

ПРОСТА
Фізика

ВОЛТЕР ЛЕВІН

за участю
Воррена Гольдштейна

ВІД АТОМНОГО ЯДРА
ДО
МЕЖІ ВСЕСВІТУ

ПРОСТА ФІЗИКА

WALTER LEWIN
with WARREN GOLDSTEIN

FOR THE LOVE OF PHYSICS

FROM THE END OF THE RAINBOW
TO THE EDGE OF TIME —A JOURNEY
THROUGH THE WONDERS OF PHYSICS

FREE PRESS · NEW YORK · 2012

ВОЛТЕР ЛЕВІН
за участю ВОРРЕНА ГОЛЬДШТЕЙНА

ПРОСТА ФІЗИКА

ВІД АТОМНОГО ЯДРА
ДО МЕЖІ ВСЕСВІТУ

*Переклала з англійської
Тетяна Сахно*

«НАШ ФОРМАТ» · КИЇВ · 2019

УДК 53-028.31(02.062)
Л36

Левін Волтер, Гольдштейн Воррен

Л36 Проста фізика. Від атомного ядра до межі Всесвіту / пер. з англ. Тетяна Сахно. — К. : Наш формат, 2019. — 296 с. : іл.
ISBN 978-617-7730-11-7 (паперове видання)
ISBN 978-617-7730-12-4 (електронне видання)

Предмет, який падає на Землю, притягує до себе планету. У ліфті ви ненадовго втрачаєте та набираєте кілограми. Коли лежите, ваш зріст більший. І чому ви досі цього не знали? Професор Волтер Левін, популяризатор фізики і талановитий викладач, не втомлюватиме вас теоріями та формулами, а проведе далі — у світ експерименту. З ним ви наново відкриєте закони Ньютона, ефект Доплера і рівняння Бернуллі та нарешті зрозумієте різницю між вагою і масою.

Волтер Левін разом із журналістом і прихильником фізики Ворреном Гольдштейном ставлять за мету показати людям красу та вишуканість фізики, а не тематичні подробиці. Перед вами розкриються неймовірні дива, завдяки яким ми живемо, але яких зовсім не помічаємо в побуті. Усе це приправлено гумором, особистими переживаннями та неймовірними дослідженнями.

Перекладено за виданням: Walter Lewin with Warren Goldstein. *For the Love of Physics: From the End of the Rainbow to the Edge of Time — A Journey Through the Wonders of Physics* (NY, Free Press, 2012, ISBN 978-1-4516-0715-0).
Credit shall be given to Free Press, a Division of Simon & Schuster, Inc., as the original publisher.

Головна редакторка *Ольга Дубчак*. Літературна редакторка *Інна Іванюк*. Науковий редактор *Сергій Шаранов*. Коректорка *Алла Кравченко*. Верстальниця *Олена Білохвост*. Дизайнерка обкладинки *Оксана Драчківська*. Технічна редакторка *Ірина Шепіна*. Випускова редакторка *Вікторія Шелест*. Художня редакторка *Оксана Гаджий*. Відповідальна за випуск *Ілона Замочна*.

Дякуємо за допомогу в підготовці видання *Ігореві Барановському*.

Надруковано в Україні видавництвом «Наш формат» у типографії «Фактор-Друк», вул. Саватурська, 51, м. Харків, Україна, 61030. Замовлення № 6803. Підписано до друку 09.08.2019. Тираж 1500 прим. Термін придатності необмежений. ТОВ «НФ», пров. Алли Горської, 5, м. Київ, Україна, 01032, тел. (044) 222-53-49, pub@nashformat.ua. Свідоцтво ДК № 4722 від 19.05.2014. Висновок Держ. сан.-епідем. експертизи № 05.03.02.-04/51017 від 16.11.2015.

Науково-популярне видання

ISBN 978-617-7730-11-7 (паперове видання)
ISBN 978-617-7730-12-4 (електронне видання)

Усі права застережено. All rights reserved
© 2011 by Walter Lewin and Warren Goldstein
© ТОВ «НФ», виключна ліцензія на видання,
оригінал-макет, 2019

Усім, хто прищепив мені любов до фізики й мистецтва.
Волтер Левін

Моєму онуку Калебу Бенджаміну Лурії.
Воррен Гольдштейн

Вступ

Високий на зріст, сухорлявий, одягнений у блакитну, схожу на робочу, сорочку із закованими по лікті рукавами, штани карго кольору хакі, у сандалях і білих шкарпетках, професор міряє кроками аудиторію, розказує, жестикулює, часом роблячи промовисті паузи й зупиняючись між дошками і лабораторним столом. Перед ним здійснюються ряди стільців із чотирма сотнями студентів, які хоч і вовтузяться на своїх місцях, але очима прикуті до професора, який, здається, ледве стримує потужну енергію, що струменить у його тілі. Своїм високим чолом, неслухняним сивим волоссям, окулярами і ледь вловимим європейським акцентом, походження якого неможливо визначити, він чимось нагадує Дока Брауна із фільму «Назад у майбутнє» — наполегливого, дивакуватого і трохи схибленого вченого-винахідника.

Але це не гараж Дока Брауна — це Массачусетський технологічний інститут (МТІ), найкращий технічний університет у Сполучених Штатах, можливо, навіть у світі, а викладач біля дошки — професор Волтер Левін. Він зупиняється й розвертається до аудиторії. «Отже, основне у вимірюваннях, про що не згадують у *жодному* підручнику із фізики, — він розмахує руками, розчепіривши пальці, — це їхня похибка». Він замовкає, ступає крок, даючи студентам час обміркувати сказане, і знову продовжує: «Результат вимірювання *не має сенсу*, якщо ви не знаєте похибки». Руки знову розлітаються, розтинаючи повітря. Ще одна пауза.

«Я повторюю. Я хочу, щоб ви згадали це, коли прокинетесь о третій ночі». Він тримає вказівні пальці біля скронь, і крутить ними, наче намагається просвердлити мозок. «Якщо ви не знаєте похибки, результат вимірювання *не має жодного сенсу*». Студенти дивляться на нього в захваті.

Ми лише на 11-й хвилині 1-ї лекції курсу «Фізика 8.01» — найвідомішого у світі університетського вступного курсу із фізики.

У грудні 2007 року New York Times розмістила на першій шпальті статтю про Волтера Левіна і назвала його інтернет-зіркою з МТІ, бо лекції з фізики, які він читав, були доступні не лише на платформі МТІ

OpenCourseWare, а й на YouTube, iTunes U та Academic Earth. Це одні з перших лекцій, які університет виклав в інтернет, і як виявилось згодом, не дарма. Вони надзвичайно популярні. Дев'яносто чотири лекції — три повні курси плюс сім окремих лекцій — щодня переглядають приблизно три тисячі людей, тобто мільйон переглядів на рік. Зокрема найактивнішим відвідувачем був не хто інший, як Білл Гейтс. Якщо вірити його листам (паперовим!) до Волтера, він повністю переглянув курси 8.01 «Класична механіка» й 8.02 «Електрика і магнетизм» і ледве міг дочекатися курсу 8.03 «Вібрації та хвилі».

«Ви змінили моє життя», — зазначено в темі листів, які Левін отримує щодня від людей різного віку з усіх куточків світу. Стів, флорист із Сан-Дієго, написав: «Я простую стрімкою ходою і споглядаю світ у барвах фізики». Мохамед, слухач інженерних підготовчих курсів з Тунісу: «На жаль, мої викладачі, на відміну від вас, не бачать жодної краси у фізиці, і я дуже страждаю через це. Їм достатньо, щоб ми просто навчилися розв'язувати “типові” задачі та успішно склали іспит, вони не дивляться далі цих вузьких меж». Сеєд з Ірану, який уже закінчив кілька магістратур в Америці, пише: «Я не мав справжньої радості в житті, поки не побачив, як ви викладаєте фізику. Професоре Левін, ви змінили моє життя. Ваше викладання варте в 10 разів більше, ніж коштує навчання, і перетворює ДЕЯКИХ, не всіх, учителів на злочинців. Учити погано — ТЯЖКИЙ ЗЛОЧИН». Або Сіддхартх з Індії: «Я зміг відчути фізику за межами рівнянь. Ваші студенти, як і я, завжди пам'ятатимуть вас як чудового вчителя, який зробив життя і навчання значно цікавішим, ніж можна собі уявити».

Мохамед захоплено і схвально цитує слова Волтера Левіна з останньої лекції «Класичної механіки»: «Можливо, з моїх лекцій ви навіки засвоїте, що фізика може бути надзвичайно цікавою та красивою і що вона оточує нас усюди, постійно. Потрібно тільки навчитися бачити та розуміти її красу». Ще одна прихильниця, Марджорі, написала: «Я дивлюся ваші лекції так часто, як можу, інколи п'ять разів на тиждень. Я зачарована вами, вашим почуттям гумору, але найбільше — вашим умінням пояснювати складні речі просто. У школі я ненавиділа фізику, але завдяки вам полюбила її».

Левін одержує десятки подібних листів щотижня і на кожен дає відповідь.

Коли Волтер Левін знайомить нас із дивами фізики, це наче чари. У чому його секрет? «Я показую людям їхній власний світ, — каже він, — світ, який вони добре знають, але на який не дивляться очима фізика — поки що. Якщо я розповідаю про хвилі на воді, то прошу студентів здійснити кілька дослідів у ванні: їм це буде зрозуміліше. Їм зрозумілі веселки. Це одна із причин, чому я люблю фізику: за її допомогою можна пояснити будь-що. І часом це неймовірний досвід — і для них, і для мене. Я закохую їх у фізику! Іноді, коли студенти серйозно втягуються, лекції стають дуже схожими на імпровізовану виставу».

Він може залізти на п'ятиметрову драбину й пити журавлинний сік з лабораторної склянки, що стоїть на підлозі, крізь довгу звивисту трубочку, виготовлену з тонкого шланга. Або наражати на небезпеку своє здоров'я, стаючи на шляху невеликої, але досить важкої кулі, що розгойдується, не доходячи кількох міліметрів до його підборіддя. Він може стріляти з рушниці по двох банках з-під фарби, наповнених водою, або наелектризувати себе до 300 000 вольтів за допомогою масивного пристрою під назвою генератор Ван де Граафа — наче в лабораторії божевільного вченого з науково-фантастичних фільмів — і тоді його й так скуйовджене волосся стає дибки. Він використовує своє тіло як обладнання для дослідів. Як він часто каже: «Адже наука вимагає жертв». Під час однієї демонстрації він залазить на безмірно незручну металеву кулю, підвішену на мотузці, що звисає зі стелі (це те, що він називає маятником маятників), і розгойдується туди-сюди, поки студенти вголос рахують кількість коливань. І все це для того, щоб довести, що кількість коливань маятника за певний час не залежить від ваги на його кінці.

Його син Емануель (Чак) Левін, який був на кількох лекціях, пригадує: «Якось я бачив, як він вдихає гелій, щоб змінити голос. Щоб домогтися правильного ефекту — диявол криється в деталях, — він зазвичай ледь не доводить себе до стану знепритомнення». Вправний художник, Левін розкуто малює геометричні фігури, вектори, графіки, астрономічні явища і — тварин. Кілька студентів були так зачаровані тим, як він зображає пунктирні лінії, що створили кумедне відео під назвою «З найкращих ліній Волтера Левіна» (Some of Walter Lewin's Best Lines). Ролик змонтовано з уривків лекцій, на яких професор на

різних дошках креслить свої знамениті пунктирні лінії. (Відео можна переглянути тут: cutt.ly/ItLhFP).

Упевнений і харизматичний Левін — справжній оригінал, дивак, полонений фізикою. Він постійно тримає в гаманці дві пластини, що називають поляризаторами, і тому може подивитися на будь-яке джерело світла — наприклад, на ясне небо, веселку чи відображення у вікні — і за мить визначити, поляризоване воно чи ні. І той, хто опиниться з ним поруч, теж зможе це побачити.

А що за блакитні робочі сорочки він одягає? Виявляється, вони зовсім не робочі. Левін що кілька років замовляє в одного кравця в Гонконгу з десяток сорочок. Вони пошиті з бавовни найвищої якості за його мірками і побажаннями. Велику кишеню зліва зроблено для того, щоб там умістився записник. Жодних захисних вкладок у кишеню — цей фізик-артист-учитель ретельно стежить за власним стилем. Тому цікаво, чому він прикріпив найдивнішу брошку, яку можна лише уявити на викладачеві університету: пластикову яєчну. Він каже: «Краще вже яйце на сорочці, ніж на обличчі».

Чому на його лівій руці красується масивний перстень з рожевого плексигласу? І що це за сріблясту штуку причеплено до його сорочки на рівні пупка, на яку він постійно тихцем поглядає?

Щоранку, одягаючись, Левін обирає щось із сорока перснів і тридцяти п'яти брошок, а також десятків браслетів і намист. Йому до вподоби як еkleктика (кенійські браслети з бісеру, намисто з великих шматків бурштину, пластикові брошки у вигляді фруктів), так і старовина (важкий срібний браслет із Туркменістану), дизайнерські ювелірні прикраси, а також просто божевільні й комічні речі (повстяне намисто з локричних цукерок). «Студенти почали звертати увагу, — каже він, — тому я став одягати на кожну лекцію нову прикрасу. Особливо на лекції для дітей. Вони в захваті».

А та схожа на велику шпильку для краватки штука, прикріплена до сорочки? Це особливий годинник (подарунок від друга-митця) з перевернутим догори дригом циферблатом, щоб можна було, поглядаючи вниз, непомітно стежити за часом.

Інколи здається, що Левін не зосереджений — класичний неуважний професор. Але насправді він заглиблений у роздуми над якимось фізичним питанням. Його дружина С'юзан Кауфман нещодавно

розповіла: «Коли ми їдемо в Нью-Йорк, за кермом авто завжди я. І от нещодавно я дістаю карту, не пам'ятаю навіщо, і бачу, що всі околиці штатів списані рівняннями. Він зробив це під час поїздки на минулу лекцію, поки нудився дорогою. Він весь час думає про фізику. Студенти й університет з ним двадцять чотири години на добу».

Як каже Ненсі Стібер, історикиня архітектури і його давня подруга, чи не найбільше в особистості Левіна вражає «гостра, як лазер, інтенсивність зацікавлення. Він завжди максимально поринає в обране заняття, викреслюючи 90 відсотків навколишнього світу. Зосередившись на справі, він вилучає все несуттєве, досягаючи такої інтенсивної самовіддачі, що вона породжує дивовижну радість буття».

Левін — перфекціоніст. Його увага до дрібниць межує із фанатизмом. Він не лише найкращий у світі викладач фізики, а й один з перших дослідників у сфері рентгенівської астрономії. Протягом двох десятиліть він спостерігав за субатомними й астрономічними явищами за допомогою надчутливого обладнання, призначеного для надточного вимірювання рентгенівського випромінювання. Запускаючи величезні й надтонкі повітряні кулі до верхньої межі земної атмосфери, він почав відкривати екзотичний «звіринець» астрономічних явищ, зокрема рентгенівські барстери. Його відкриття, здійснені разом з колегами, допомогли підняти завісу таємниці загибелі зір під час потужних спалахів наднових і підтвердити існування чорних дір.

Він навчився перевіряти, перевіряти і ще раз перевіряти — і це пояснює не тільки його успіх у практичній астрофізиці, а й дивовижну ясність, з якою він демонструє велич законів Ньютона, розтлумачує, чому струни скрипки так гарно звучать і чому ви втрачаєте і набираєте вагу, хоч і зовсім ненадовго, коли перебуваєте в ліфті.

