них чекали цікаві знайомства, екскурсії по місту, до краєзнавчого та художнього музеїв, музею космонавтики, університету. Зустрічались учасники олімпіади з учнями місцевих шкіл.

Згідно з Положенням про Всеукраїнські олімпіади дипломами переможців на святковому закритті нагороджено 85 учасників. Дипломантами І ступеня стали 13 учасників, II – 29, III – 43. Найкращі результати показали представники Київської, Вінницької, Одеської областей. Три дипломи III ступеня одержали представники Чернівецької команди.

На учасників олімпіади чекали також спеціальні призи. „Кращим фізиком" олімпіади стала юна киянка Олена Рябініна (11 кл.), за оригінальність розв'язку теоретичного туру відзначений Роман Бакулін (11 кл.) з Севастополя, а експериментального – одинадцятикласник з Дніпропетровщини Євген Кадочников. Титул „Кращий юний фізик сільської школи" отримав Євген Данилюк (9 клас), „За волю до перемоги" – Олег Білецький (обидва з Рівненщини). Останньому участь в олімпіаді далася найважче, бо в зв'язку з травмою змушений пересуватися за допомогою милиць. „Кращим юним фізиком Чернівеччини" визнано Дмитра Опаїца.

Вручення почесних нагород гармонійно перепліталося з виступами мистецьких колективів – фолькльорного гурту „Джерело" (педучилище ЧДУ), народного театру-студії „Гердан". Вітали учасників та гостей олімпіади як відомі артисти – Ольга Добрянська, Павло Дворський, так і юні аматори – Аня Руснак та чотирирічна Алінка Гросу.

Члени журі, учасники та гості відзначили високий рівень організації олімпіади, а також намагання господарів перетворити перебування в Чернівцях у незабутню згадку. Кожний гість повіз додому в своїх серцях часточку тепла буковинців.

Юні фізики отримали запрошення ректора С.Костишина навчатися у Чернівецькому державному університеті. 5 найкращих – влітку представлятимуть Україну на Міжнародній олімпіаді у Великобританії.

Підсумовуючи результати олімпіади, М.Бауер подякував усім, хто допоміг в організації і проведенні змагання, а також передав символічний факел відданості до фізики, що став уособленням духу і традицій олімпіади, представнику Закарпаття, де на початку III тисячоліття в центрі Европи проходитиме XXXVIII Всеукраїнська олімпіада юних фізиків.

**Валерій Якимчук,**
*методист Чернівецького науково-методичного інституту післядипломної освіти*

# Теоретичні завдання IV етапу Всеукраїнської олімпіади з фізики, м. Чернівці, 2000 р.

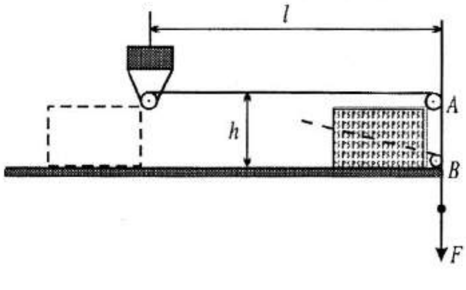
### *8-й клас*

**Задача 1.**

Два велосипедисти одночасно виїхали з пунктів $A$ і $B$ і зустрілися за годину. Прибувши у пункти $B$ і $A$ відповідно, велосипедисти відразу ж повернули назад і зустрілися знову. За який час після першої зустрічі це сталося?

**Задача 2.**

Біля краю стола лежить брусок маси $m$. Є нитка, один кінець якої закріплений так, як зображено на рисунку (ролик $A$ прикріплений до бруска, а ролик $B$ – до краю стола). За вільний кінець нитки тягнуть з постійною силою $F$, а брусок притримують. Відстань від краю стола, біля якого знаходиться брусок, до точки закріплення нитки дорівнює $l$, висота бруска $h$. Після того як брусок відпустили, він почав рухатися. Визначіть його швидкість у той момент, коли брусок пролетить повз точку закріплення нитки. Тертям між столом і бруском, а також у вісях роликів знехтуйте. Розміри роликів малі порівняно з розмірами бруска.




**Задача 3.**

Англійський фізик Чілдрен 1815 року пробив такий дослід. Дві платинові дротинки однакової довжини, але різних діаметрів він підключив до батареї Вольта. Одного разу він з'єднав дротинки послідовно, а іншого – паралельно. У першому випадку розжарювалася лише тонка дротинка, в другому – лише товста. 25 років учені не могли пояснити результати цього досліду. А чи зможете Ви?

**Задача 4.**

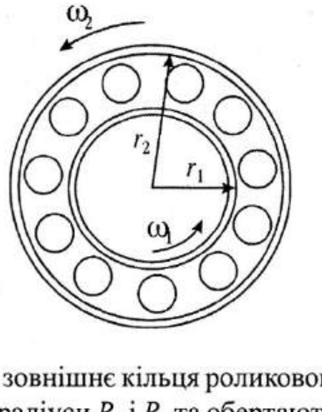
На дно теплоізольованої циліндричної посудини поклали шматок льоду масою $m$ при температурі $t = 0\ ^0$С і міцно прикріпили його до дна. Потім цей лід залили водою такої самої маси $m$. Вода повністю покрила лід і досягла рівня $H = 20$ см. Визначіть, якою була температура цієї води, якщо після встановлення теплової рівноваги рівень її опустився на $h = 0{,}4$ см. Густина води і льоду відповідно дорівнюють 1000 кг/м$^3$ і 920 кг/м$^3$, питома теплоємність води $c = 4200$ Дж/кг град, питома теплота плавлення льоду $\lambda = 330$ кДж /кг.

**Задача 5.**

По прямому каналу зі швидкістю $v$ пливе дрібна крига, яка рівномірно розподілена по поверхні води, покриваючи $n$-у її частину. Біля дамби, утворився затор, у якому крижини повністю покривають поверхню води, не насуваючись одна на одну. З якою швидкістю росте межа суцільної криги? Швидкість води $v = 0{,}72$ км /год, $n = 0{,}1$.

### *9-й клас*

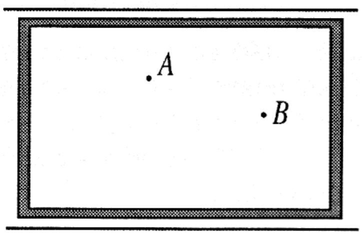
**Задача 1.**




Внутрішнє і зовнішнє кільця роликового підшипника мають радіуси $R_1$ і $R_2$ та обертаються з кутовими швидкостями $\omega_1$ і $\omega_2$ відповідно (див. рис.). З якою кутовою швидкістю обертатиметься вісь ролика навколо осі підшипника? За якої умови ролик здійснюватиме: а) тільки обертовий рух навколо своєї осі, б) тільки поступальний рух? Вважайте відсутнім проковзування між поверхнями ролика і кілець.