Перед лекціями він завжди репетирував принаймні тричі в порожній аудиторії, востаннє — о п'ятій ранку в день лекції. «Його лекції вдаються через те, — каже астрофізик Девід Пулі, колишній студент Левіна, який працював з ним в аудиторії, — що він приділяє їм багато часу».

Коли у 2002 році кафедра фізики МТІ номінувала Левіна на престижну премію для викладачів, багато його колег зосередилися саме на цих рисах професора. Серед тих, хто найяскравіше описав

досвід навчання у Левіна, був Стівен Ліб, викладач електротехніки й інформатики в Лабораторії електромагнітних і електронних систем у МТІ, який слухав курс «Електрика і магнетизм» у 1984 році. «Він з'явився нізвідки, — пригадує Ліб, — захопив нашу уяву своїм інтелектом і посадив на американські гірки електромагнетизму, які я досі відчуваю потилицею. В аудиторії він геній, який з неперевершеною винахідливістю знаходить способи зрозуміло донести складні ідеї».

Роберт Хулсайзер, один з колег Левіна, намагався вирізати із записів його лекцій деякі демонстраційні досліди, щоб змонтувати для інших університетів відеоролик з найяскравішими моментами. Йому це не вдалося. «Його демонстрації так міцно вплетені в розкриття теми, де напруга наростає й настає розв'язка, що важко визначити точний момент початку і кінця експерименту. На мою думку, багатство Волтерової манери викладання неможливо порізати на шматочки».

Підхід Волтера Левіна зворушує тим, що він передає слухачам неймовірний захват перед усіма дивами нашого світу. Його син Чак тепло пригадує, як віддано батько прищеплював це відчуття захоплення йому й іншим дітям: «У нього талант відкривати людям очі на приголомшливу красу навколо, наповнювати вас сумішшю радості, запалу й зачудування. Я кажу про маленькі неймовірні вікна, у центрі яких він стояв. Це було таке щастя — відчувати повноту життя поруч з ним, брати участь у події, яку він створив. Якось ми були у відпустці в штаті Мен. Погода була не надто гарною, і ми, діти, просто сиділи й нудилися. Якоїсь миті батько взяв м'ячик і вигдав одну маленьку дивну гру. За хвилину прийшли діти із сусіднього пляжного будинку, і от уже ми вчотирьох, уп'ятьох, ушістьох кидаємо, ловимо і сміємося. Я пам'ятаю цей безмежний захват і радість. Коли я озираюсь і думаю про те, що рухало мною в житті, розумію, що ці миті справжньої радості, уявлення про те, яким чудовим може бути життя, який сенс воно може мати, — усе це я одержав від батька».

Узимку Волтер збирав дітей, і вони грали в іншу гру — випробовували аеродинамічні якості паперових літаків, запускаючи їх у великий відкритий камін у вітальні. «Завдаючи жаху матері, — пригадує Чак, — ми діставали їх з вогню, бо мали твердий намір перемогти наступного разу».

Коли приходили гості, Волтер головував у грі під назвою «Політ на Місяць». Чак розповідає: «Ми приглушували світло, стукали кулаками об стіл, видобуваючи щось на зразок барабанного дробу та імітуючи звук запуску ракети. Деякі діти навіть залазили для цього під стіл і гупали. Потім, вийшовши в космос, ми переставали грюкати, і щойно приземлялися на Місяці, починали ходити по вітальні підкреслено чудернацькими кроками, вдаючи, що сили тяжіння майже немає. Гості тим часом, напевно, думали: “Ці люди несповна розуму!”. Але для нас, дітей, це була фантастика. Політ на Місяць!».

Волтер Левін дарує студентам незабутні враження, відколи він уперше зайшов в аудиторію більше ніж півстоліття тому. Постійно зачарований загадковістю і красою Всесвіту — від веселок і нейтронних зір до мишачої кісточки і звуків музики, — а також натхнений спробами науковців і митців пояснити світобудову, інтерпретувати й зобразити її, Волтер Левін — один з найпристрасніших, найвідданіших і найталановитіших з нині живих гідів по цьому світу. Ви зможете відчувати цю пристрасть, віддачу й талант у наступних розділах, де він поділиться своєю давньою любов'ю до фізики з вами. Приємної вам подорожі!

Воррен Гольдштейн

Розділ 1

Від атомного ядра до глибокого космосу

Це справді дивовижно. Батько моєї матері був неписьменним — сторожем. Минуло два покоління, і я вже професор МТІ. Мені багато дала голландська система освіти. Я вступив до аспірантури Делфтського технічного університету в Нідерландах, і одним пострілом убив трьох зайців.

Я одразу почав викладати фізику. Щоб оплатити навчання, мені довелося взяти позику в уряді Нідерландів на умовах щорічного списання її п'ятої частини, якщо я викладатиму повний робочий день, тобто щонайменше двадцять годин на тиждень. Іншою перевагою викладання було звільнення від армії. Військова служба — це найгірше, що могло зі мною статися, цілковита *катастрофа*. Я не терплю влади в будь-яких виявах. Такий маю характер. Рано чи пізно я почав би скаржитися, й мене б відправили драїти підлогу. Тому я двадцять дві години на тиждень викладав математику й фізику шістнадцятирічним-сімнадцятирічним учням у ліцеї Лібанон у Роттердамі. Я уникнув армії, міг не сплачувати частину позики і здобував докторський ступінь — і все це одночасно.

Також я навчився викладати. Мене захоплювала можливість навчати старшокласників, позитивно впливати на свідомість молоді. Я намагався робити заняття цікавими й веселими, хоча правила в самому ліцеї панували досить суворі. Над дверима кожного класу було зроблено невеликі віконця, і часом хтось зі шкільного керівництва вибирався на стілець і шпигував через нього за вчителями. Уявляєте?

Мене не засмоктала шкільна культура і, навчаючись в аспірантурі, я був сповнений ентузіазму. Я хотів передати цей запал учням, допомогти їм по-новому побачити красу навколишнього світу, вплинути на їхнє сприйняття і показати, що світ фізики прекрасний і що вона всюди, що вона пронизує наше життя. Я зрозумів, що має значення не матеріал, який ти *охоплюєш* під час викладання, а як ти його *подаєш*. Висвітлення теми в класі може бути нудним заняттям, і учні це одразу відчувають. З іншого боку, пояснюючи фізичні закономірності й показуючи учням, що криється за рівняннями, я

демонструю процес пошуку з усією його новизною і захопленням, і учні обожають брати в цьому участь.

Також я мав нагоду робити це, хоч і в інший спосіб, за межами класу. Щороку учні з учителем могли на тиждень поїхати в скромно облаштований кемпінг у досить відлюдному місці; поїздку фінансувала школа. Ми з моєю дружиною одного разу з'їздили, і нам дуже сподобалось. Усі готували їжу разом і спали в наметах. Оскільки ми були далеко від вогнів міста, якось уночі ми розбудили дітей, дали їм гарячого шоколаду і повели дивитися на зорі. Ми шукали сузір'я і планети, і вони змогли побачити Чумацький Шлях у всій красі.

Я не вивчав і навіть не викладав астрофізику (взагалі-то я розробляв експерименти, що мали на меті виявити одні з найменших частинок у Всесвіті), але астрономія завжди зачаровувала мене. Насправді ледь не кожен фізик, який ходить по Землі, захоплюється астрономією. Багато моїх знайомих фізиків у старших класах сконструювали власні телескопи. Мій давній друг і колега по МТІ Джордж Кларк у школі відшліфував і відполірував 15-сантиметрове дзеркало для телескопа. Чому фізики так люблять астрономію? Насамперед тому, що багато досягнень у фізиці (наприклад, теорії руху небесних тіл уздовж орбіти) випливає із запитань, які ставили астрономи, їхніх спостережень і теорій. Крім того, астрономія — це і є фізика, її збільшена версія на нічному небі: затемнення, комети, метеори, кулясті скупчення, нейтронні зорі, гамма-спалахи, джети (струмені), планетарні туманності, наднові, скупчення галактик, чорні діри.

Просто подивіться на небо і поставте собі кілька очевидних запитань: Чому небо блакитне? Чому захід Сонця червоний? Чому хмари білі? Фізика знає відповіді. Сонячне світло має всі кольори веселки. Але проходячи крізь атмосферу, воно розсіюється в різних напрямках, відбиваючись від молекул повітря і крихітних частинок пилу (набагато менших за мікрон, тобто 0,001 міліметра). Це явище має назву релєївське розсіювання. Блакитне світло розсіюється найсильніше, приблизно в п'ять разів більше, ніж червоне. Отже, якщо ви вдень поглянете на будь-яку точку неба¹, блакитний колір переважатиме. Тому небо блакитне. Якщо подивитися на небо з Місяця (можливо, ви бачили фотографії), воно буде не блакитним, а

чорним — яким ми його бачимо вночі. Чому? Тому що Місяць не має атмосфери.

Чому захід Сонця червоний? Із тієї самої причини, чому небо блакитне. Коли Сонце біля горизонту, його променям потрібно подолати більшу відстань в атмосфері, і зелене, блакитне і фіолетове світло розсіюється найбільше і, по суті, відфільтровується. На ту мить, коли світло досягає наших очей (і хмар над нами), воно складається здебільшого із жовтого, оранжевого, а особливо — червоного кольорів. Саме тому іноді, коли Сонце заходить і на світанку, здається, що небо палає.

Чому хмари білі? Краплини води у хмарах значно більші за крихітні частинки, через які небо здається блакитним, і коли світло відбивається від них, усі кольори розсіюються однаково. Через це світло залишається білим. Але якщо хмара дуже наповнена вологою або перебуває в тіні іншої хмари, вона пропускатиме мало світла і стане темною.

Один з моїх улюблених дослідів-демонстрацій — створювати клаптик «блакитного неба» в аудиторії. Я вимикаю освітлення і спрямовую на стелю біля дошки дуже яскравий прожектор, захищений екраном. Потім запалюю кілька сигарет і тримаю їх у світлі прожектора. Частинки диму достатньо маленькі, щоб виникло релєївське розсіювання, а оскільки блакитне світло розсіюється найбільше, студенти бачать блакитний дим. Тоді переходжу до другої частини досліду. Я вдихаю дим і затримую його майже на хвилину — це не завжди легко, але наука часом вимагає жертв. Потім я видихаю дим у світло прожектора. Тепер студенти бачать білий дим — я створив білу хмару! У легенях багато водяної пари, тому крихітні частинки диму збільшились. Тепер усі кольори розсіюються однаково, і розсіяне світло сприймається як біле. Це дивовижно, як дим змінює колір: із блакитного стає білим.

Цим експериментом я можу відповісти одразу на два запитання: чому небо блакитне і чому хмари білі. Взагалі-то, є ще дуже цікаве третє запитання, і воно пов'язане з поляризацією світла. Про це йтиметься в розділі 5.

Коли я був зі своїми учнями за містом, я показував їм галактику Андромеди, єдину галактику, яку можна побачити неозброєним оком.

Відстань до неї приблизно 2,5 мільйона світлових років (24 мільйони трильйонів кілометрів), що за астрономічними мірками майже поруч. Ця галактика складається з приблизно 200 мільярдів зір. Тільки уявіть — 200 мільярдів зір, а нам вона здалася ледь помітною розмитою плямою. Також ми помітили багато метеорів, які часто називають летючими зорями. Якщо озброїтися терпінням, їх можна побачити приблизно кожні чотири-п'ять хвилин. Тоді ще не було супутників, але зараз ви побачите і їх у великій кількості. Навколо Землі кружляє понад 2000 супутників, і якщо впродовж п'яти хвилин дивитися на небо не відводячи погляду, то найімовірніше ви побачите один з них, особливо одразу після заходу Сонця або перед світанком, коли воно ще не сіло або вже зійшло над супутником і сонячне світло досі відбивається від нього. Що далі супутник і, відповідно, що більша різниця в часі між заходом Сонця на Землі і на супутнику, то пізніше його можна побачити. Супутники легко розпізнати за швидкістю їх руху: вона найвища за будь-які тіла на небі (не враховуючи метеорів). Якщо щось мерехтить, повірте — це літак.

Коли ми дивилися на зорі, я особливо любив показувати Меркурій. Це найближча до Сонця планета, тому її дуже важко помітити неозброєним оком. На рік випадає лише два десятки вечорів і ранків, коли умови найсприятливіші. Меркурій обертається навколо Сонця лише за 88 днів, тому його й назвали на честь прудкононогого римського бога-провісника. А побачити цю планету так складно тому, що її орбіта лежить дуже близько від Сонця. Якщо спостерігати за Меркурієм із Землі, він ніколи не відхиляється від Сонця більше ніж на 25 градусів — це менше, ніж кут між обома стрілками годинника об одинадцятій годині. Меркурій можна побачити лише невдовзі після заходу Сонця і перед світанком у дні, коли він максимально далеко від світила, якщо спостерігати із Землі. У Сполучених Штатах він завжди перебуває низько над горизонтом. Зазвичай Меркурій можна углядіти хіба що за містом. Але як чудово, коли все-таки вдається його відшукати!

Спостерігаючи за зорями, ми наближаємося до розуміння безмежності Всесвіту. Якщо досить довго вдивлятися в нічне небо і дозволити очам звикнути, ми можемо побачити надструктуру віддалених ділянок нашої Галактики, Чумацького Шляху — від 100 до

200 мільярдів зір, які утворюють щось схоже на тонку прозору тканину. Розміри Всесвіту немислимі, але для початку спробуйте уявити собі Чумацький Шлях.

За нинішніми оцінками, у Всесвіті може бути стільки галактик, скільки зір у нашій Галактиці. По суті, спрямовуючи телескоп у глибокий космос, ми бачимо здебільшого галактики (на величезних відстанях окремі зорі розрізнити неможливо), і кожна з них складається з мільярдів зір. Або погляньте на нещодавно відкриту Велику стіну галактик — найбільшу структуру у відомому Всесвіті. Її карту було складено в межах Слоанівського цифрового огляду неба (Sloan Digital Sky Survey) — масштабного проекту, до якого залучили понад триста астрономів та інженерів і двадцять п'ять університетів та дослідних установ. Спеціально збудований телескоп здійснював спостереження щоночі починаючи від 2000-го і до кінця 2014 року. Довжина Великої стіни становить понад мільярд світлових років. Голова вже йде обертом? Якщо ні, то врахуйте, що розміри видимого Всесвіту (тобто лише тієї його частини, яку ми можемо спостерігати) приблизно *90 мільярдів світлових років*.

У цьому полягає сила фізики: вона може сказати, що доступний нашому огляду Всесвіт утворено з приблизно 100 мільярдів галактик. Вона також може сказати, що лише 4 відсотки всієї матерії в нашому видимому Всесвіті — це звичайна матерія, з якої складаються зорі, галактики і ми з вами. Близько 23 відсотків припадає на те, що називають темною матерією (вона невидима). Ми знаємо, що вона існує, але не знаємо, що це. Решта 73 відсотки, тобто основна частина енергії у Всесвіті, яку називають темною енергією, також невидима. І так само ніхто не має уявлення, що це таке. Суть у тому, що нам не відома природа майже 96 відсотків маси/енергії у Всесвіті. Фізика вже стільки всього пояснила, але багато таємниць досі не викриті, і це, як на мене, дуже надихає.

Фізика досліджує неосяжне, але водночас заглиблюється в мікроскопічні світи, до найдрібніших частинок матерії, наприклад нейтрино, яке в багато разів менше за протон. Саме тут, у сфері крихітного, я проводив більшість часу на початку наукової кар'єри, вимірюючи і фіксуючи вивільнення частинок і випромінювання з радіоактивних ядер. Це була ядерна фізика, але не та, що створює

ядерні бомби. Я досліджував, що визначає природу матерії на найбазовішому рівні.

Ви, мабуть, знаєте, що майже вся матерія, яку ви бачите і якої торкаєтесь, складається з елементів, наприклад водню, кисню й вуглецю, поєднаних у молекули, і що найменша частинка елемента — це атом, який складається з ядра й електронів. Ядро, як пригадуєте, складається із протонів і нейтронів. Водень, найлегший і найпоширеніший елемент у Всесвіті, має один протон і один електрон. Але існує форма водню, ядро якого крім протона містить ще й нейтрон. Це ізотоп водню — інша форма того самого елемента. Він має назву дейтерій. Існує навіть третій ізотоп водню, в ядрі якого протон об'єднується із двома нейтронами. Він має назву тритій. Усі ізотопи певного елемента мають однакову кількість протонів, але різну кількість нейтронів, і в кожного елемента різна кількість ізотопів. Наприклад, у кисню тринадцять ізотопів, а в золота тридцять шість.

Багато ізотопів стабільні, тобто можуть існувати вічно. Але більшість нестабільні, або, інакше кажучи, радіоактивні. Радіоактивні ізотопи розпадаються, тобто вони рано чи пізно перетворюються на інші елементи. Ці елементи можуть бути стабільними (і тоді радіоактивний розпад припиняється), але можуть бути й нестабільними, і в такому разі розпад триватиме, доки елемент не досягне стабільного стану. Із трьох ізотопів водню радіоактивний тільки тритій — він розпадається до стабільного ізотопу гелію². Із тринадцяти ізотопів кисню стабільні три. Із тридцяти шести ізотопів золота стабільний лише один.

Як ви, мабуть, пам'ятаєте, швидкість розпаду радіоактивних ізотопів характеризується їхнім періодом піврозпаду, який може варіюватися від мікросекунди (одна мільйонна секунди) до мільярдів років. Коли ми кажемо, що період піврозпаду тритію приблизно дванадцять років, це значить, що за дванадцять років у певному зразку тритію розпадеться половина ядер (за двадцять чотири роки залишиться тільки чверть). Ядерний розпад є надзвичайно важливим процесом, бо завдяки йому відбувається перетворення і виникнення нових елементів. Це не алхімія. Насправді, працюючи над докторською дисертацією, я часто спостерігав, як радіоактивні ізотопи золота перетворюються на ртуть, а не навпаки — на превеликий жаль середньовічних алхіміків. Утім багато ізотопів ртуті та платини таки

перетворюються на золото. Але стабільне золото, яке можна носити на пальці як перстень, отримують тільки з одного ізотопу платини й одного ізотопу ртуті.

Робота була безмежно цікава: радіоактивні ізотопи розпадалися буквально в моїх руках. І це вимагало значних зусиль. Ізотопи, з якими я працював, мали здебільшого короткий період піврозпаду — від одного до кількох днів. Наприклад, період піврозпаду золота-198 — трохи більше двох із половиною днів, тому працювати треба було швидко. Я їхав із Делфта в Амстердам, де в циклотроні створювали ці ізотопи, і мчав назад у лабораторію. Там я розчиняв ізотопи в кислоті, щоб перетворити їх у стан рідини, наносив на дуже тонку плівку і поміщав у детектори.

Я намагався підтвердити теорію, за допомогою якої можна обчислити співвідношення інтенсивності гамма-випромінювання до інтенсивності потоку електронів, які випромінює ядро під час розпаду. І ця робота вимагала точних вимірювань. На той момент таке вже робили з багатьма радіоактивними ізотопами, але було отримано результати вимірювань, що відрізнялися від теоретично обчислених значень. Мій науковий керівник, професор Аалдерт Вапстра, запропонував мені спробувати визначити, в чому проблема — у теорії чи у вимірюваннях. Ця робота дарувала надзвичайне задоволення, як під час збирання складного пазлу з безлічі фрагментів. Складність завдання полягала в тому, щоб отримати значно точніші результати, ніж ті, що були одержані до мене.

На думку деяких дослідників, електрони такі маленькі, що не мають розміру (їхній діаметр менше однієї квадрильйонної сантиметра), а довжина гамма-хвилі — менше ніж одна мільярдна сантиметра. Проте фізика дала мені засоби, щоб виявити їх і виміряти. Це ще одна річ, яка мені подобається в експериментальній фізиці: вона дає змогу «торкнутися» невидимого.

Щоб отримати потрібні дані, мені доводилося витискати зі зразка все можливе, адже що більше вимірювань, то точніший результат. Часто я працював ледь не по дві з половиною доби поспіль, нерідко без сну. Я став трохи одержимим.

Для експериментального фізика точність — це ключ до всього. Точність — *єдине*, що має значення. Результат вимірювання не має

сенсу, якщо не вказано його похибки. Цю просту, потужну, багато в чому основоположну ідею майже завжди ігнорують в університетських підручниках із фізики. У житті часто виникають ситуації, коли ступінь точності відіграє вирішальну роль.

Коли я працював з радіоактивними ізотопами, домогтися потрібної точності було вкрай складно, але за три-чотири роки я поступово покращив результат. Детектори стали надзвичайно точними, після того як я їх удосконалив. Я підтвердив теорію та опублікував результати, і врешті-решт ця робота лягла в основу моєї докторської дисертації. Особливо мене тішило, що мої результати поставили крапку в цьому питанні, а таке стається не дуже часто. У фізиці, та й узагалі в науці, результати не завжди трактуються однозначно. Мені пощастило дійти до остаточного висновку. Я зібрав цей пазл, зажив слави в наукових колах і допоміг скласти карту невідомої ділянки субатомного світу. Мені було двадцять дев'ять, і я був у захваті від того, що роблю вагомий внесок у науку. Не всім судилося здійснити основоположні відкриття, як Ньютону й Ейнштейну, але ми досі маємо безмежний простір для досліджень.

Мені також пощастило, що коли я здобув науковий ступінь, саме розпочиналася нова епоха у вивченні природи Всесвіту. Астрономи здійснювали відкриття з неймовірною швидкістю. Хтось вивчав атмосферу Марса й Венери, шукаючи водяну пару. Хтось помітив кільця заряджених частинок навколо силових ліній магнітного поля Землі, які стали називати поясами Ван Аллена. Інші науковці відкрили джерела радіохвиль, відомі як квазари (квазізоряні джерела радіовипромінювання). У 1965 році було виявлено мікрохвильове космічне випромінювання — сліди енергії, вивільненої під час потужного вибуху, вагомий аргумент на користь теорії Великого вибуху, навколо якої тоді точилися запеклі суперечки. Невдовзі після того, у 1967 році, астрономи відкрили новий різновид зір, які назвали пульсарами.

Звісно, я міг би й далі працювати в ядерній фізиці, адже там також відбувалося багато відкриттів. Робота здебільшого полягала в полюванні на субатомні частинки, чий «зоопарк» швидко зростав. Особливу увагу привертала частинки під назвою кварки, з яких, як з'ясувалося, складаються протони і нейтрони. Кварки такі незвичайні,

що фізики, щоб їх класифікувати, придумали для них особливу характеристику — так званий «аромат»: верхній (up), нижній (down), дивний (strange), чарівний (charm), топ-кварк (top) і ботом-кварк (bottom). Відкриття кварків було одним із тих прекрасних моментів у науці, коли суто теоретична гіпотеза підтвердилася. Теоретики передбачили існування кварків, а потім їх виявили експериментально. Ці незвичайні частинки показали, що матерія значно складніша, ніж ми вважали. Наприклад, зараз відомо, що протон складається із двох верхніх кварків і одного нижнього, з'єднаних потужною ядерною взаємодією, носіями якої є інші дивні частинки — глюони. За нещодавніми підрахунками, маса верхнього кварка може становити приблизно 0,2 відсотка маси протона, тоді як маса нижнього — приблизно 0,5 відсотка маси протона. Це вам не старе звичне ядро атома.

Я переконаний, що «звіринець» частинок став би для мене захопливим полем для досліджень, але завдяки щасливому випадку навички вимірювання випромінювання з атомних ядер виявилися надзвичайно корисними для вивчення космосу. У 1965 році я отримав запрошення від професора Бруно Россі з Массачусетського технологічного інституту взяти участь у проекті в галузі рентгенівської астрономії. Це був цілком новий напрям, який існував лише кілька років — Россі започаткував його в 1959-му.

МТІ — це найкраще, що могло зі мною статися. Россі вже був легендою в дослідженні космічного випромінювання. Під час війни він очолював дослідницьку групу в лабораторії Лос-Аламоса й розробив методи вимірювання сонячного вітру, або міжпланетної плазми — потоку викинутих Сонцем заряджених частинок, що викликає північне сяйво й «відганяє» від Сонця хвосту комет. Тепер у Россі виникла ідея пошукати в космосі рентгенівські промені. Це був експеримент — він не мав жодного уявлення, знайде щось чи ні.

У ті часи в МТІ дозволялося все. Можна було працювати над чим завгодно — якщо ви переконали інших, що вашу ідею реально втілити. Зовсім не так, як у Нідерландах. У Делфтському інституті панувала жорстка ієрархія: до аспірантів ставилися як до нижчого класу. Якщо професори мали ключі від головного входу в корпус, то аспіранти отримували тільки ключі від підвалу, де зберігалися велосипеди.

Щоразу як ви змушені були пробиратися крізь відсіки з велосипедами, вам нагадували, що ви *ніхто*.

Якщо ви хочете працювати після п'ятої, маєте до четвертої заповнити форму з поясненням, чому вам потрібно затриматися на роботі; мені доводилося робити це ледь не щодня. Бюрократія породжувала страшенні незручності.

За трьома професорами, які очолювали інститут, було зарезервовано паркувальні місця неподалік від головного входу. Один з них, мій науковий керівник, працював в Амстердамі та приїжджав у Дефлт лише раз на тиждень, у вівторок. Якось я його запитав: «Ви не проти, якщо я ставитиму авто на ваше місце, коли вас немає?». Він відповів: «Звісно, не проти», але першого ж дня, коли я там припаркувався, через систему зв'язку мені вельми переконливо наказали забрати машину. Ще один приклад. Я мусив їздити в Амстердам по ізотопи, тому мені видавали 25 центів на чашку кави й 1 гульден 25 центів на обід (тоді це відповідало приблизно третині долара США), але я мав надати два окремих чеки. Я запитав, чи можна додати 25 центів до чека за обід і подати тільки один чек на 1 гульден 50 центів. Завідувач кафедри професор Блейссе написав мені листа, в якому зазначив, що якщо я хочу, то можу їсти вишукані страви за власний рахунок.

Яка це була радість перейти працювати в МТІ та звільнитися від усього цього! Я наче вдруге народився. Там нас усіляко заохочували. Я отримав ключ від головних дверей і міг працювати у своєму кабінеті вдень і вночі, як і хотів. Той ключ від корпусу був для мене ключем від усього. Завідувач кафедри фізики запропонував мені посаду штатного викладача через півроку після мого приїзду, у червні 1966-го. Я погодився і залишився там.

Перехід у МТІ викликав у мене таке піднесення ще й тому, що я пережив Другу світову війну. Нацисти вбили половину моєї родини, і я досі не змірився із цією трагедією. Часом я все-таки про це говорю, але дуже рідко, тому що для мене це невимовно важко — минуло вже понад сімдесят років, а почуття досі гнітючі. Коли ми з моєю сестрою Беа говоримо про це, майже завжди плачемо.

Я народився в 1936 році, і коли Німеччина 10 травня 1940 року напала на Нідерланди, мені було лише чотири. Один з моїх найбільш ранніх спогадів, як ми всі — батьки моєї матері, мати, батько, моя

сестра і я — переховуємося у ванній нашого будинку (на Амандельстраат, 61, у Гаазі), коли в мою країну входить військо нацистів. Ми дихали крізь вологі носовички, оскільки були попереджені про можливу газову атаку.

У 1942 році голландська поліція забрала моїх єврейських дідуса й бабусю Густава Левіна й Емму Левін-Готтфельд з їхнього будинку. Приблизно тоді ж вони витягли з дому сестру мого батька Юлію, її чоловіка Якоба (на прізвисько Єнно) і трьох їхніх дітей — Отто, Руді та Еммі, посадили їх із валізами у вантажівки й відрядили у Вестерборк — транзитний табір у Голландії. Через Вестерборк на шляху до інших таборів пройшло більше 100 000 євреїв. Дідуса й бабусю нацисти одразу відправили в Аушвіц, де їх першого ж дня, 19 листопада 1942 року, вбили в газовій камері. Дідусю було сімдесят п'ять, як і бабусі, тому вони не годилися для примусової праці у трудових таборах. Вестерборк, навпаки, був дуже дивним місцем. Він нагадував курорт для євреїв. Там ставили балетні вистави і працювали магазини. Мати часто пекла картопляні оладки й надсилала їх посылкою у Вестерборк нашим родичам.

Дядько Єнно був, як кажуть голландці, *statenloos*, тобто особою без громадянства, тому зміг трохи потягти час і перебути з родиною у Вестерборку п'ятнадцять місяців, поки нацисти не розлучили їх, відрядивши в різні табори. Тітка Юлія, кузени Еммі та Руді потрапили спершу в жіночий концентраційний табір Равенсбрюк у Німеччині, а потім — у Берген-Бельзен, також у Німеччині, де вони були до кінця війни. Тітка Юлія померла через десять днів після того, як союзники визволили табір, а Еммі та Руді вижили. Найстаршого кузена Отто також відправили в Равенсбрюк у чоловічий табір, а під кінець війни він опинився в концентраційному таборі в Заксенгаузені. Він пережив марш смерті у квітні 1945 року. Дядька Єнно відрядили одразу в Бухенвальд, де його було вбито, як і понад 55 000 інших в'язнів.

Щоразу, коли я дивлюся фільм про Голокост, чого я дуже довго не хотів робити, я порівнюю події на екрані з тим, що відбулося в моїй родині. Тому мені було надзвичайно важко, навіть образливо, дивитися фільм «Життя прекрасне». У моїй голові просто не вкладалося, як можна жартувати про такі серйозні речі. Я досі час від часу бачу у снах жахи, як за мною женуться нацисти, і я прокидаюся

переляканий до смерті. Одного разу мені наснилося, що мене стратили.

Якось я хотів би пройти тим шляхом, який став останнім у житті моїх дідуся й бабусі, — від залізничної станції до газових камер в Аушвіці. Не знаю, чи зроблю я це колись, але думаю, що це один зі способів ушанувати їхню пам'ять. Можливо, маленькі вчинки — це все, що ми можемо протиставити жахінням такого масштабу. Крім того, ми повинні пам'ятати: я ніколи не кажу, що члени моєї сім'ї «загинули» в концтаборах. Я завжди говорю «були вбиті», щоб не дозволити приховати правду.

Мій батько був євреєм, але мати — ні, тому його, як чоловіка неєврейки, спочатку не переслідували. Але це сталося в 1943 році. Пригадую, він повинен був носити жовту зірку. Ні мати, ні сестра, ні я — тільки він. Ми не надали цьому значення, принаймні спершу. Він її трохи прикривав одягом, що заборонялося. Насправді лякало те, як він призвичаювався до нацистських обмежень, які ставали дедалі жорсткішими. Спочатку йому заборонили користуватися громадським транспортом. Потім — відвідувати міські парки. Згодом — бувати в ресторанах. Він став небажаним гостем у закладах, куди постійно ходив роками! А найдивовижніше в цьому — здатність людини пристосовуватися.