**Задача 2.**
По прямому каналу зі швидкістю $v$ пливе дрібна крига, яка рівномірно розподілена по поверхні води, покриваючи $n$-у її частину. Біля дамби утворився затор, в якому крижини повністю покривають поверхню води, не насуваючись одна на одну. З якою швидкістю росте межа суцільної криги? З якою силою діють на 1 м цієї межі між водою і затором крижини, що зупиняються? Густина криги $\rho = 910$ кг/м$^3$, її товщина $h = 20$ см, швидкість води $v = 0,72$ км/год, $n = 0,1$.

**Задача 3.**
З міст $A$ і $B$ назустріч один одному вирушили одночасно два потяги. Кожен з них рухався спочатку рівноприскорено, а потім – рівномірно. Відношення швидкостей рівномірного руху потягів дорівнює 4/3. У момент зустрічі потяги мали однакові значення швидкостей і в міста $A$ і $B$ прибули одночасно. Визначіть відношення прискорень потягів.

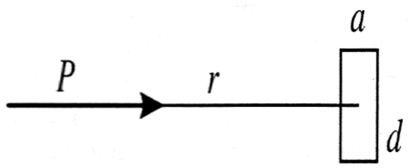



**Задача 4.**
Як треба спрямувати промінь світла з точки $A$ (див. рис.), яка знаходиться всередині дзеркального прямокутної скриньки, щоб він потрапив у точку $B$, відбившись по одному разу від усіх чотирьох стінок? Точки $A$ і $B$ знаходяться в площині рисунка, перпендикулярній до стінок скриньки.

**Задача 5.**
Електричне коло складається лише з резисторів і має дві пари виводів. Якщо до виводів I прикласти напругу 20 В, то вольтметр з дуже великим опором, приєднаний до виводів II, покаже напругу 10 В. Якщо ж подати напругу 20 В на виводи II, то вольтметр, приєднаний до виводів I, покаже напругу 20 В. Яке це електричне коло?

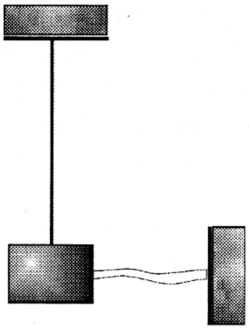
### *10-й клас*

**Задача 1.**
Дві протилежно заряджені частинки, розділені деякою відстанню $l$, утворюють електричний диполь. Величина $P = ql$, де $q$ – заряд частинки, називається дипольним моментом і має напрям від неґативного заряду до позитивного.
а) Знайдіть напруженість електричного поля диполя на відстані $r$ від центра диполя ($r >> l$) уздовж лінії його вісі. Відповідь подайте через дипольний момент $P$.
б) На вісі симетрії круглої монети, яка має діаметр $d$ та товщину $a$, на відстані $r$ від неї ($r >> d$) знаходиться точковий диполь $P$ орієнтований на монету (див. рис.). Скориставшись відповіддю до пункту а, оцініть силу, з якою диполь діє на монету. *Використайте наближену рівність* $(1 + x) = 1 - nx$, *якщо* $x << 1$.




**Задача 2.**
У вертикальному циліндрі під поршнем знаходиться ідеальний газ. Сила тертя при переміщенні поршня перевищує суму сил тяжіння та зовнішнього тиску на поршень. Циліндр повільно нагрівають. За час нагріву газ отримав кількість тепла $Q$, включаючи і частину тепла, що виділилося внаслідок тертя. Далі циліндр охолодили, забравши таку ж кількість тепла $Q$. У скільки разів змінився тиск газу в циліндрі за час від початку розширення і до завершення охолодження, якщо за той же час об'єм газу збільшився в 2 рази?

**Задача 3.**



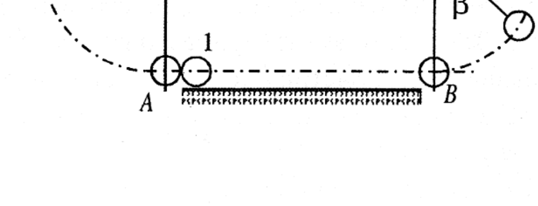
Тягар, маса якого $m$, підвішений до стелі на тонкій нерозтяжній нитці і прив'язаний ґумовою стрічкою до стінки. Тягар може здійснювати малі коливання в площині рисунка. Знайдіть період цих коливань, якщо в положенні рівноваги гумова стрічка не розтягнута і розташована горизонтально (див. рис.). Довжина нитки $l$, коефіцієнт пружності стрічки $k$. Маси нитки і стрічки та розміри тягаря до уваги не беріть.

**Задача 4.**

Тонке горизонтальне кільце радіусом $R$ = 20 см заряджене рівномірно, густина заряду $\sigma = 10^{-5}$ Кл/м. Деяке тіло масою $m$ = 5 г і зарядом $q = 10^{-8}$ Кл починає падати з центра кільця. Визначіть прискорення тіла на відстані $h$ = 30 см від площини кільця.

**Задача 5.**

З обох боків стола (див. рис.) підвішені кулі $A$ і $B$. На лівому краю стола до кулі $A$ дотикається куля 1. Кулю $A$ відводять на кут $\alpha = \pi/2$ і відпускають. Між кулями послідовно відбуваються абсолютно пружні центральні удари. На який кут $\beta$ відхилиться куля $B$? Радіус куль $R$ = 0,05 м, довжина стола $S$ = 2 м, довжина нитки підвісу $l$ = 0,5 м, момент інерції кулі відносно її центра $I = 0{,}4\ mR^2$, коефіцієнт тертя ковзання $f$ = 0,25, тертям кочення та тертям між кулями знехтуйте.




### *11-й клас*

**Задача 1.**

З обох боків стола (рис. 1) підвішені кулі $A$ і $B$. На лівому краю стола до кулі $A$ дотикається куля 1. Кулю $A$ відводять на кут $\alpha = \pi/2$ і відпускають. Між кулями послідовно відбуваються абсолютно пружні центральні удари.

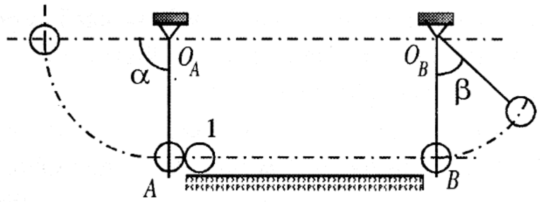



Рис. 1.

а) На який кут $\beta$ відхилиться куля $B$?

б) На якій відстані від лівого краю стола необхідно розмістити кулю 2 (рис. 2), щоб кут $\beta$ був найменшим?

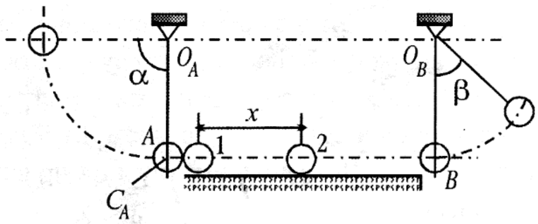



Рис. 2.

Радіус куль $R$ = 0,05 м, довжина стола $S$ = 2 м, довжина нитки підвісу $l$ = 0,5 м, момент інерції кулі відносно її центра $I = 0{,}4\ mR^2$, коефіцієнт тертя ковзання $f$ = 0,25, тертям кочення та тертям між кулями знехтуйте.

**Задача 2.**

Поверхня однорідного діелектричного диска рівномірно заряджена. Повний її заряд $Q$. Диск помістили в однорідне магнетне поле з індукцією $B$, яка перпендикулярна до площини диска. Диск має масу $m$ і може обертатися навколо вісі, що проходить через його центр. З якою кутовою швидкістю почне обертатися диск, якщо магнетне поле зникне?

**Задача 3.**

Дія ґравітаційного поля на світловий промінь зумовлена наявністю у фотонів інертної маси згідно зі співвідношенням $p = mc = (h\nu/c^2)\cdot c$, де $\nu$ – частота фотона.

а) Знайдіть кут відхилення світлового променя в однорідному ґравітаційному полі з ґравітаційним прискоренням $g$, перпендикулярним променеві, після того, як він пройшов шлях $S$.

б) Знайдіть відносну зміну частоти світла після того, як воно пройде шлях $S$ в полі зі сталим ґравітаційним прискоренням g та оцініть її для прискорення біля поверхні Землі і $S = 10$ м.

в) Нехай ґравітаційне поле створене зіркою масою $M$. Який максимальний радіус повинна мати ця зірка, щоб вона була „чорною діркою", тобто, щоб світло випромінене з поверхні зірки не досягнуло віддаленого спостерігача ( $r \to \infty$ )? Зробіть оцінку для маси Сонця

( $M_C = 1{,}99\cdot10^{30}$ кг, $G = 6{,}67\cdot10^{-11}$ $\text{Н}\cdot\text{м}^2\text{кг}^{-2}$ ).

**Задача 4.**

Прямокутний акваріум довжиною $l = 50$ см розділений перегородкою на два відсіки. В центрі перегородки знаходиться симетрична двоопукла лінза. На лівій стінці акваріума в центрі нарисована стрілка довжиною $h$. Якщо налити рідину в лівий відсік, то на стінці правого відсіку з'явиться чітке зображення стрілки довжиною $h_1 = 4{,}5$ мм. Якщо ту ж рідину налити в правий відсік, виливши її з лівого, то на стінці правого відсіку знову буде чітке зображення стрілки, але вже довжиною $h_2 = 2$ мм. Знайдіть довжину стрілки $h$, показник заломлення рідини і відстань між лінзою і стінками акваріума. Вважайте всі кути променів малими, так що $\sin\alpha \approx \operatorname{tg}\alpha \approx \alpha$ .

**Задача 5.**

Визначіть швидкість, з якою рухається тінь Місяця по земній поверхні на екваторі під час повного сонячного затемнення. Вважати, що площини сонячної і місячної орбіт збігаються і перпендикулярні до земної осі. Радіус місячної орбіти $R_M = 3{,}8\cdot10^5$ км .

# Львівщина багата обдарованими дітьми

Уже традиційними стали зустрічі обласної держадміністрації із обдарованими школярами Львівщини. Щовесни вони приїжджають до Львова, щоб зустрітися з керівниками області, поговорити не тільки про успіхи, а й проблеми.

В області успішно реалізується програма „Розвиток творчих здібностей дітей та молоді". Одним з важливих завдань програми є створення навчальних закладів для розвитку творчо обдарованих дітей. Школярі Львівщини підтверджують високий рівень на Всеукраїнських олімпіадах з фізики, математики, хімії, іноземних мов тощо, а також на мистецьких конкурсах та спортивних змаганнях. Вкладаючи все можливе у розвиток обдарувань і талантів учнівської молоді, будуємо міцний фундамент нашої держави. Це стане надійною опорою для майбутнього.

На світлині:
*Начальник управління освіти Львівської обласної держадміністрації Созонт Коваль з учасниками зустрічі. (м.Львів, травень, 2000 р.)*

# *ГЕЙЗЕР НА КУХНІ*

*У каструлі закипає вода. У цей час воду приводять у стан обертання. Опишіть і поясніть явища, які спостерігаються під час цього.*

(Будьте обережні під час експериментів!)

Розв'язок цієї задачі для конкретних початкових умов (кутової швидкості, розміру каструлі, кількості води тощо) не має практичної цінності. Спробуймо дослідити це явище і проаналізувати отримані результати.

У наведеному нижче розв'язку цієї проблеми для простоти ми вважали воду ідеальною рідиною.

Розгляньмо фізичні процеси, які відбуваються під час обертання води. Зрозуміло, що поверхня набуде деякої нової, невідомої нам форми. Спробуймо детальніше описати її. Знайдімо рівняння поверхні (залежність $y$ від $x$ зображена на рис. 1).

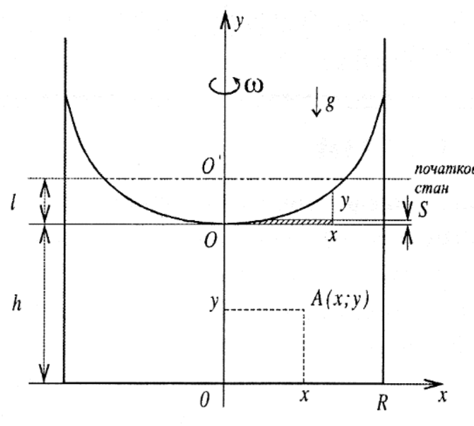



Рис. 1. *Поверхня рідини, що обертається*

Виділімо деяку масу $dm$ (заштрихована). На неї діє доцентрова сила зумовлена тиском води висотою $y$

$$dm \cdot a_{доц} = \rho g y S \quad ,$$

де $\rho$ – густина води, $g$ – прискорення вільного падіння. Врахувавши, що

$$dm = \rho S x \, , \; a_{доц} = \omega^2 \frac{x}{2}$$

($x/2$ – координата центра мас). Тому

$$y = \frac{\omega^2 x^2}{2g} \quad .$$

Отже, ця поверхня – це параболоїд обертання ($y \sim x^2$).