Коли він більше не міг користуватися громадським транспортом, то казав: «Хіба я часто їжджу у громадському транспорті?». Коли його перестали пускати в парки, він казав: «Хіба я так часто ходжу в парк?». Потім, коли він уже не міг піти в ресторан, він казав: «Хіба я часто вечеряю в ресторані?». Він намагався перетворити ці жахливі речі на дрібниці, невеликі незручності, можливо, заради дітей, а може, ще й для власного душевного спокою. Я не знаю.

Для мене це досі одна з найважчих тем. Як можна спостерігати за прибуванням води і не усвідомлювати, що вона тебе потопить? Як вони могли бачити й водночас не бачити? Це те, чого я не можу збагнути. Звісно, якоюсь мірою це цілком зрозуміло. Можливо, це єдиний спосіб вижити, доки вам ще вдається обманюватися.

Хоч нацисти й заборонили євреям відвідувати міські парки, моєму батькові було дозволено ходити на кладовища. Навіть зараз я пригадую наші численні прогулянки на цвинтарі неподалік. Ми

намагалися уявити, як і чому померли члени родин, — часом у чотирьох людей значилася одна дата смерті. Я й досі так роблю, коли прогулююся знаменитим кладовищем Маунт Оберн у Кембриджі.

Найбільше потрясіння мого дитинства — раптове зникнення батька. Я дуже добре пам'ятаю той день, коли він пішов. Я повернувся зі школи і якимось відчув, що він зник. Матері вдома не було, тому я запитав нашу няньку Лені: «Де тато?», — і вона відповіла на це щось, що мало б мене заспокоїти, та я якимось здогадався, що батько не повернеться.

Беа бачила, як він ішов, але не розповідала про це багато років. Ми спали вчотирьох в одній кімнаті, бо так було безпечніше, і о четвертій ранку вона помітила, як він підвівся і зібрав сумку. Потім він поцілував матір і пішов. Мама не знала, куди він іде, — знати це було дуже небезпечно, тому що якби німці катували її, щоб дізнатися, де батько, вона могла б прохопитися словом. Пізніше стало відомо, що його переховував рух Опору, і врешті-решт ми отримали через них звістку про нього, але тоді ми не знали, чи він узагалі живий, і це було просто нестерпно.

Я був надто малий, щоб зрозуміти, як його відсутність вразила мою матір. Батьки керували школою — що, безумовно, дуже вплинуло на мою любов до викладання — і мама щосили старалася продовжувати цю справу. Вона й так була схильна до депресії, а тепер її чоловік невідомо де, і вона тривожилася, що нас із сестрою можуть відправити в концтабір. Напевно, мама боялася за нас до самої смерті, тому що через п'ятдесят п'ять років вона мені розповіла, як сказала нам лягти спати на кухні, а потім напхала під двері штор, ковдр і рушників, щоб не було доступу повітря. Вона збиралася ввімкнути газ, щоб ми померли вві сні, але так і не наважилась на це. Хтось, можливо, дорікне їй за такі думки — але не я із сестрою.

Мені було дуже страшно. І я розумію, що це звучить дивно, але в мене не було братів, я став головним чоловіком у сім'ї, хоч мені й було лише сім. У Гаазі, де ми жили, на узбережжі було багато напівзруйнованих будинків. Німці майже знищили їх, коли будували на березі бункери. Я ходив до тих будинків і крав там деревину (я хотів сказати «збирав», але це була крадіжка), щоб ми могли приготувати їжу й зігрітися.

Щоб менше мерзнути взимку, ми носили одяг із грубої колючої вовни низької якості. І я дотепер не можу одягати вовну. У мене така чутлива шкіра, що я сплю на тонких бавовняних простирадлах. Із цієї самої причини я замовляю дуже м'які бавовняні сорочки, які не подразнюють мою шкіру. Моя дочка Пауліна каже, що я досі кривлюся, коли бачу її в вовняному одязі: так вплинула на мене війна.

Батько повернувся, коли війна ще тривала, — восени 1944 року. У моїй родині немає єдиної версії, як саме це сталося, але, судячи з усього, моя чудова тітка Лаук, сестра моєї матері, якось була в Амстердамі, що приблизно за 50 кілометрів від Гааги, і помітила там мого батька з іншою жінкою! Вона простежила за ними і побачила, як вони заходять у будинок. Згодом тітка повернулася і з'ясувала, що він живе із цією жінкою.

Тітка розповіла все моїй матері, яка спершу почувалася пригніченою і поринула в ще глибшу депресію, але потім, опанувавши себе, сіла на корабель до Амстердама (поїзди вже не курсували), прийшла до їхнього будинку й подзвонила у двері. Вийшла жінка, і мати сказала: «Я хочу поговорити із чоловіком». Жінка відповіла: «Я дружина пана Левіна». Але мама наполягала: «Мені потрібен мій чоловік». Вийшов батько, і вона сказала: «Даю тобі п'ять хвилин, щоб зібратися й піти зі мною, інакше ми розлучимось і ти більше ніколи не побачиш дітей». За три хвилини він спустився зі своїми речами й повернувся до нас.

У певному сенсі, коли він повернувся, усе змінилося на гірше, бо всі знали, що мій батько, якого також звали Волтер Левін, єврей. У русі Опору йому зробили фальшиві документи на ім'я Яап Хорстман, і нам із сестрою наказали звати його «дядько Яап». Ми й досі дивуємося, як батька ніхто не виказав. Тесля зробив на першому поверсі нашого будинку схованку під підлогою. Піднявши ляду, батько міг спуститися у підвал і перебути там. Чудно, але батька так і не схопили.

Він жив удома останні вісім місяців війни, зокрема у найважчі для нас часи — голод узимку 1944 року, *hongerwinter*. Тоді померло майже 20 000 людей. Щоб дістати дрова, ми залазили під будинок і через одну витягували товсті балки, на яких трималася підлога. У ту голодну зиму ми харчувалися цибулинами тюльпанів і навіть корою дерев. Мого батька могли виказати, щоб роздобути їжу. Німці платили (здається,

50 гульденів, що на ті часи становило приблизно 15 доларів) за кожного виданого єврея.

Одного дня до нас таки прийшли німці. Як з'ясувалося, вони збирали друкарські машинки і придивлялися до тих, на яких ми вчилися друкувати, але вони здалися їм надто старими. Німці були по-своєму обмежені: якщо наказали забрати друкарські машинки, євреїв не чіпати. Я знаю, це схоже на кіно. Але так справді було.

Дивовижно, що попри травматичний досвід війни, у мене було більш-менш нормальне дитинство. Школа моїх батьків, Naagsch Studiehuis, і далі працювала; вони навчали друку на машинці, стенографії, іноземних мов і основ підприємництва. Я теж працював там учителем, коли був студентом.

Моїм батькам подобалося мистецтво, і я почав вивчати його більше. В університеті все складалося чудово — як з навчанням, так і в спілкуванні з людьми. У 1959 році я одружився, у січні 1960-го вступив до аспірантури, і того ж року народилася моя старша дочка Пауліна. За два роки з'явився на світ мій син Емануель (ми називаємо його Чаком), а наша молодша дочка Емма народилася в 1965 році. Наш молодший син Якоб народився вже у Сполучених Штатах 1967-го.

Коли я почав працювати в МТІ, удача була на моєму боці. Я опинився в епіцентрі найпрогресивніших досліджень. Мої знання та навички стали у пригоді новаторській групі з рентгенівської астрономії, хоч я анічогісінько не знав про дослідження космосу.

Ракети «Фау-2» вийшли за межі земної атмосфери, і перед дослідниками відкрилися нові горизонти. За іронією долі, «Фау-2» сконструював нацист Вернер фон Браун. Він розробив ці ракети під час Другої світової війни, щоб убивати цивільне населення держав-союзників. Ракети були страшною зброєю. Їх будували в'язні концентраційних таборів на полігоні в Пенемюнде й на сумнозвісному підземному заводі Міттельверк у Німеччині. За той час на виробництві загинуло майже 20 000 працівників. Самі ракети вбили понад 7000 цивільних, здебільшого в Лондоні. Один з пускових майданчиків був десь за кілометр від будинку маминих батьків біля Гааги. Я пригадую шипіння під час заправлення ракет паливом і гуркіт під час їх запуску. Якось союзники здійснили авіаналіт, намагаючись знищити обладнання для запуску «Фау-2», але промахнулися, і натомість убили

500 цивільних голландців. Після війни фон Брауна запросили у Сполучені Штати, і він став героєм. Досі не можу цього зрозуміти. Він же воєнний злочинець!

Фон Браун п'ятнадцять років співпрацював з армією США і створив на базі «Фау-2» ракети «Редстоун» і «Юпітер», які було оснащено ядерними боєголовками. У 1960 році він почав працювати в NASA, очолив Центр космічних польотів імені Джорджа Маршалла, де розробив ракету «Сатурн», яка доставила астронавтів на Місяць. Його розробки сприяли виникненню рентгенівської астрономії, тому хоча ракети і створювали як зброю, вони ще принаймні згодилися і в наукових цілях. У кінці 1950 — на початку 1960-х вони відчинили нове вікно у світ — ні, у Всесвіт — і дозволили зазирнути за межі атмосфери Землі й знайти там те, чого ми б не побачили інакше.

Россі відкрив космічне рентгенівське випромінювання завдяки інтуїції. У 1959 році він прийшов до свого колишнього студента Мартіна Енніса, який тоді очолював дослідницьку фірму American Science and Engineering (ASE) у Кембриджі, і сказав: «Пошукаймо в космосі рентгенівські промені». Команда з ASE під керівництвом майбутнього нобелівського лауреата Ріккардо Джакконі оснастила ракету трьома лічильниками Гейгера-Мюллера й 18 червня 1962 року запустила її в космос. За шість хвилин вона вже перебувала на висоті понад 80 кілометрів за межами атмосфери Землі — це була обов'язкова умова, тому що атмосфера поглинає рентгенівське випромінювання.

Звичайно, вчені виявили рентгенівське випромінювання, і що ще важливіше — установили, що його джерело поза межами Сонячної системи. Ця сенсаційна новина змінила астрономію. Ніхто не очікував на таке і не міг знайти цьому переконливого пояснення. Ніхто посправжньому не розумів цієї знахідки. Россі підкинув ідею, щоб переконатися у її слушності. Завдяки таким здогадкам стають уславленими науковцями.

Я приїхав у МТІ 11 січня 1966 року — я пам'ятаю точну дату, тому що один з наших дітей хворів на свинку, і ми змушені були відкласти подорож у Бостон: KLM не дозволила нам летіти, бо свинка заразна. У перший день я зустрівся з Бруно Россі та Джорджем Кларком, який у 1964 році вперше запустив аеростат у верхні шари атмосфери, на висоту приблизно 43 кілометрів. Він шукав джерела

високоенергетичного рентгенівського випромінювання, яке може проникати на таку висоту. Джордж сказав: «Було б чудово, якби ви приєдналися до моєї групи». Я опинився в потрібному місці в слушний час.

Якщо ви взялися за те, чого ніхто до вас не робив, обов'язково досягнете успіху; наша команда здійснювала одне відкриття за одним. Джордж був дуже великодушний: через два роки він передав мені керування групою. Перебувати на гребені хвилі найновішого напрямку в астрофізиці було просто дивовижно.

Мені надзвичайно поталанило опинитися у вирі найцікавіших досліджень у тогочасній астрофізиці, утім, правду кажучи, усі галузі фізики чудові: усі сповнені захопливих радісних моментів і дивовижних відкриттів. Поки ми шукали нові рентгенівські джерела, дослідники частинок виявляли ще фундаментальніші складові ядра, з'ясовуючи, що утримує ці частинки разом у ядрі. Вони відкрили W- і Z-бозони, які є носіями слабкої ядерної взаємодії, та кварки і глюони, які беруть участь у сильній взаємодії.

Фізика дозволила нам зазирнути в далеке минуле, до самого краю Всесвіту, і зробити фантастичний знімок, відомий під назвою «Надглибоке поле Габбла» (Hubble Ultra Deep Field), на якому зображено, здається, безмежну кількість галактик. Раджу подивитися цей знімок онлайн, перш ніж переходити до наступного розділу. Деякі мої друзі встановили цю фотографію собі як скрінсейвер.

Вік Всесвіту — приблизно 13,7 мільярда років. Утім оскільки простір значно розширився від часів Великого вибуху, сьогодні ми спостерігаємо галактики, що утворилися приблизно через 400–800 мільйонів років після нього й зараз перебувають значно далі, ніж за 13,7 мільярда світлових років. За нинішніми оцінками астрономів, відстань від нас до краю видимого Всесвіту — приблизно 47 мільярдів світлових років у всіх напрямках. Унаслідок розширення простору багато віддалених галактик рухаються від нас зі швидкістю, більшою, ніж швидкість світла. Це може шокувати чи навіть здатися неможливим для тих з вас, кого вчили, що ніщо не може рухатися швидше за світло. Саме це постулював Ейнштейн у спеціальній теорії відносності. Утім, згідно з його загальною теорією відносності, швидкість руху однієї галактики відносно іншої нічим не обмежена,

коли сам простір розширюється. Сучасні науковці не дарма вважають, що ми живемо в золоту добу космології — науки, що вивчає походження та розвиток Всесвіту.

Фізика пояснила красу і тендітність веселки, існування чорних дір, особливості руху планет, що відбувається, коли вибухає зоря, чому ковзанярка обертається швидше, коли притискає руки до тіла, чому астронавти невагомі в космосі, як утворилися хімічні елементи, коли виник наш Всесвіт, завдяки чому звучить флейта, як ми виробляємо електроенергію, що стимулює наші тіла й економіку, і які звуки видавав Великий вибух. Вона описала найглибші рівні субатомного світу й найвіддаленіші околиці Всесвіту.

Мій друг і колега Віктор Вайскопф, який на час мого приходу в МТІ вже був найавторитетнішим ученим, написав книжку «Чесність бути фізиком» (The Privilege of Being a Physicist). Цей блискучий заголовок точно передає почуття, які охопили мене, коли я опинився в самісінькому центрі одного з найцікавіших періодів астрономічних і астрофізичних досліджень, з того часу, як люди почали придивлятися до нічного неба. Люди, з якими я працював пліч-о-пліч у МТІ, розробляли надзвичайно творчі та складні методи для дослідження найфундаментальніших наукових питань. І особисто для мене було честю, з одного боку, поглибити знання людства про зорі та Всесвіт, а з другого — допомогти кільком поколінням молодих людей зрозуміти й полюбити цю дивовижну науку.

Ще від перших кроків у науці, коли я тримав ізотопи, що розпадалися в моїх руках, я не переставав захоплюватися відкриттями у фізиці, як колишніми, так і сучасними, її багатую історією і постійним розширенням її меж. А також тим, як вона розкрила мені очі на несподівані дива довколишнього світу. Для мене фізика — це спосіб побачити, як красиво і чудернацько все переплетено: видовищне і буденне, безмежне і миттєве.

Саме так я намагався оживити фізику для своїх студентів. На мою думку, значно важливіше показати їм красу відкриттів, ніж зосереджуватися на складних формулах — урешті-решт, більшість із них не збирається бути фізиками. Я зробив усе можливе, щоб допомогти їм поглянути на світ іншими очима й сформулювати запитання, які раніше не спадали на думку. Щоб показати їм веселку

такою, якою вони її ще не бачили. І щоб сфокусуватися на вишуканій красі фізики, а не на математичних подробицях. Ця книжка має таку само мету — допомогти вам побачити, як фізика висвітлює закономірності нашого світу і яка вона приголомшливо довершена і красива.