Розрахуймо тиск у рідині для довільної точки $A$ з координатами $(x, y)$. Очевидно, що він створений зовнішнім атмосферним тиском $P_0$, тиском води і тиском, створеним відцентровою силою. Знехтуймо додатковим тиском під викривленою поверхнею (тиск поверхневого натягу), оскільки він незначний.

Тому

$$P(x,y) = P_0 + \rho g (h - y) + \frac{\rho \omega^2 x^2}{2} \quad .$$

Розрахуємо розподіл тиску по дну посудини:

$$P(x) = \frac{\rho \omega^2 x^2}{2} + P_0 + \rho g h \quad , \qquad (1)$$

по стінці:

$$P(y) = \frac{\rho \omega^2 R^2}{2} + P_0 + \rho g (h - y) \qquad (2)$$

Коли ж рідина була в стані спокою (не оберталась), то тиск у т. $A$ $(x, y)$ дорівнював

$$P(x,y) = P_0 + \rho g (h + l - y) \quad .$$

Аналогічно розподіл тиску води по дну посудини, яка не обертається буде:

$$P(x) = P_0 + \rho g (h + l) = const \, , \qquad (3)$$

по стінці:

$$P(y) = P_0 + \rho g (h + l - y) \quad , \qquad (4)$$

де $l = |OO'|$.

Знайдімо $l$ з рівності об'ємів:

$$V_{поч} = \pi R^2 l \quad .$$

$$V_{кін} = \pi \int_0^R \left( \frac{\omega^2 x^2}{2g} \right)^2 dx = \frac{\pi \omega^4}{4 g^2} \int_0^R x^4 dx = \frac{\pi \omega^4}{20 g^2} R^5 \quad .$$

Оскільки $V_{поч} = V_{кін}$, отримаємо:

$$l = \frac{\omega^4 R^3}{20 g^2} \quad .$$

Отже, знайшовши залежність тиску води від координат $(x, y)$, знаходимо температуру кипіння $T_к$ залежно від $(x, y)$. Відомо, що температура кипіння залежить від тиску, і при малих відхиленнях його величини від атмосферного запишемо:

$$\frac{T(x,y)}{T_0}=\frac{P(x,y)}{P_0}\Rightarrow T(x,y)=\frac{P(x,y)}{P_0}T_0 \ . \quad (5)$$

Рівність (5) з урахуванням рівнянь (1) і (3) дає розподіл температури кипіння води по дну посудини (див. рис. 2.).

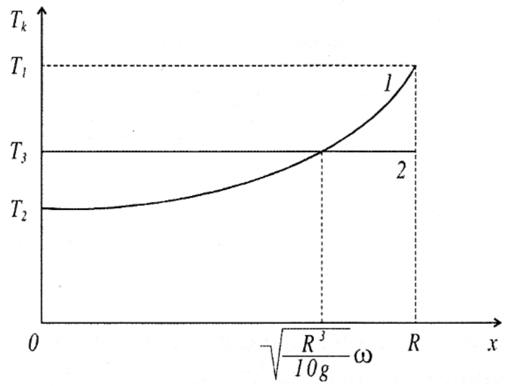



Рис. 2. *Розподіл температури кипіння води по дну каструлі: 1 – рідина обертається; 2 – рідина не обертається*

$$T_1=\frac{\frac{\rho\omega^2R^2}{2}+P_0+\rho gh}{P_0}\cdot T_0 \ ,$$

$$T_2=\frac{P_0+\rho gh}{P_0}\cdot T_0 \ ,$$

$$T_3=\frac{P_0+\rho g(h+l)}{P_0}\cdot T_0 \ .$$

За умовою задачі вода закипає у стані спокою. Нагадаємо, що кипіння – це процес інтенсивного пароутворення не тільки з вільної поверхні, але й по всьому об'єму рідини всередину бульбашок пари, що утворюються при цьому. Кипіння починається за умови:

$$P_n \geq P_{зовн} \ ,$$

$$P_{зовн.}=(P_0+\rho gh+\frac{2\sigma}{r}) \ ,$$

де $P_n$ – тиск насиченої пари в середині бульбашки радіуса $r$, $P_{зовн.}$ – зовнішній тиск на бульбашку.

Знову розгляньмо дно каструлі. У стані спокою тиск визначають за формулою (3), а під час обертання води – за співвідношенням (1) (залежно від координати $x$, тиск в одних точках зменшився, а в інших – збільшився). Вважаймо, що воду привели в стан обертання миттєво. Тому в одних ділянках рідина стане перегрітою, і там відбуватиметься інтенсивне кипіння, а в інших – вода перестане кипіти.

Детальніше розгляньмо процеси, що відбуваються в перегрітій (метастабільній) рідині за допомогою діаграми стану.

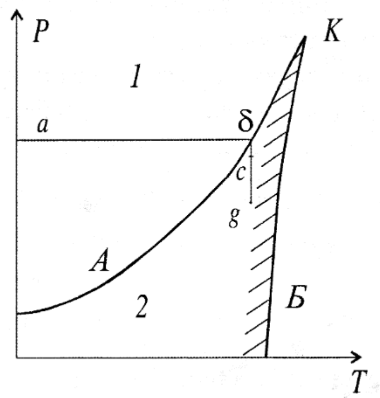



Рис. 3. *Діаграма стану води в ділянці переходу рідини в пару*
*А – крива залежності точки кипіння води від тиску; Б – межа існування перегрітої води. К – критична точка. 1 – ділянка стабільної води; 2 – ділянка перегрітої (метастабільної) води*