1 Обережно — у жодному разі не дивіться на Сонце.

2 До ізооту гелій-3 (${}^3\text{He}$), тоді як найрозповсюдженішим ізоотом є гелій-4 (${}^4\text{He}$). — *Прим. наук. ред.*

Вимірювання, похибки і зорі

Моя бабуся і Галілео Галілей

Фізика — наука за своєю суттю експериментальна, і вимірювання та їхні похибки лежать в основі кожного дослідження й відкриття. Навіть найвеличніші теоретичні досягнення у фізиці беруть початок із прогнозів щодо певних величин, які можна виміряти. Візьмімо, наприклад, другий закон Ньютона: $F = ma$ (сила дорівнює масі, помноженій на прискорення), чи не найважливіше рівняння у фізиці; або знамениту формулу Ейнштейна $E = mc^2$ (енергія дорівнює масі, помноженій на квадрат швидкості світла). Хіба фізики можуть подати співвідношення інакше, ніж через математичні рівняння з різними вимірюваними величинами, такими як, приміром, густина, вага, довжина, заряд, гравітаційне притягання, температура чи швидкість?

Визнаю, що, можливо, я трохи упереджений щодо цього питання, оскільки написав дисертацію за результатами надточного вимірювання показників різних типів ядерного розпаду, а мій внесок у рентгенівську астрономію на її початковому етапі полягав у вимірюванні високоенергетичного рентгенівського випромінювання від джерела, що перебуває на відстані десятків тисяч світлових років. Але без вимірювань фізику годі уявити. І, що ще важливіше, неможливо отримати значущі результати вимірювань, якщо не врахувати їхніх похибок.

Ви постійно припускаєте існування певних похибок, навіть не усвідомлюючи цього. Коли банк повідомляє про залишок на рахунку, ви очікуєте похибку менше ніж півкопійки. Коли ви купуєте одяг в інтернеті, розраховуєте, що не помилитеся з розміром, а якщо прогадаєте, то хіба що трохи. Якщо штани 34-го розміру будуть більші чи менші на 3 відсотки, різниця в обхваті талії становитиме два з половиною сантиметри. Ви можете отримати або 35-й розмір, який висітиме на стегнах, або 33-й, що змусить вас дивуватися, коли це ви примудрилися так потовстішати.

Також надзвичайно важливо виражати результати вимірювання у правильних одиницях. Згадаймо одинадцятирічну програму Mars Climate Orbiter вартістю 125 мільйонів доларів, яка закінчилася катастрофічним провалом через плутанину з одиницями вимірювання. Одна група розробників використовувала метричну систему, тоді як інша — англійську систему мір, і в результаті у вересні 1999 року космічний апарат увійшов в атмосферу Марса, замість того, щоб вийти на сталу орбіту.

У цій книжці я переважно користуюся метричною системою одиниць, тому що вона більш звична для науковців³. Температуру я наводитиму за шкалою Цельсія або Кельвіна (температура за Цельсієм плюс 273,15).

Моє беззастережне визнання вирішальної ролі вимірювань у фізиці стало однією із причин скептичного ставлення до теорій, які не можна підтвердити експериментально. Візьмімо, наприклад, теорію струн або її більш сучасну кузину, теорію суперструн, тобто найостаннішу спробу теоретиків запропонувати «теорію всього». Фізикам-теоретикам — а серед тих, хто працює в теорії струн, є блискучі науковці — ще потрібно придумати хоча б один експеримент, зробити хоча б один прогноз, аби перевірити котресь із положень теорії струн. У цій теорії нічого не можна підтвердити експериментально — принаймні поки що. Це означає, що теорія струн не має прогностичної сили, і тому деякі фізики, наприклад Шелдон Глешоу із Гарварду, сумніваються, чи можна її взагалі вважати фізикою.

Утім теорія струн має талановитих і красномовних прихильників. Один з них — Браян Грін; його книжка «Елегантний Всесвіт» (The Elegant Universe) і однойменна документальна стрічка (у ній я даю коротеньке інтерв'ю) чарівні та ефектні. М-теорія Едварда Віттена, що поєднує п'ять типів теорії струн і стверджує, що в просторі існує одинадцять вимірів, з яких ми, нижчі створіння, бачимо лише три, — доволі авантюристична і варта того, щоб замислитися над нею.

Але коли теорія гучно заявляє про себе, я згадую свою бабусю, мамину маму, надзвичайну жінку, яка мала про запас власні чудові вислови і звички, очевидні для науковця. Наприклад, вона часто казала, що коли людина стоїть, вона нижча, ніж коли лежить. Я обожаю розповідати студентам про це. На першому занятті я

заявляю, що на спогад про бабусю я збираюся експериментально перевірити цю чудернацьку ідею. Вони, звісно, неабияк спантеличені. У них на обличчі написано: «Коли стоїть, нижча, ніж коли лежить? Це неможливо!».

Їх недовіру можна зрозуміти. Безумовно, якщо зріст людини, коли вона лежить і стоїть, відрізняється, то різниця має бути мізерно мала. Урешті-решт, якби вона становила півметра, ви б помітили, чи не так? Ви прокидаєтеся вранці, підводитеся з ліжка і — бац! — на 30 сантиметрів нижчі. Але якби різниця була лише міліметр, ви ніколи її не помітили б. Тому я підозрюю, що коли бабуся і мала рацію, то різниця, мабуть, не більше кількох сантиметрів.

Щоб здійснити експеримент, мені, звісно, спершу потрібно показати студентам, що мої вимірювання неточні. Тому для початку я визначаю довжину вертикально вставленого алюмінієвого стрижня (отримую 150,0 сантиметрів) і пропоную припустити, що я можу виміряти її з точністю до плюс-мінус однієї десятої сантиметра. Отже, довжина у вертикальному положенні — $150,0 \pm 0,1$ сантиметра. Тоді я вимірюю довжину стрижня, поклавши його горизонтально, й отримую $149,9 \pm 0,1$ сантиметра, що відповідає — у межах похибки вимірювань — довжині у вертикальному положенні.

Що мені дало вимірювання алюмінієвого стрижня в обох положеннях? Багатенько! По-перше, це свідчить про те, що я зміг виміряти довжину з точністю приблизно до 0,1 сантиметра. Але не менш важливо довести студентам, що я їх не обманюю. Припустімо, що для горизонтальних вимірювань я навмисно взяв рулетку з неправильно нанесеними поділками — це було б жахливо й дуже непорядно. Наочно демонструючи, що обидва вимірювання дають однаковий результат, я доводжу свою чесність як науковця.

Потім я запрошую добровольця, вимірюю його зріст, коли він стоїть, і записую число на дошці — 185,2 сантиметра, звісно, плюс-мінус 0,1 сантиметра з урахуванням похибки. Тоді я допомагаю йому лягти на мій стіл, оснащений вимірювальним приладом, схожим на гігантську дерев'яну лінійку для стопи, яку використовують взуттєвоики, тільки я вимірюю замість стопи зріст людини. Я жартую про те, як йому зручно, і вітаю його з тим, що не кожен має честь принести себе в жертву науці. Від цього він трохи ніяковіє. Які ще сюрпризи я

приготував? Я щільно підсуваю дерев'яний трикутний брусок до голови добровольця, і поки він лежить, записую на дошці нове число. Отже, тепер у нас два результати, кожен із похибкою приблизно 0,1 сантиметра. То що ми отримали?

Вас це, мабуть, здивує, але результати відрізняються на 2,5 сантиметра, звісно, плюс-мінус 0,2 сантиметра. Я змушений зробити висновок, що хлопець, який лежить, справді вищий принаймні на 2,3 сантиметра. Я повертаюся до свого студента, і повідомляю, що коли він спить, то десь на два з половиною сантиметра вищий, ніж коли стоїть, і — це мій найулюбленіший момент — заявляю: «Бабуся мала рацію! Як завжди!».

Ви сумніваєтеся? Що ж, виявляється, моя бабуся була спостережливішою, ніж більшість із нас. Коли ми стоїмо, м'які тканини між хребцями стискаються під дією сили тяжіння, а коли лягаємо, хребет розтягується. Ситуація здається очевидною, коли про це знаєш, але чи змогли б ви це передбачити? Насправді цього ефекту не спрогнозували навіть учені з NASA, коли планували перші польоти в космос. Астронавти скаржилися, що в космосі їхні скафандри стали затісними. Пізніші дослідження, здійснені на орбітальній станції Skylab, показали, що всі шість астронавтів, які брали участь у місії, стали приблизно на 3 відсотки вищими — для зросту 182 сантиметри це трохи більше ніж 5 сантиметрів. Ураховуючи цю особливість, зараз скафандри роблять більшими.

Бачите, скільки цікавого можна дізнатися, якщо правильно все виміряти? На тій само лекції, на якій я підтверджую слушність бабусиної думки, я з великою насолодою вимірюю дуже дивні предмети. І все це для того, щоб перевірити одне припущення уславленого Галілео Галілея, батька сучасної науки й астрономії. Якось він запитав себе: «Чому найбільші ссавці саме такого розміру, а не ще більші?». І він припустив, що коли тварина стане занадто великою, її кістки зламаються. Прочитавши це, я страшенно захотів з'ясувати, чи справді він має рацію. Інтуїтивно відповідь здавалася правильною, але я мав перевірити.

Я знав, що у ссавців основне навантаження припадає на стегнові кістки, тому вирішив виміряти їх у різних тварин і порівняти. Якщо Галілей мав рацію, стегнові кістки велетенського ссавця будуть

недостатньо міцними, щоб витримувати його величезну вагу. Зрозуміло, що міцність кістки залежатиме від її товщини. Товщі кістки витримують більшу вагу — це очевидно. Що більша тварина, то міцнішими мають бути її кістки.

Крім того, стегові кістки більшої тварини будуть довгими, це безперечно. І я зрозумів, що можу перевірити припущення Галілея, порівнюючи довжину і ширину стегових кісток у ссавців різного розміру і ваги. Згідно з моїми підрахунками, які закладні, щоб заглиблюватися в них (вони детально розписані в додатку 1), якщо Галілей не помилявся, то зі збільшенням розміру тварин товщина їхніх стегових кісток має зростати швидше, ніж довжина.

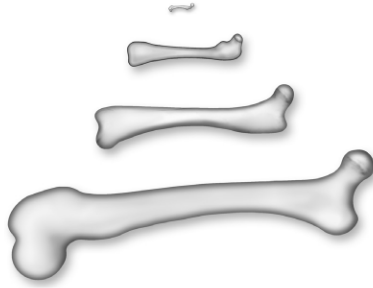
Наприклад, я підрахував, що коли одна тварина в п'ять разів більша за іншу — а отже, її стегові кістки будуть у п'ять разів довші, — то товщина має зрости приблизно в 11 разів.

Це означає, що в якийсь момент товщина кістки дорівнюватиме довжині, або навіть стане більшою, і ми отримуємо зовсім не пристосованих до життя ссавців. Такі тварини точно б не пройшли природного добору, і тоді це могло б бути поясненням, чому обмежено максимальний розмір ссавців.

Отже, передбачення було таке: товщина кістки зростатиме швидше, ніж її довжина. Тепер розпочинається найвеселіше.

Я вирушив у Гарвардський університет, де зберігається прекрасна колекція кісток, і попросив показати стегову кістку єнота і коня. Виявляється, кінь приблизно в чотири рази більший за єнота, і, відповідно, стегова кістка коня ($42,0 \pm 0,5$ сантиметра) майже в три з половиною рази більша за кістку єнота ($12,4 \pm 0,3$ сантиметра). Поки що все гаразд. Я підставив числа у свою формулу і розрахував, що стегова кістка коня має бути приблизно шестеро товща за кістку єнота. Коли я виміряв товщину кісток (із похибкою приблизно 0,5 сантиметра для єнота і 2 сантиметри для коня), виявилось, що коняча кістка в п'ять разів товща, плюс-мінус 10 відсотків. Це вселяло оптимізм. Утім я вирішив розширити дані, увівши більших і менших ссавців.

Тому я повернувся в Гарвард і взяв ще три кістки: антилопи, опосума і миші. Ось вони всі для порівняння:



Хіба це не прекрасно й не романтично? Послідовність зміни форми кісток просто чарівна. Погляньте лише, яка тонка й крихітна стегнова кістка миші. У невеличкої мишки може бути тільки манюсінька і тонюсінька кістка. Хіба це не чудово? Я ніколи не перестану захоплюватися красою кожної дрібнички нашої матінки-природи.

Але повернімося до вимірювань. Як вони вписалися в моє рівняння? Обчисливши все, я здивувався, дуже здивувався. Стегнова кістка коня виявилася приблизно в 40 разів довшою за мишачу кістку і, якщо вірити моїм розрахункам, мала бути в 250 разів товщою. Натомість вона була товща лише в 70 разів.

І тут мені спало на думку: «Чому б не попросити в них стегнову кістку слона? Це могло б остаточно поставити крапку в цьому питанні». Думаю, у Гарварді трохи роздратувалися, побачивши мене знову, але люб'язно надали мені стегнову кістку слона. Впевнений, що вони просто хотіли спекатися мене. Повірте, нести слонову кістку було важко. Вона була завдовжки з метр і важила майже тонну. Я не спав усю ніч, так мені не терпілося швидше її виміряти.

І знаєте, що я з'ясував? Стегнова кістка миші була завдовжки $1,1 \pm 0,05$ сантиметра і завтовшки $0,7 \pm 0,1$ міліметра — справді тонюсінька. Слонова кістка була $101,0 \pm 1,0$ сантиметрів завдовжки, тобто приблизно в 100 разів довша за мишачу. А що стосовно товщини? Я одержав результат $86,0 \pm 4,0$ міліметрів, тобто десь у 120 разів більше діаметра мишачої кістки. Але згідно з моїми обчисленнями, якщо Галілей мав рацію, стегнова кістка слона повинна бути приблизно в 1000 разів товщою за стегнову кістку миші. Інакше кажучи, вона мала б бути десь 70 сантиметрів завтовшки. Натомість реальна товщина — лише 9 сантиметрів. Я був змушений визнати — хоч і дуже неохоче — великий Галілео Галілей помилявся!

Вимірювання міжзоряних відстаней

Однією з галузей фізики, в якій вимірювання довго було справжнім прокляттям, є астрономія. Вимірювання та їхні похибки — це головний біль астрономів, передусім тому, що їм доводиться мати справу з велетенськими відстанями. Як далеко від нас зорі? Як щодо нашої прекрасної сусідки, галактики Андромеди? А як щодо всіх галактик, які ми можемо бачити за допомогою найпотужніших телескопів? Як далеко від нас найвіддаленіші об'єкти в космосі, за якими ми спостерігаємо? Які розміри Всесвіту?

Це одні з найголовніших і найглибших запитань, що хвилюють науку. І різні відповіді на них перевернули наше уявлення про Всесвіт. Вимірювання відстаней має захопливу історію. За змінами методики обчислення міжзоряних відстаней можна простежити еволюцію самої астрономії. І на кожному етапі результати залежать від похибки вимірювань, тобто від використовуваного обладнання та винахідливості астрономів. До кінця XIX століття існував єдиний спосіб обчислити відстань до зорь — виміряти так званий паралакс.