Вважаємо, що вода в каструлі закипає при постійному тискові. На діаграмі цей процес позначено прямою $a\delta$ (рис. 3.). Із зменшенням тиску води, вона переходить у стан перегрітої по лінії $\delta c$. Якщо зміна тиску є значною (знову ж таки залежно від $\omega$ і $R$), то вода може перейти на ділянку вибухоподібного кипіння ($\delta g$). Ділянка вибухоподібного кипіння на діаграмі стану води заштрихована. Кипіння води – це процес утворення і росту бульбашок пари на готових центрах кипіння (бульбашки повітря, поверхня каструлі). Оскільки кількість центрів відносно мала, процес кипіння зазвичай протікає спокійно. За відсутності таких центрів вода взагалі не закипить не тільки при 100 °С, але і при значно більшій. Утворення бульбашок пари в „бездефектній" рідині можливе тільки при випадковому локальному розрідженні рідини при тепловому русі її молекул (флуктуації густини). Якщо перегрів рідини незначний, то флуктуації рідини теж не значні, бульбашки пари не з'являються і ми маємо метастабільну фазу перегрітої рідини. При збільшенні перегріву зародки пари завдяки флуктуації густини виникатимуть в значній кількості по всьому об'єму рідини. Це і зумовлює вибухоподібне закипання перегрітої рідини. Вибухоподібне кипіння має характер фазового вибуху і є небезпечним. Наприклад, енергія вибуху кубометра води з температурою 300 °С еквівалентна енергії вибуху 15 кг тротилу. Це явище необхідно враховувати при експлуатації енергетичних агрегатів на теплота атомних електростанціях.

Визначімо характер руху бульбашок, які відірвались від дна посудини. На бульбашку діють сили тяжіння, Архімеда та інерції.

$$OX: \; m\ddot{x} = m\omega^2 x \Rightarrow x = x_0 \cdot e^{-\omega t} \; .$$

$$\text{OY:} \quad m\ddot{y} = \rho g V - mg \; ,$$

де $m = \frac{2}{3}\pi r^3 \rho$ – приєднана маса води, яка бере участь у русі разом з бульбашкою.

Вважаймо, що об'єм бульбашки, яка спливає, залишається сталим, хоча це далеко не так. Тому

$$y = y_0 + \frac{at^2}{2} \; .$$

Отже, бульбашка спливатиме по траєкторії:

$$y = y_0 + \frac{g}{2\omega^2} ln^2 \frac{x}{x_0} \; ,$$

де $x_0$, $y_0$ – початкові координати бульбашки. Траєкторія, по якій спливатиме бульбашка, з початковими координатами $x_0 = R, y_0 = 0$, зображена на рис. 4.

Усі бульбашки, що спливатимуть, наближатимуться до центру посудини, що підсилюватиме інтенсивність кипіння, утворюючи своєрідний гейзер.

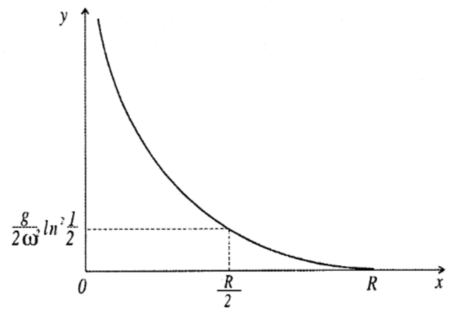



Рис. 4. *Траєкторія бульбашки пари в рідині, що обертається*

При аналізі цієї задачі ми встановили основні причини виникнення гейзера в каструлі з водою, що обертається. У „домашніх умовах" це явище зазвичай не виявляється. Його можна спостерігати лише при великих кутових швидкостях обертання і значних розмірах посудини.

**Віталій Іванов**,
*учень 11-го класу Львівського фізико-математичного ліцею*

## ІНФОРМАЦІЯ

*В Україні щорічно проводяться різні олімпіади, турніри та інші творчі змагання школярів. Зокрема проводяться турніри юних фізиків, хіміків, біологів, істориків тощо, в яких беруть участь школярі з різних регіонів України. Досвід проведення таких змагань показав, що значна кількість обдарованих школярів не можуть потрапити на ці змагання через відсутність скоординованих дій організаторів, відсутність інформації, фінансові труднощі. Для ефективного використання можливостей таких змагань у лютому 2000 року в м. Одесі під час проведення Всеукраїнського турніру юних фізиків прийнято рішення про створення Асоціації науково-інтелектуальних змагань і творчості школярів.*

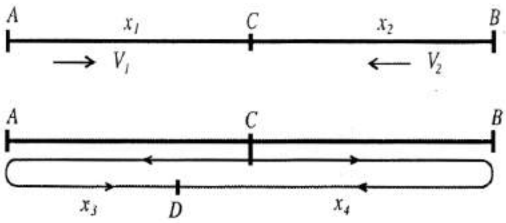
*Метою Всеукраїнської громадської організації є використання сучасних освітніх методик у роботі з обдарованими школярами, формування у них зацікавленості до пізнання та організація інтелектуальних змагань школярів.*

*Членами Асоціації можуть стати: навчальні заклади, науково-дослідні інститути, наукові товариства тощо.*

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

### *8-й клас*

**Задача 1**.



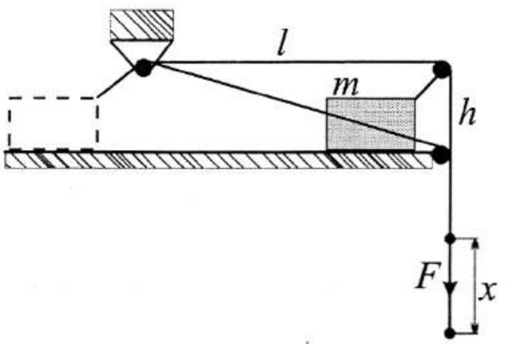

Як видно з рисунка:

$$x_1 + x_2 = L\,,\quad t = \frac{L}{v_1 + v_2}\,,$$

$$x_3 + x_4 = 2L\,,\quad t_1 = \frac{2L}{v_1 + v_2} = 2t = 2\ \text{год}\,.$$

$C$ – місце першої зустрічі, $D$ – місце другої зустрічі. Згідно з умовою задачі, жодні обмеження на швидкості накладати не потрібно.

**Задача 2**.




Робота сили $F$ приводить до зміни кінетичної енергії системи:

$$A = \Delta K\,,$$

$$A = F\,x = \frac{mv^2}{2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2F\,x}{m}}\,.$$

Як видно з рисунка:

$$x = l + h - \sqrt{l^2 + h^2}\,,$$

тоді

$$v = \sqrt{\frac{2F(l + h - \sqrt{l^2 + h^2})}{m}}\,.$$

**Задача 3**.

Нехай $r_1 < r_2$ – діаметри провідників, тоді:

$$R_1 = \rho\frac{l}{S_1} = \rho\frac{l}{\pi r_1^2} = \frac{\alpha}{r_1^2}\ ;\quad R_2 = \frac{\alpha}{r_2^2}\,.$$

Температура провідника встановлюється за умови, що уся теплота, яка виділяється в провіднику

$$Q = I^2Rt = \frac{U^2}{R}t\,,$$

буде віддана довколишньому середовищу.