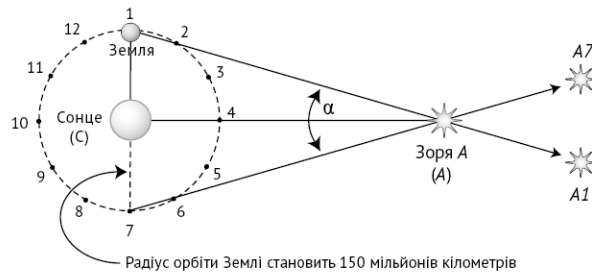
Ви всі стикалися із цим явищем, навіть не усвідомлюючи цього. Хоч би де ви зараз були, роззирніться і знайдіть ділянку стіни з якоюсь деталлю — дверима чи картиною — або, якщо ви надворі, якийсь елемент ландшафту, наприклад високе дерево. Тепер витягніть руку перед собою і підніміть палець так, щоб він був на одній лінії з лівим або правим боком цього об'єкта. Спершу заплющте праве око, а потім — ліве. Ви побачите, що палець змістився зліва направо відносно дверей чи дерева. Тепер повторіть це, тримаючи палець ближче до очей. Палець зміщується ще більше. Ефект *величезний*. Це і є паралакс.

Це відбувається через зміну ракурсу, з якого ми спостерігаємо за об'єктом, тобто в нашому випадку ми перемикаємося з лінії бачення лівого ока на лінію бачення правого (у людини відстань між очима в середньому становить 6,5 сантиметра).

Цей принцип і лежить в основі визначення відстані до зір. Хіба що тепер ми беремо як базис не 6,5 сантиметра між нашими очима, а діаметр земної орбіти (приблизно 300 мільйонів кілометрів). Коли Земля рухається навколо Сонця (уздовж орбіти діаметром приблизно 300 мільйонів кілометрів) упродовж року, ближче розташована зоря

зміщуватиметься на тлі більш віддалених зір. Ми вимірюємо кут у небі (який має назву кут паралакса) між двома положеннями зорі з проміжком у шість місяців. Якщо здійснити багаторазові вимірювання з проміжком у півроку, отримуємо різні значення кута паралакса. На ілюстрації нижче я для простоти обрав зорю у площині земної орбіти (її ще називають площиною екліптики). Утім описаний тут принцип вимірювання паралакса справедливий для будь-якої зорі — не лише для розташованих у площині екліптики.

Припустімо, ви спостерігаєте зорю A , коли Земля розташована в точці 1 . Ви побачите її на тлі дуже далеких зір у напрямку $A1$. Якщо ви спостерігаєте ту саму зорю через шість місяців (із точки 7), то побачите її в напрямку $A7$. Кут, позначений α , — це максимально можливий кут паралакса. Здійснивши такі самі вимірювання з точок 2 і 8 , 3 і 9 , 4 і 10 , ви в усіх випадках отримаєте кути паралакса, менші за α . У гіпотетичній ситуації спостережень з точок 4 і 10 (гіпотетичній тому, що з точки 10 зорі не видно через Сонце) кут паралакса був би навіть нульовим. Тепер погляньте на трикутник, утворений точками $1A7$. Ми знаємо, що відстань $1-7$ становить 300 мільйонів кілометрів, і нам відома величина кута α . Отже, ми можемо обчислити відстань CA (шкільна програма з математики).



Попри те що залежно від обраного піврічного інтервалу кут змінюватиметься, для астрономів у зорі існує *єдине* значення паралакса. Під ним мається на увазі половина найбільшого кута паралакса. Якщо максимальний кут паралакса становить 2,00 кутової секунди, паралакс зорі дорівнюватиме 1,00 кутової секунди, а відстань до зорі — 3,26 світлового року (хоча так близько від нас зір немає). Що менший паралакс, то більша відстань. Якщо паралакс дорівнює 0,10 кутової секунди, відстань до зорі — 32,6 світлового року. Найближча до Сонця зоря — Проксима Центавра. Її паралакс — 0,76 кутової

секунди. Отже, відстань до неї становить приблизно 4,3 світлового року.

Щоб побачити, які незначні зміни в положенні зорі доводиться вимірювати астрономам, ми повинні зрозуміти, наскільки маленька кутова секунда. Уявіть на нічному небі велетенське коло, накреслене через зеніт (який прямо над головою) навколо Землі. У цьому колі, звісно, 360 градусів. Кожен градус ділиться на 60 кутових мінут, а кутова мінута, своєю чергою, — на 60 кутових секунд. Таким чином, у повному колі 1 296 000 кутових секунд. Як ви бачите, кутова секунда — малюсінька величина.

Ось ще один спосіб уявити, яка вона маленька. Якщо ви розташуєте десятицентову монету на відстані 3,5 кілометра від себе, її діаметр дорівнюватиме одній кутовій секунді. І ще один. Кожен астроном знає, що діаметр Місяця — приблизно півградуса, або 30 кутових мінут. Це називають кутовим діаметром Місяця. Якби можна було порізати Місяць на 1800 однакових тонких скибочок, то кожна була б одну кутову секунду завширшки.

Як бачите, щоб визначити відстані до зір, астрономам доводиться вимірювати надзвичайно малі кути. Ось чому таке важливе значення для них має похибка вимірювання.

З появою досконалішого обладнання астрономи могли здійснювати дедалі точніші вимірювання, і від цього змінювалася обчислена відстань до зорі, часом суттєво. На початку XIX століття Томас Гендерсон виміряв паралакс найяскравішої зорі на небі — Сіріуса й отримав значення 0,23 кутової секунди з похибкою приблизно чверть кутової секунди. Інакше кажучи, згідно з його вимірюваннями, максимальне значення паралакса — приблизно половина кутової секунди, і це означало, що відстань до зорі не менше ніж 6,5 світлового року. У 1839-му це був надзвичайно важливий результат. Але за півстоліття Девід Гілл отримав значення 0,370 кутової секунди з похибкою плюс-мінус 0,010 кутової секунди. Результат Гілла не суперечив результату Гендерсона, але він був значно точнішим, тому що похибка була в 25 разів менша. Із паралаксом $0,370 \pm 0,010$ кутової секунди відстань до Сіріуса стає $8,81 \pm 0,23$ світлового року, що таки більше, ніж 6,5 світлового року.

У 1990-ті космічний телескоп «Гіппаркос» (Hipparcos — акронім від High Precision Parallax Collecting Satellite, супутник для збирання високоточних паралаксів — думаю, вони довго гралися з назвою, щоб вона стала співзвучною імені знаменитого давньогрецького астронома Гіппарха) виміряв паралакси понад 100 000 зір — а отже, й відстані до них — із похибкою близько однієї тисячної кутової секунди. Правда, неймовірно? Пам'ятаєте, як далеко має бути монета, щоб її розмір становив одну кутову секунду? Щоб зменшитися до однієї тисячної кутової секунди, монета має бути на відстані 3500 кілометрів від спостерігача.

Серед зір, паралакс яких виміряли за допомогою телескопа «Гіппаркос», був, звісно, й Сіріус, і результат склав $0,37921 \pm 0,00158$ кутової секунди. Звідси відстань до Сіріуса — $8,601 \pm 0,036$ світлового року.

Безумовно найточніше в історії вимірювання паралакса здійснили в 1995–1998 роках радіоастрономи для дуже особливої зорі під назвою Скорпіон Х-1. Я докладно розповім про це в розділі 10. Вони отримали значення паралакса $0,00036 \pm 0,00004$ кутової секунди, що відповідає відстані в $9,1 \pm 0,9$ тисячі світлових років.

Крім похибки, зумовленої недосконалістю обладнання, та обмеженого часу, впродовж якого можна вести спостереження, існує також «невідомо прихована» похибка — страшний сон астронома. Що, як ви десь припускаєтеся помилки, про яку навіть не підозрюєте, бо щось пропустили або ваші прилади неправильно відкалібровано? Припустімо, ваші підлогові ваги, відколи ви їх придбали, показують на п'ять кілограмів менше. Ви дізнаєтеся про цей огріх тільки на прийомі в лікаря — і у вас ледь не стається серцевий напад. Ми називаємо це явище систематичною помилкою, і вона лякає нас до смерті. Я не прихильник колишнього міністра оборони Дональда Рамсфелда, але все-таки відчув до нього крихту симпатії, коли він у 2002 році під час одного брифінгу сказав: «Існує відоме невідоме, коли ми знаємо, що чогось не знаємо. Але є також невідоме невідоме, коли ми не знаємо, що чогось не знаємо».

Зважаючи на те, як ускладнює нам роботу недосконалість обладнання, досягнення талановитої, але рідко згадуваної жінки-астронома Генрієтти Свон Лівітт здається ще більш дивовижним. У

1908 році, працюючи на незначній посаді в Гарвардській обсерваторії, вона почала дослідження, завдяки якому було зроблено гігантський стрибок у визначенні відстаней до зір.

В історії науки подібні речі стаються так часто, що слід було б також вважати систематичною помилкою — нехтувати талантом, інтелектом і досягненнями жінок-учених⁴.

Аналізуючи фотопластилини із зображеннями Малої Магелланової Хмари, Лівітт помітила, що у певному класі великих пульсуючих зір (які зараз відомі як цефеїди) чітко окреслюється залежність між видимим блиском зорі і часом, за який відбувається одна повна пульсація, тобто так званим періодом зорі. Вона з'ясувала: що довший період, то яскравіша зоря. Як ми побачимо, це відкриття дало можливість точно визначати відстань до зоряних скупчень і галактик.

Щоб оцінити його значення, нам спершу потрібно зрозуміти різницю між блиском і світністю. Видимий блиск — це кількість енергії світла на квадратний метр, яке ми спостерігаємо із Землі за секунду. Його вимірюють за допомогою оптичних телескопів. Тоді як світність у видимих променях — це кількість енергії, яку випромінює астрономічний об'єкт за секунду.

Візьмімо Венеру, зазвичай найяскравіший об'єкт на нічному небі, навіть блискучіший за Сіріус — найяскравішу зорю. Венера розташована дуже близько до Землі й тому дуже яскрава, але в неї практично немає справжньої світності. Вона випромінює відносно мало енергії порівняно із Сіріусом — потужним ядерним горном, удвічі більшим за Сонце, із приблизно у 25 разів більшою світністю. Світність об'єкта може багато розповісти про нього астрономам, але проблема в тому, що надійного способу її виміряти не існувало. Блиск можна виміряти, бо це те, що ми бачимо. Світність виміряти неможливо. Щоб визначити її, потрібно знати як блиск зорі, так і відстань до неї.

Використовуючи метод статистичного паралакса, Ейнар Герцшпрунг у 1913 році та Гарлоу Шеплі у 1918 році змогли перетворити значення блиску, отримані Лівітт, у світність. І припустивши, що світність цефеїди з певним періодом у Малій Магеллановій Хмарі така само, як і в цефеїди з тим же періодом в іншому місці, вони змогли розрахувати співвідношення світності для всіх цефеїд (навіть тих, що перебувають

за межами Малої Магелланової Хмари). Я не зупинятимусь на цьому методі, оскільки він заскладний для нефахівців. Хочу лише наголосити: виявлення взаємозв'язку між періодом і світністю зорі стало важливою віхою у вимірюванні відстаней. Якщо вам відомі світність і блиск зорі, ви можете обчислити відстань до неї.

Діапазон світності, до речі, досить значний. Світність цефеїди з періодом 3 дні приблизно в 1000 разів більша за світність Сонця. Якщо період цефеїди — 30 днів, її світність перевищуватиме світність Сонця в 13 000 разів.

У 1923 році ушавлений астроном Едвін Габбл виявив цефеїди в галактиці Андромеди (також відомій як М31) і обчислив, що відстань до неї приблизно 1 мільйон світлових років — чимало астрономів були приголомшені цим результатом. Багато хто, зокрема й Шеплі, доводив, що Чумацький Шлях містив у собі весь Всесвіт, зокрема галактику М31, а Габбл показав, що насправді він надзвичайно далеко від нас. Але стривайте — якщо ви зауглите, яка відстань до галактики Андромеди, то побачите, що 2,5 мільйона світлових років.

Це був яскравий приклад невідомого невідомого. Але геній Габбл також припустився систематичної помилки. Він у своїх розрахунках спирався на світність зір, які пізніше стали називати цефеїдами II типу, хоча насправді спостерігав інший різновид цефеїд з майже в *чотири рази* більшою світністю (згодом їх назвали цефеїдами I типу). Астрономи виявили цю різницю тільки в 1950-ті й миттю усвідомили, що всі відстані, обчислені за останні тридцять років, були спотворені удвічі. Щойно побачили цю грубу систематичну помилку, розміри відомого Всесвіту *подвоїли*.

У 2004 році, усе ще за допомогою методу цефеїд, астрономи обчислили відстань до галактики Андромеди — $2,51 \pm 0,13$ мільйона світлових років. У 2005 році інша група вчених, використовуючи метод затемнювано-подвійних зір, одержала результат $2,52 \pm 0,14$ мільйона світлових років, тобто приблизно $24 \cdot 10^{18}$ кілометрів. Обидва результати чудово узгоджуються один з одним. Утім похибка становить приблизно 140 000 світлових років (мало не $1,3 \cdot 10^{18}$ кілометрів). І ця галактика за астрономічними мірками майже поруч. Уявіть, які похибки під час визначення відстаней до безлічі інших галактик.

Тепер ви розумієте, чому астрономи постійно шукають так звані стандартні свічки — об'єкти з відомою світністю. Завдяки їм ми можемо обчислити відстань, використовуючи низку оригінальних методів на кшталт вимірювальної рулетки для космосу. Вони відіграли важливу роль у створенні так званої шкали космічних відстаней.

На першому щаблі цієї шкали для визначення відстані до об'єкта використовують паралакс. Завдяки надточним результатам, отриманим за допомогою телескопа «Гіппаркос», ми можемо вимірювати відстані до об'єктів, віддалених від Землі на кілька тисяч світлових років. Наступна сходинка — цефеїди, які дають нам достовірні результати для об'єктів, що перебувають на відстані до 100 мільйонів світлових років. На наступних щаблях астрономи застосовують низку химерних складних методів, надто наукових, щоб у них заглиблюватися. Багато із цих методів пов'язані зі «стандартними свічками».

Зі зростанням відстані, яку ми хочемо визначити, обчислення стають дедалі складнішими. Частково це зумовлено неймовірним відкриттям Габбла в 1925 році, згідно з яким усі галактики у Всесвіті віддаляються одна від одної. Це відкриття — одне з найважливіших і найприголомшливіших в астрономії і, можливо, в усій науці за минуле століття. Зрівнятися з ним може хіба що еволюційна теорія природного добору, яку висунув Дарвін.

Габбл спостеріг, що випромінюване галактиками світло помітно зміщене в частину спектра з меншою енергією — «червоний» бік, де хвилі довші. Це явище має назву червоний зсув. Що більше червоне зміщення, то швидше галактика «тікає» від нас. Ми знаємо про схоже явище, тільки зі звуковими коливаннями, відоме як ефект Доплера; він пояснює, чому ми можемо відрізнити, куди рухається карета «швидкої» — до нас чи від нас: звук сирени нижчий, коли машина віддаляється, і вищий, коли наближається. (Докладніше про ефект Доплера я розповім у розділі 13).

Дослідивши всі галактики, червоний зсув і відстань яких відомі, Габбл з'ясував таке: що вони далі, то швидше мчать. Отже, Всесвіт розширюється. Яке колосальне відкриття! Усі галактики у Всесвіті віддаляються одна від одної з величезною швидкістю.

Це може неабияк нас заплутати, коли потрібно буде визначити відстані до галактик, які віддалені від нас на мільярди світлових років. Ідеться про відстань у момент випромінювання світла (наприклад, 13 мільярдів років тому) чи про відстань, на якій об'єкт, на нашу думку, має бути зараз, адже за ці 13 мільярдів років він істотно віддалився від нас? Один астроном може сказати, що відстань становить приблизно 13 мільярдів світлових років (це називають світловою відстанню), тоді як інший може оцінити відстань до того самого об'єкта у 29 мільярдів світлових років (це називають супутньою відстанню).

Відкриття Габбла згодом стало відоме як закон Габбла: швидкість взаємного віддалення галактик прямо пропорційна відстані між ними. Що далі галактика, то швидше вона мчить геть.

Виміряти швидкість галактик було більш-менш просто: її можна вивести з величини червоного зсуву. Втім отримати точні відстані — зовсім інша річ. Це виявилось найскладнішим завданням. Пригадайте: результат Габбла для галактики Андромеди був меншим у 2,5 раза. Він запропонував досить просте рівняння: $v = H_0 D$, де v — швидкість галактики, D — відстань до неї, а H_0 — коефіцієнт пропорційності, який сьогодні називають сталою Габбла. Сам Габбл обчислив значення цієї сталої: приблизно 500 кілометрів за секунду на мегапарсек (1 мегапарсек — це 3,26 мільйона світлових років). Похибка цієї сталої — майже 10 відсотків. Отже, згідно із законом Габбла, якщо галактика перебуває на відстані 5 мегапарсеків, її швидкість щодо нас буде приблизно 2500 кілометрів за секунду.

Безумовно, Всесвіт розширюється швидко. Але на цьому відкриття Габбла не скінчилися. Знаючи значення сталої Габбла, можна прокрутити годинник назад і обчислити, скільки часу минуло після Великого вибуху, тобто визначити вік Всесвіту. Згідно з підрахунками самого Габбла, вік Всесвіту — приблизно 2 мільярди років. Цей результат суперечив даним геологів про те, що вік Землі — понад 3 мільярди років. Це страшенно непокоїло Габбла, і не дарма. Звісно, він не знав, що припускається кількох систематичних помилок. Крім того, що він неправильно визначив типи цефеїд, він ще помилково ідентифікував газові хмари, в яких формувалися зорі, як яскраві зорі у віддалених галактиках.

Щоб побачити прогрес у вимірюванні космічних відстаней за вісімдесят років, достатньо згадати історію самої сталої Габбла. Астрономи майже століття намагалися знайти її точне значення. Як наслідок: стала зменшилася в сім разів, а розміри Всесвіту, навпаки, стрімко збільшилися. Змінився також і вік Всесвіту — від початкових 2 мільярдів років за Габблом до майже 14 мільярдів років за теперішніми оцінками (якщо точно, $13,75 \pm 0,11$ мільярда років). Урешті-решт, за даними спостережень, зокрема з чудового орбітального телескопа, названого на честь Габбла, ми дійшли консенсусу стосовно сталої Габбла, яка дорівнює $70,4 \pm 1,4$ кілометра за секунду на мегапарсек. Похибка складає лише 2 відсотки — це неймовірно!

Лише подумайте. Вимірювання за методом паралакса, що були започатковані в 1838 році, лягли в основу подальших розробок обладнання та математичних методів, які дозволили нам подолати мільярди світлових років і досягти межі видимого Всесвіту.

Попри всі наші дивовижні досягнення у викритті цієї та інших таємниць, досі лишаються нерозкритими багато загадок. Ми можемо визначити частку темної матерії й темної енергії у Всесвіті, але не маємо жодного уявлення про їхню природу. Ми знаємо вік Всесвіту, але не впевнені, коли і як настане його кінець, і чи взагалі настане. Ми навчилися дуже точно вимірювати гравітаційну, електромагнітну, слабку та сильну взаємодії, але навіть не уявляємо, чи можливо створити теорію, яка об'єднає їх. Так само нам не відомо, яка ймовірність того, що в нашій або якійсь іншій галактиці існує розумне життя. Тому попереду ще довгий шлях. Але дивовижно, скільки відповідей нам дали фізичні прилади — і з такою надзвичайною точністю.

³ У цій книжці всі неметричні одиниці виміру, подані в оригіналі, переведено в метричні. — *Прим. ред.*

⁴ Це сталося з Лізою Майтнер, яка допомогла відкрити поділ ядра, Розалінд Франклін, яка долучилася до відкриття структури ДНК, і Джоселін Белл, яка відкрила пульсари і в 1974 році мала б отримати Нобелівську премію за «вирішальну роль у відкритті пульсарів» разом зі своїм керівником Ентоні Г'юїшем.

Розділ 3

Тіла в русі

Спробуйте одну цікаву штуку. Станьте на підлогові ваги — не на ті новомодні, що стоять у кабінеті вашого лікаря, і не на один з тих скляних цифрових пристроїв, який вмикається від дотику ногою, — а на звичайні підлогові ваги. Байдуже, босоніж ви чи у взутті (вам не потрібно справляти на когось враження), і не суттєво, яку цифру ви бачите і чи подобається вона вам. А тепер швиденько станьте навшпиньки і затримайтеся в цьому положенні. Ви побачите, що ваги неначе сказилися. Можливо, щоб зрозуміти, що відбувається, вам доведеться повторити ці рухи, бо все змінюється із блискавичною швидкістю.

Спершу стрілка рухається вгору, правильно? Потім вона повертається до показника вашої ваги, того, поки ви стояли нерухомо, втім, на деяких вагах стрілка (чи цифри на панелі) ще може трохи похитатися, перш ніж зупинитися. Далі, коли ви опуститеся на п'яти, особливо якщо ви зробите це швидко, стрілка спершу піде вниз, потім злетить вище позначки вашої ваги і повернеться, щоб зупинитися на цифрі, яку ви хотіли або не хотіли знати. У чому річ? Урешті-решт, від того, чи ви підніметеся навшпиньки, чи опуститеся на п'яти, ваша вага не зміниться. Або, може, зміниться?

Щоб з'ясувати це, нам потрібна, хоч вірте, хоч ні, допомога сера Ісаака Ньютона, мого претендента на звання найвизначнішого фізика всіх часів. Деякі мої колеги не погоджуються із цим, і ви, звісно, можете навести переконливі аргументи на користь Альберта Ейнштейна, але ніхто не сумнівається, що вони обидва найкращі. Чому я голосую за Ньютона? Бо його відкриття фундаментальні й водночас такі різноманітні. Він вивчав природу світла і розвинув теорію кольору. Щоб досліджувати рух планет, він сконструював перший рефлекторний телескоп, на якому замість лінз, що використовували тоді в телескопах-рефракторах, було встановлено дзеркало. Це стало величезним кроком уперед, і навіть сьогодні майже всі телескопи побудовано за тими само базовими принципами. Вивчаючи особливості руху рідин, він започаткував один з основних

розділів фізики; йому вдалося обчислити швидкість звуку (він помилився лише десь на 15 відсотків). Ньютон навіть заклав початки цілого розділу математики — математичний аналіз. На щастя, нам не доведеться вдаватися до обчислень, щоб оцінити його найдовершеніші досягнення, які отримали назву законів Ньютона. Сподіваюся, що в цьому розділі мені вдасться показати значущість цих начебто простих законів.

Закони руху Ньютона

За першим законом Ньютона, тіло, яке перебуває в стані спокою, зберігає його, а тіло, що рухається, не припиняє руху в тому самому напрямку з незмінною швидкістю, якщо — в обох випадках — на нього не діятиме інша сила. Або словами самого Ньютона: «Тіло зберігає стан спокою чи рівномірного прямолінійного руху, поки його не виводять із цього стану прикладені до нього сили». Це закон інерції.

Концепція інерції нам знайома, але якщо замислитися, стане зрозуміло, що вона насправді нелогічна. Ми приймаємо цей закон на віру, хоч він явно суперечить нашому повсякденному досвіду. Врешті-решт, тіла рідко рухаються вздовж прямої лінії. І, безумовно, їхній рух зазвичай не триває нескінченно. Ми очікуємо, що в певний момент вони зупиняться. Гравцю в гольф ніколи б не спав на думку закон інерції, адже м'яч після удару рідко коли летить по прямій і часто зупиняється, не докотившись до лунки. Логічною була і досі залишається інша думка — тіла прагнуть до стану спокою, що панувала в європейській науці кілька тисячоліть, аж до революційного відкриття Ньютона.

Ньютон поставив наше розуміння руху з ніг на голову, пояснивши, що м'ячик для гольфу часто не докочується до лунки, бо його сповільнює сила тертя, а Місяць, замість мчати далі в космос, обертається навколо Землі, бо його утримує на орбіті сила гравітаційного притягання.

Щоб виразніше уявити дію інерції, пригадайте, як під час катання на ковзанах складно повернути в кінці ковзанки: ваше тіло хоче й далі рухатися прямо, і потрібно розрахувати, яку силу застосувати до ковзанів і за якого кута нахилу, щоб змінити напрямок руху, не

гепнувшись і не врізавшись у бортик. Або якщо ви катаєтесь на лижах, пригадайте, як буває непросто швидко змінити напрямок руху, щоб не зіткнутися з іншим лижником, який мчить вам напереріз. У таких ситуаціях ми помічаємо інерцію значно краще, ніж зазвичай, тому що в обох випадках сила тертя, яка нас сповільнює і допомагає змінювати напрямок руху, дуже незначна. Якби рівна поверхня навколо лунки на полі для гольфу була вкрита кригою, ви одразу помітили б, як м'ячик котиться все далі й далі.

Тільки подумайте, яким революційним був здогад Ньютона! Він не лише перекреслив попередні уявлення, але й указав шлях до відкриття безлічі сил, які постійно діють на нас, утім залишаються при цьому невидимими, — наприклад, сила тертя, гравітація, а також магнітні й електричні сили. Внесок Ньютона такий вагомий, що на його честь було названо фізичну одиницю сили. Ньютон не лише допоміг нам «побачити» ці приховані сили, а й показав, як їх можна виміряти.

Своїм другим законом він дав нам надзвичайно просте, але потужне керівництво для обчислення сил. Другий закон Ньютона, знамените рівняння $F = ma$, дехто вважає найважливішим у фізиці. Або якщо сформулювати словесно: *рівнодійна* сила F , що діє на тіло, дорівнює добутку маси тіла m і *фактичного* прискорення a , якого набуває тіло.

Одним із численних прикладів того, яке значення має ця формула в нашому повсякденні, є рентгенівський апарат. Дуже важливо, щоб цей пристрій точно визначав діапазон енергій випромінювання. У цьому нам допомагає рівняння Ньютона.

Одним з важливих фізичних відкриттів (його ми більш докладно розглянемо пізніше) є те, що заряджена частинка, наприклад електрон, протон чи іон, яка міститься в електричному полі, зазнає впливу певної сили. Знаючи заряд частинки та напруженість електричного поля, ми можемо обчислити електричну силу, що діє на неї. А знаючи силу, ми можемо за допомогою другого закону Ньютона визначити прискорення частинки⁵.

У рентгенівському апараті прискорені електрони в рентгенівській трубці спрямовуються на анод. Від швидкості, з якою вони вдаряються, залежить енергія випромінювання, що виникає внаслідок цього. Змінюючи напруженість електричного поля, ми можемо змінити прискорення електронів. Таким чином можна регулювати

швидкість, з якою електрони вдаряються об анод, щоб отримати рентгенівські промені потрібної енергії.

Щоб полегшити подібні обчислення, у фізиці як одиницю сили використовують ньютон (Н): 1 ньютон — це сила, що надає тілу масою 1 кілограм прискорення 1 метр на секунду у квадраті. Чому ми кажемо «на секунду у квадраті»? Бо якщо є прискорення, швидкість постійно змінюється: іншими словами, після першої секунди вона не припиняє зростати. Якщо прискорення постійне, швидкість щосекунди змінюється на однакову величину.

Щоб краще зрозуміти це, уявіть кулю для боулінгу, скинуту з багатоповерхівки на Мангеттені, скажімо, з оглядового майданчика Емпайр-стейт-білдинг? Відомо, що тіла падають на Землю із прискоренням приблизно 9,8 метра на секунду у квадраті. Воно має назву прискорення вільного падіння і позначається літерою g . (Для простоти я поки що нехтую опором повітря; більше про це згодом). Після першої секунди куля летить зі швидкістю 9,8 метра за секунду. На кінець другої секунди вона прискориться ще на 9,8 метра на секунду і тепер падатиме зі швидкістю 19,6 метра за секунду. А на кінець третьої секунди вона рухатиметься зі швидкістю 29,4 метра за секунду. До Землі куля долетить приблизно за 8 секунд. Її орієнтовна швидкість на той момент складатиме $8 \cdot 9,8$, тобто приблизно 78 метрів за секунду (трохи більше 280 кілометрів за годину).

А як щодо поширеного міфу про те, що коли кинути монетку з даху Емпайр-стейт-білдинг, то нею можна когось убити? Я знову-таки знехтую опором повітря, хоча його роль у цьому випадку була б значною. Але навіть якщо його не враховувати, монетка, що впаде на вас зі швидкістю 280 кілометрів за годину, навряд чи вас уб'є.

Тут доречно спробувати розібратися з питанням, яке неодноразово порушуватиметься далі в книжці, оскільки воно знову й знову постає у фізиці. Це різниця між масою і вагою. Зверніть увагу, що Ньютон використовує у своєму рівнянні масу, а не вагу, і хоча ви можете думати, що це одне й те саме, насправді це зовсім різні поняття. Зазвичай ми використовуємо кілограм як одиницю ваги, але фактично це одиниця маси.

Різниця між ними проста. Ваша маса буде однакою будь-де у Всесвіті. Саме так — на Місяці, в космосі чи на поверхні астероїда.

Різною буде не маса, а *вага*. То що таке вага? Тут уже все трохи складніше. Вага — це результат гравітаційного притягання. Вага — це сила: маса, помножена на прискорення вільного падіння ($F = mg$). Отже, наша вага змінюватиметься залежно від сили тяжіння, що діє на нас, тому астронавти на Місяці важать менше. Гравітація на Місяці приблизно в шість разів менша, ніж на Землі, тому вага астронавтів буде приблизно в шість разів менша.

Для тіла цієї маси дія сили гравітаційного притягання Землі приблизно однакова на всій її поверхні. Тому ми можемо дозволити собі сказати: «Він важить 80 кілограмів», хоч так ми й змішуємо ці дві категорії (масу й вагу). Я довго й напружено розмірковував, чи використовувати тут замість кілограмів спеціальну фізичну одиницю сили (адже вага — це сила), і вирішив відмовитися від цього, щоб не спантеличувати читачів. Жодна людина, навіть фізик, маса тіла якого 80 кілограмів, не скаже: «Я важу 784 ньютони» ($80 \cdot 9,8 = 784$). Тому я просто попрошу вас запам'ятати це розрізнення, оскільки незабаром ми знову про це говоритимемо, коли повернемося до загадки, чому ваги «казяться», якщо стати на них навшпиньки.

Те, що прискорення вільного падіння практично однакове в будь-якому місці на Землі, пояснює таємничу закономірність, про яку ви, мабуть, багато чули: усі тіла, незалежно від маси, падають з однаковою швидкістю. У знаменитій історії про Галілея, вперше згаданій в одній з його ранніх біографій, розповідається про експеримент, у якому він одночасно скинув з Пізанської вежі гарматне ядро і меншу дерев'яну кулю. Ненавчливо він зробив це, аби спростувати приписуване Аристотелю твердження, що важчі тіла падають швидше, ніж легші. Правдивість цієї розповіді, щиро кажучи, викликає деякі сумніви, і зараз ми майже впевнені, що Галілей не проводив такого експерименту, але історія, проте, широковідома, настільки, що командир екіпажу «Аполлон-15» Девід Скотт здійснив схожий експеримент: одночасно скинув на поверхню Місяця молоток і соколине перо, щоб побачити, чи падатимуть ці предмети різної маси з однаковою швидкістю у вакуумі. Це чудове відео можна переглянути тут: cutt.ly/otLqin.