$Q = \kappa(T - T_0)St$ – закон теплообміну Ньютона ($\kappa$ – коефіцієнт теплообміну, $T$, $T_0$ – відповідно температури провідника й довколишнього середовища, $S = 2\pi rl$ – площа бічної поверхні провідника, $t$ – час).

1. Розгляньмо послідовне з'єднання провідників. Умова теплової рівноваги:

$$\left.\begin{aligned} I^2R_1t &= \kappa(T_1 - T_0)2\pi r_1lt \\ I^2R_2t &= \kappa(T_2 - T_0)2\pi r_2lt \end{aligned}\right\}\,.$$

Поділимо перше рівняння на друге:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{(T_1 - T_0)r_1}{(T_2 - T_0)r_2}\,.$$

Звідси випливає, що

$$\frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0} = \frac{r_2^3}{r_1^3} > 1\,.$$

Враховано, що

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{r_2^2}{r_1^2}\,.$$

Отже, $T_1 > T_2$.

2. Розгляньмо паралельне з'єднання провідників

$$\left.\begin{aligned}\frac{U^2}{R_1}t &= \kappa(T_1 - T_0)2\pi r_1 l t\\ \frac{U^2}{R_2}t &= \kappa(T_2 - T_0)2\pi r_2 l t\end{aligned}\right\}.$$

Поділимо перше рівняння на друге:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{(T_1 - T_0)r_1}{(T_2 - T_0)r_2} \Rightarrow \frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0} = \frac{R_2 r_2}{R_1 r_1} = \frac{r_1}{r_2} < 1.$$

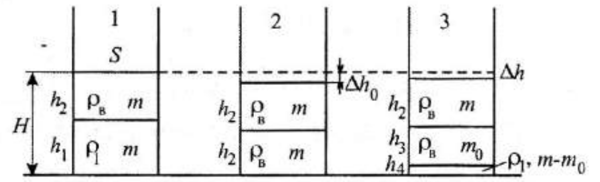
Враховано, що

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

Отже, $T_2 > T_1$.

У першому випадку розжарюватиметься тонка дротина, у другому – товста.

**Задача 4.**




1 – початковий стан системи, 2 – стан системи за умови, що весь лід розплавився, 3 – кінцевий стан системи. Зниження рівня води в посудині пов'язане з плавленням льоду при встановленні теплової рівноваги. Визначімо зміну рівня води $\Delta h_0$, за умови, що увесь лід розплавиться. З рис. 1 випливає:

$$H = \frac{m}{\rho_в S} + \frac{m}{\rho_л S}. \qquad (1)$$

З рис. 1 і 2:

$$\Delta h_0 = \frac{m}{\rho_л S} - \frac{m}{\rho_в S}. \qquad (2)$$

Поділімо (2) на (1):

$$\frac{\Delta h_0}{H} = \frac{\rho_в - \rho_л}{\rho_в + \rho_л} \Rightarrow \Delta h_0 = 0{,}8\ \text{см} > \Delta h.$$

Це означає, що не весь лід розплавився, маємо випадок зображений на рис. 3, кінцева температура системи $\Theta = 0°$ С. Нехай $m_0$ – маса льоду, що розплавився. Визначімо $m_0$

$$\Delta h = H - \left(\frac{m + m_0}{\rho_в S} + \frac{m - m_0}{\rho_л S}\right).$$

Врахувавши (1), одержимо:

$$\Delta h = \frac{m_0}{S}\left(\frac{1}{\rho_л} - \frac{1}{\rho_в}\right). \qquad (3)$$

Поділімо (3) на (1):

$$\frac{\Delta h}{H} = \frac{m_0}{m}\frac{\rho_в - \rho_л}{\rho_в + \rho_л},$$

отримаємо:

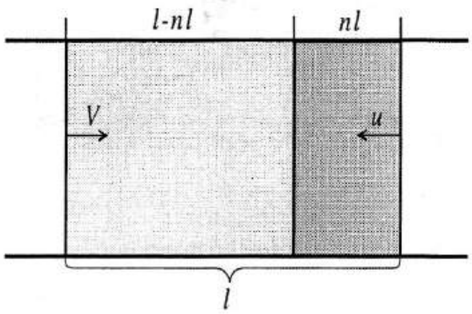
$$m_0 = m\frac{\Delta h(\rho_в + \rho_л)}{H(\rho_в - \rho_л)}. \qquad (4)$$

Запишімо рівняння теплового балансу для початкового і кінцевого станів:

$$cmt_в = \lambda m_0 = \lambda m\frac{\Delta h(\rho_в + \rho_л)}{H(\rho_в - \rho_л)},$$

$$t_в = \frac{\lambda \Delta h(\rho_в + \rho_л)}{cH(\rho_в - \rho_л)} = 38°\text{C}.$$

**Задача 5.**




Нехай за час $t$ ущільниться лід з ділянки довжиною $l$, тоді розмір ділянки води, що вкрита суцільною кригою $nl$. З рисунка видно, що

$$t = \frac{l - nl}{v} = \frac{nl}{u},$$

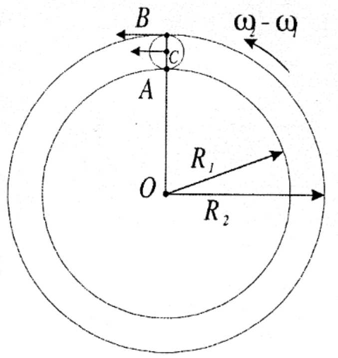
$$u = v\frac{n}{1-n} = 0{,}022\ \text{м/с}.$$

### *9 клас*

**Задача 1.**

Перейдімо в систему відліку, що обертається з кутовою швидкістю $\omega_1$. Тоді, точка $A$ ролика нерухома, швидкість точки $B$:

$$V_{B1} = (\omega_2 - \omega_1)R_2 \ ,$$




швидкість точки $C$:

$$V_{C1} = \frac{V_{B1}}{2} = \frac{(\omega_2 - \omega_1)R_2}{2} \ .$$

Кутова швидкість ролика:

$$\omega_{p1} = \frac{V_{B1}}{(R_2 - R_1)} = \frac{(\omega_2 - \omega_1)R_2}{R_2 - R_1} \ .$$

У системі відліку, пов'язаній із Землею, кутова швидкість ролика:

$$\omega_p = \omega_{p1} + \omega_1 = \frac{\omega_2 R_2 - \omega_1 R_1}{R_2 - R_1} \ ,$$

швидкість поступального руху осі ролика:

$$V_c = V_{c1} + \omega_1 \cdot OC =$$
$$= \frac{(\omega_2 - \omega_1)R_2}{2} + \omega_1 \cdot \frac{R_1 + R_2}{2} = \frac{\omega_1 R_1 + \omega_2 R_2}{2} \ .$$

а). Рух буде тільки обертальним, якщо $V_C = 0$,

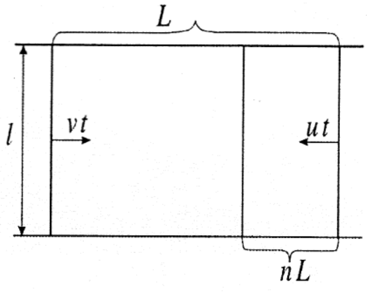
тобто $\omega_1 = -\dfrac{\omega_2 R_2}{R_1}$ .

б). Рух буде тільки поступальним, якщо $\omega_p = 0$,

тобто $\omega_1 = \dfrac{\omega_2 R_2}{R_1}$ .

**Задача 2.**

Нехай $L$ – довжина каналу, з якого ущільнюється крига за час $t$.




Тоді

$$L = ut + Vt \ , \qquad (1)$$

$$nL = ut \ . \qquad (2)$$

З (1) і (2) випливає, що

$$u = \frac{nV}{1-n} \ . \qquad (3)$$

Для інтервалу часу $t$ для криги, що зупиняється запишемо другий закон Ньютона:

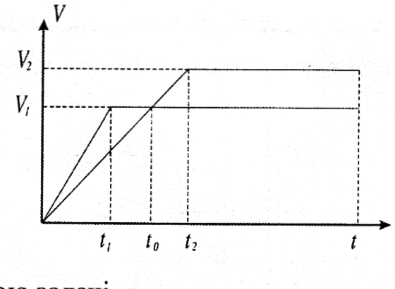
$$\vec{F}t = \Delta\vec{p} \Rightarrow Ft = mV = \rho uthlV \Rightarrow \frac{F}{l} = \frac{\rho uhlV}{l} =$$
$$= \rho h \frac{nV^2}{1-n} = 0{,}8\,\frac{\text{Н}}{\text{м}} \ .$$

**Задача 3.**

Побудуймо графіки швидкості поїздів.

$t_1, t_2$ – час рівноприскореного руху потягів,

$t_0$ – момент зустрічі, $t$ – повний час руху потягів.




За умовою задачі

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{a_2 t_2}{a_1 t_1} = \frac{4}{3} \Rightarrow \frac{a_1}{a_2} = \frac{3t_2}{4t_1} \qquad (1)$$

для моменту часу $t_0$

$$a_1 t_1 = a_2 t_2 \ . \qquad (2)$$

Враховуючи (1) і (2), отримаємо:

$$t_0 = t_1 \frac{a_1}{a_2} = \frac{3}{4} t_2 \ . \qquad (3)$$

Для моменту часу $t_0$ маємо:

$$S_1 = \frac{1}{2} v_1 t_1 + v_1 (t_0 - t_1) \ , \qquad (4)$$

$$S_2 = \frac{1}{2} v_1 t_0 \ , \qquad (5)$$

$$S_2 = S_1 + S_2 \ . \qquad (6)$$

Для моменту часу $t$ маємо:

$$S = \frac{1}{2} v_1 t_1 + v_1 (t - t_1) \ , \qquad (7)$$

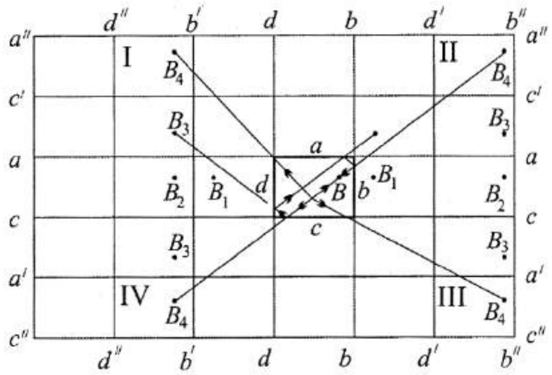
$$S = \frac{1}{2} v_2 t_2 + v_2 (t - t_2) \ . \qquad (8)$$

Розв'язуючи систему рівнянь (1 – 8), отримаємо:

$$t_1 = \frac{14}{27} t \ ; \ t_2 = \frac{8}{9} t \text{. Тоді } \frac{a_1}{a_2} = \frac{9}{7} \ .$$

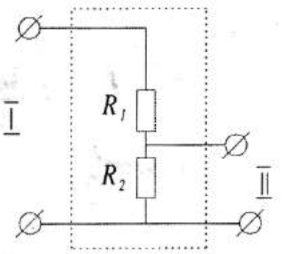
**Задача 4.**

Побудуймо зображення дзеркала $a$ у дзеркалі $c$ буде нове дзеркало $a'$, зображення дзеркала $c$ в дзеркалі $a$ – буде нове дзеркало $c'$. Побудуємо зображення дзеркала $a$ в дзеркалі $c'$ – буде дзеркало $a''$ і т. д. Отримаємо систему дзеркал $a$, $a'$, $a''$, $b$, $b'$, $b''$, $c$, $c'$, $c''$, $d$, $d'$, $d''$. Побудуймо зображення точки $B$ у дзеркалі в ($B_1$), потім зображення $B_2$ у дзеркалі $a$ (або $a'$) $B_3$. Потім зображення $B_3$ у дзеркалі $c$ (або $c'$) отримаємо зображення $B_4$. $B_4$ може знаходитись тільки в зонах I, II, III або IV, тільки в цих зонах знаходяться зображення, по одному разу отримані від кожного дзеркала, і тільки в ці зони можна потрапити, по одному разу, пройшовши через кожне дзеркало. Отже, в задачі є чотири розв'язки. Напрямки перших променів з точки $A$ йдуть в точки $B_4$ в зонах I, II, III, IV.



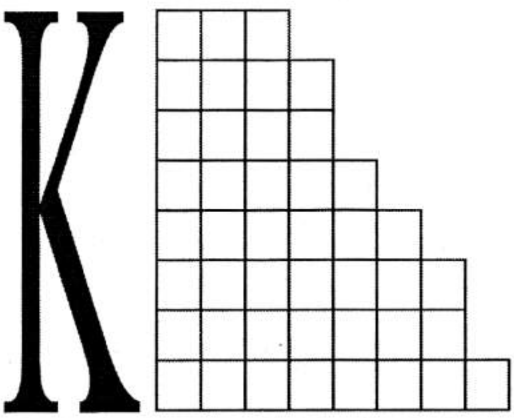

**Задача 5.**

У скриньці знаходиться подільник напруги з рівними опорами $R_1 = R_2$.



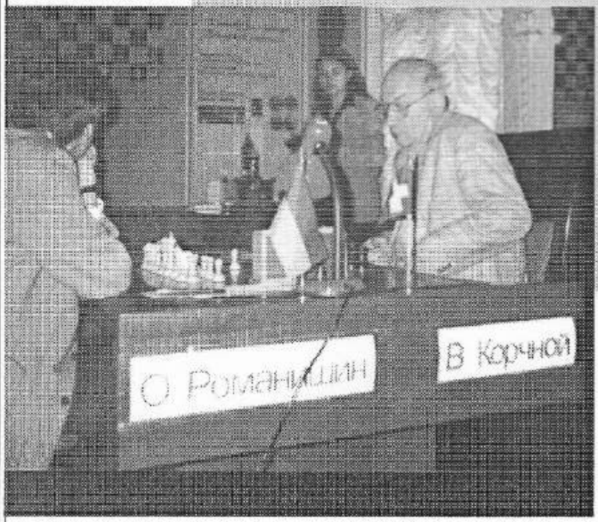

*Розв'язки підготував*
**Володимир АЛЕКСЕЙЧУК**

У незаповнені клітинки впишіть прізвища восьми учених, які розпочинаються літерою **К**.




1. Учена, яка відкрила нові радіоактивні елементи, двічі лауреат Нобелівської премії. 2. Французький учений, відомий своїми працями з електрики, магнетизму та сил тертя. 3. Французький учений, який написав працю „Роздуми про рухому силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу" 1824 року. 4. Видатний фізик, лауреат Нобелівської премії, який розробив метод одержання наднизьких температур. 5. Англійський учений, на честь якого названа одиниця вимірювання температури. 6. Англійський учений, на честь якого названа лабораторія, побудована Максвелом. 7. Видатний фізик, організатор ядерної енергетики. 8. Англійський учений, який встановив зв'язок між тиском газу, його об'ємом, масою і температурою.

# ШАХова сторінка




*Міжнародний ґросмейстер*
*Василь Іванчук*

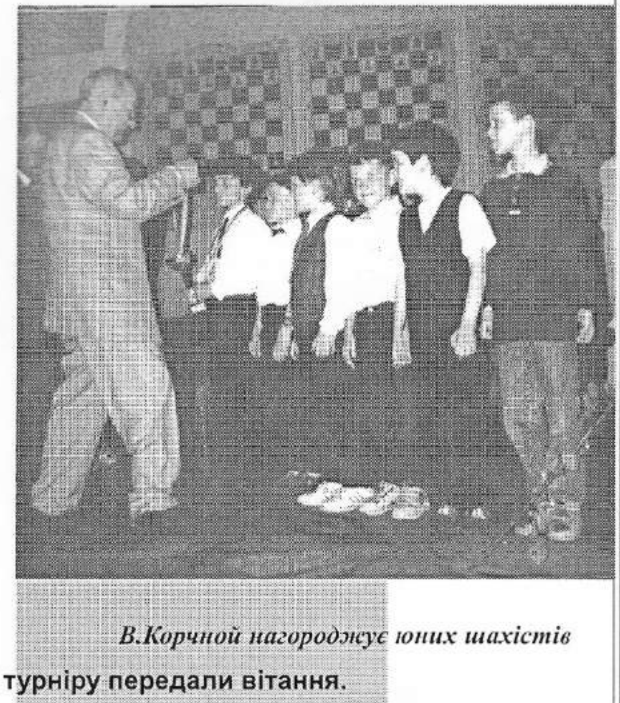
*Під час турніру:*
*партія – О.Романишин-В.Корчной*

**З 11 травня до 22 травня 2000 року у м. Львові відбулася подія світового рівня – вперше в незалежній Україні проведено міжнародний шаховий турнір пам'яті першого львівського ґросмейстера Леоніда Штейна. В ньому взяли участь відомі шахісти: Василь Іванчук (Україна), Борис Гельфанд (Ізраїль), Міхал Красенков (Польща), Віктор Корчной (Швайцарія), Олександр Белявський (Словенія), Олег Романишин (Україна), Суат Аталік (Туреччина), Олександр Чернін (Угорщина), Андрій Максименко (Україна), Марк Тайманов (Росія), Михайло Козаков (Україна), Олександр Сулипа (Україна).**

**Львівська шахова школа давно відома в усьому світі. Ще старше покоління не віддало свого місця під сонцем, про що свідчив цей турнір. На зміну відомим ґросмейстерам підростає талановита молодь. Це – Андрій Волокитін (двічі призер чемпіонату світу серед юнаків до 12 років), Катерина Лагно (чемпіонка світу серед дівчат до 10 років), Анна Музичук (двічі чемпіонка Европи серед дівчат до 10 років). Випробувана роками система проведення дитячих змагань, велика кількість здібної молоді свідчить про те, що в Україні росте нове покоління перспективних шахістів, які незабаром підхоплять шахову естафету від своїх старших колег-ґросмейстерів і ще вище піднесуть спортивний рівень України.**

**Напередодні Міжнародного турніру відбувся турнір юних шахістів, що тільки освоюють шахову грамоту. Перші в їхньому житті медалі переможці дістали з рук леґендарних ґросмейстерів Віктора Корчного, Марка Тайманова, Василя Іванчука. Сподіваємось, що цей факт стане важливою віхою в їхньому спортивному житті.**

**Перемогу в Міжнародному шаховому турнірі здобув славетний український ґросмейстер Василь Іванчук.**



*В.Корчной нагороджує юних шахістів*

**Для читачів журналу „Світ фізики" учасники турніру передали вітання.**

МИСТЕЦЬКА СТОРІНКА ЖУРНАЛУ "СВІТ ФІЗИКИ"

***І.Соколов.***
***Дівчата ворожать уночі проти Івана Купала.***
*Олія. 1860-ті рр.*
*Державний музей образотворчого мистецтва, Київ.*