Мене в цьому відео вразило те, як *повільно* падають обидва предмети. Якщо не замислюватися, можна було б очікувати, що вони

падатимуть швидко, принаймні молоток точно. Але обидва падають повільно, тому що прискорення вільного падіння на Місяці приблизно в шість разів менше, ніж на Землі.

Чому два тіла різної маси справді, як і вважав Галілей, приземляться одночасно? Тому що прискорення вільного падіння однакове для всіх тіл. Як випливає з рівняння $F = ma$, що більша маса, то більша сила тяжіння, але прискорення завжди однакове. Отже, всі тіла приземляються з однаковою швидкістю. Звісно, важче тіло матиме більше енергії, і тому удар від нього буде потужнішим.

Тут варто зауважити, що пір'їна і молоток не впали б одночасно, якби ви здійснили цей експеримент на Землі. Причина — опір повітря, яким ми досі нехтували. Опір повітря — це сила, що протидіє руху тіла. Крім того, вітер впливатиме на пір'їну значно сильніше, ніж на молоток.

Це підводить нас до дуже важливого аспекту другого закону Ньютона. Слово «рівнодійна» в наведеному вище рівнянні ключове, тому що в природі на тіло майже завжди діє більше ніж одна сила. Потрібно враховувати їх усі. А отже, сили потрібно додати. Утім усе не так просто, тому що сили — це те, що ми називаємо векторами, тобто вони мають не тільки числове значення, а й напрямок. Це означає, що рівнодійну не можна визначити за допомогою простого додавання значень на зразок $2 + 3 = 5$. Припустімо, що на тіло масою 4 кілограми діють лише дві сили: одна дорівнює 3 ньютони і спрямована вгору, а друга — 2 ньютони і спрямована вниз. Сума сил становитиме 1 ньютон і буде спрямована вгору, отже, згідно із другим законом Ньютона, тіло рухатиметься вгору із прискоренням 0,25 метра на секунду у квадраті.

Сума двох сил може навіть дорівнювати нулю. Якщо на столі лежить якийсь предмет, на нього діятиме спрямована вниз сила тяжіння, що, згідно із другим законом Ньютона, дорівнює mg (маса, помножена на прискорення вільного падіння) ньютонів. Оскільки предмет не рухається, рівнодійна сил, прикладених до нього, має дорівнювати нулю. Це означає, що має бути ще одна сила mg ньютонів, спрямована вгору. Це сила, з якою стіл виштовхує предмет. Сила mg , спрямована вниз, і така само сила, спрямована вгору, в сумі дають силу, що дорівнює нулю!

Тут ми переходимо до третього закону Ньютона: «На кожну дію завжди є рівна й протилежна протидія». Це означає, що сили, з якими тіла діють одне на одного, завжди рівні та протилежні за напрямком. Мені подобається казати, що дія дорівнює протидії зі знаком мінус, або в більш поширеному формулюванні: «На кожну дію існує рівна й протилежна протидія».

Деякі наслідки цього закону здаються очевидними: наприклад, рушниця під час пострілу дає відбій у ваше плече. Але врахуйте і те, що коли ви спираєтеся на стіну, вона відштовхує вас із такою самою силою. Полуничний торт на вашому дні народження тиснув на тарілку, яка тим часом виштовхувала його з такою самою силою. Насправді, хоч би яким дивним здавався третій закон, ми оточені його прикладами в дії.

Вам коли-небудь доводилось відкручувати кран зі шлангом, який лежить на землі? Бачили, як він звивається в різні боки, а якщо вам пощастить, можливо, забризкує вашого молодшого брата? Чому так стається? Бо вода, виштовхувана зі шланга, теж тисне на нього, і тому шланг кидає туди-сюди. Або ви точно надували повітряну кульку, а потім відпускали, щоб вона безладно літала по кімнаті. У цьому випадку кулька виштовхує із себе повітря, яке штовхає кульку, і вона носить взад і вперед — така собі повітряна версія садового шланга. За таким само принципом працюють реактивні літаки і ракети. Вони викидають газ на дуже великій швидкості й за рахунок цього рухаються в протилежному напрямку.

Тепер, щоб по-справжньому зрозуміти незвичайність і глибину цього здогаду, подумайте, що, згідно із законами Ньютона, станеться, якщо скинути яблуко із тридцятого поверху. Нам відомо, що прискорення буде g , тобто приблизно 9,8 метра на секунду у квадраті. Припустімо, що маса яблука майже півкілограма. Із другого закону Ньютона ($F = ma$) випливає, що Земля притягує яблуко із силою $0,5 \cdot 9,8 = 4,9$ ньютонів. Поки що все добре.

А тепер погляньмо, що вимагає третій закон: якщо Земля притягує яблуко із силою 4,9 ньютонів, тоді й яблуко має притягувати Землю із такою самою силою. Отже, поки яблуко падає на Землю, Земля падає на яблуко. Схоже на нісенітницю. Але зачекайте. Маса Землі незрівнянно більша за масу яблука, тому в цифрах буде величезний розрив.

Знаючи, що маса Землі приблизно $6 \cdot 10^{24}$ кілограмів, ми можемо обчислити, на скільки вона наблизиться до яблука — десь на 10^{-22} метрів, що приблизно в 10 мільйонів разів менше за розмір протона. Ця відстань така мала, що її навіть неможливо виміряти. По суті, вона не має сенсу.

Сама ідея, що сили, з якими взаємодіють два тіла, рівні й водночас протилежні за напрямком, виявляється всюди в нашому житті, і вона пояснює, чому ваги «казяться», коли ви стаєте на них навшпиньки. Це повертає нас до питання, що таке вага, і дозволяє краще її зрозуміти.

Коли ви стоїте на вагах, вас тягне донизу гравітація із силою mg (де m — ваша маса), а ваги виштовхують вас із такою самою силою, тому дія цих сил врівноважується. Підлогові ваги, на яких ви стоїте, насправді показують силу, з якою вони вас виштовхують, як вашу вагу. Не забуваймо, що вага і маса — не одне й те саме. Щоб змінилася ваша маса, вам доведеться сісти на дієту (або, навпаки, почати їсти більше); змінити вагу значно легше і швидше.

Припустімо, що ваша маса (m) 55 кілограмів. Коли ви стоїте на вагах у ванній, ви дієте на них із силою mg , і ваги діють на вас із такою самою силою, mg . Рівнодійна сила дорівнює нулю. Сила, з якою вас виштовхують ваги, — це те, що вони показують.

А тепер пропоную зважитися в ліфті. Поки він стоїть на місці (або рухається з постійною швидкістю), ви не прискорюєтеся (так само, як і ліфт), і ваги показують 55 кілограмів, як і тоді, коли ви зважувалися у ванній. Ми заходимо в ліфт (він перебуває у стані спокою), ви стаєте на ваги, і вони показують 55 кілограмів. Тепер я натискаю на кнопку останнього поверху, і ліфт ненадовго прискорюється, щоб набрати швидкість. Припустімо, що це прискорення складає 2 метри на секунду у квадраті і є постійним. За той малий час, поки ліфт набирає швидкість, рівнодійна сил, які діють на вас, не може дорівнювати нулю. Згідно із другим законом Ньютона, рівнодійна прикладених до вас сил має дорівнювати $F = ma$. Фактичне прискорення становить 2 метри на секунду у квадраті, звідки отримуємо рівнодійну $m \cdot 2$, спрямовану вгору. Зважаючи на те, що на вас діє сила притягання Землі mg , спрямована вниз, має бути ще сила, спрямована вгору, $mg + 2m$, що також можна записати як $m(g + 2)$. Звідки береться ця сила? Це може бути тільки реакція ваг (звідки ще?). Ваги прикладають до вас

силу $m(g + 2)$, що спрямована вгору. Але, як ми пам'ятаємо, ваги показують силу, з якою вони діють на вас. Тому вони покажуть, що ви важите приблизно 66 кілограмів (нагадаю, що g — це майже 10 метрів на секунду у квадраті). А ви чимало набрали!

Згідно із третім законом Ньютона, якщо ваги діють на вас із силою $m(g + 2)$, ви також маєте діяти на ваги з рівною і протилежною силою. Тут ви можете подумати, що якщо ваги виштовхують вас із такою самою силою, з якою ви на них тиснете, тоді дія цих сил врівноважується, а отже, прискорення виникати не повинно. Якщо ви так розмірковуєте, то припускаєтеся дуже поширеної помилки. На вас діє лише дві сили: спрямована вниз сила притягання Землі mg і спрямована вгору сила $m(g + 2)$ від ваг, а отже, до вас прикладена спрямована вгору сила $2m$, що надає вам прискорення 2 метри на секунду у квадраті.

Щойно ліфт перестає прискорюватися, ваша вага знову стає такою, як була. Таким чином, вага збільшується лише в той короткий відтинок часу, коли прискорення ліфта спрямоване вгору.

Напевно, ви вже здогадалися, що коли ліфт прискорюється, рухаючись униз, ви втрачаєте вагу. Поки ліфт розганяється вниз із прискоренням 2 метри на секунду у квадраті, ваги показуватимуть $m(g - 2)$, тобто приблизно 44 кілограми. Перш ніж ліфт зупиниться нагорі, він якийсь час буде сповільнюватися. Таким чином, під кінець вашого підйому на ліфті ви побачите на вагах меншу цифру, що вас, можливо, неабияк потішить. Проте незабаром, коли ліфт зупиниться, ваша вага знову повернеться до звичних 55 кілограмів.

Тепер припустімо, що хтось із ваших недоброзичливців перерізав трос, і ви стрімко летите в шахту ліфта, падаючи із прискоренням g . Розумію, що в такий момент вам, найімовірніше, буде не до фізики, але це був би цікавий (і нетривалий) експеримент. Ваша вага буде $m(g - g) = 0$. Ви в невагомості. Оскільки ваги падають із таким само прискоренням, що й ви, вони більше не діють на вас. Якби ви поглянули на ваги, то побачили б там нуль. Насправді ви б плавали в повітрі, як і решта речей у ліфті. Якби у вас була склянка з водою і ви її перекинули б, вода не вилася б, хоча я, звісно, закликаю вас не намагатися здійснити цей експеримент!

Це пояснює, чому астронавти невагомі в космічних кораблях. Коли космічний модуль або шатл перебуває на орбіті, він фактично

перебуває в стані вільного падіння, так само, як ліфт, що мчить униз. Що таке вільне падіння? Відповідь може вас здивувати. Вільне падіння — це коли на вас не діють жодні інші сили, крім гравітації. На орбіті астронавти, космічний корабель і все, що в ньому, вільно падають у напрямку до Землі. Вони не розбиваються тільки тому, що поверхня Землі вигнута, і астронавти, космічний корабель і все, що в ньому, летять так швидко, що поверхня планети вигинається від них, і тому вони не падають на неї.

Отже, астронавти в космічному кораблі перебувають у стані невагомості. Якби ви опинилися в ньому, то подумали б, що там відсутня гравітація: врешті-решт, люди й речі всередині зорельота нічого не важать. Часто кажуть, що шатл на орбіті — це середовище з нульовою гравітацією, саме так це сприймають. Проте якби гравітації не було, корабель не зміг би залишатися на орбіті.

Сама ідея того, що вага може змінюватися, така захоплива, що мені страшенно захотілося продемонструвати це явище на лекції — включно з невагомістю. Що, як дуже міцно прив'язати до ніг ваги й зістрибнути зі столу? Я думав, якщо якось прикріпити спеціальну камеру, можливо, мені вдасться продемонструвати студентам, що десь півсекунди, поки я перебуваю у вільному падінні, ваги показують нуль. Я міг би порадити вам самим спробувати це, але не завдавайте собі зайвого клопоту. Повірте: я спробував багато разів і лише зламав багато ваг. Річ у тому, що ваги, які можна придбати в магазині, недостатньо чутливі для цього через інерцію пружин. Один закон Ньютона перешкоджає іншому! Якби ви могли стрибнути з даху тридцятиповерхового будинку, у вас, очевидно, було б досить часу (падіння тривало б приблизно 4,5 секунди), щоб відчути ефект, але, звісно, із цим експериментом було б пов'язано багато інших проблем.

Тож замість того щоб ламати ваги й стрибати з дахів, ви можете, якщо у вас є садовий стіл і все гаразд із колінами, спробувати інший спосіб відчути невагомість на власному подвір'ї. Я використовую для цього лабораторний стіл в аудиторії. Вилізьте на стіл і візьміть у витягнуті руки невеликий графин з водою, але не беріться за нього з боків, а обережно підтримуйте долонями. Він повинен просто стояти. А тепер зістрибніть зі столу, і поки ви летітимете, ви побачите, як графин піднімається в повітря над вашими руками. Якщо ви

попросите друга зняти ваш стрибок на відео, а потім переглянете запис у сповільненому темпі, то помітите, як графин піднімається в повітря. Чому? Бо коли ви рухалися зі спрямованим донизу прискоренням, сила, з якою ви виштовхували графин, підтримуючи його, перестала діяти. Тепер графин рухатиметься із прискоренням 9,8 метра на секунду у квадраті, так само, як і ви. Ви із графином перебуваєте у вільному падінні.

Але як це все пояснює, чому ваги «казяться», коли ви стаєте навшпиньки? Коли ви відштовхуетесь, прискорення спрямоване вгору, і сила, з якою на вас діють ваги, зростає. Тому протягом цього дуже короткого часу ви важите більше. Але потім, у найвищому положенні, ви сповільнюєтесь, щоб зупинитися, а це означає, що ваша вага зменшується. Потім, коли ви опускаєтеся на п'яти, все повторюється у зворотному напрямку, і цим ви продемонстрували, як можна на мить стати важчим або легшим, анітрохи не змінюючи маси тіла.

Закон всесвітнього тяжіння: Ньютон і яблуко

Зазвичай згадують про три закони Ньютона, хоча насправді він сформулював чотири. Ми всі чули легенду про те, як Ньютон одного дня у своєму саду побачив, що з дерева падає яблуко. Як стверджував один з його перших біографів, цю історію розповів сам учений. «Причиною послужило падіння яблука, — писав друг Ньютона Вільям Стаклі, посилаючись на їхню розмову, — коли він сидів замислившись. І він подумав: чому яблуко завжди падає перпендикулярно до землі?⁶» Але багато хто не вірить у правдивість цієї легенди. Урешті-решт, Ньютон розповів цю історію Стаклі за рік до смерті й ніколи не згадував про неї у своїх ґрунтовних працях.

Проте жодних сумнівів не викликає те, що Ньютон першим зрозумів: та сама сила, яка змушує яблуко впасти з дерева, визначає також рух Місяця, Землі й Сонця — і взагалі всіх тіл у Всесвіті. Це було надзвичайне відкриття, але знову-таки він не зупинився на цьому. Він збагнув, що всі тіла у Всесвіті взаємно притягуються, і запропонував формулу для розрахунку сили цього притягання — так званий закон всесвітнього тяжіння. За цим законом, сила гравітаційного притягання

двох тіл прямо пропорційна добутку їхніх мас і обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

Інакше кажучи, якщо взяти суто гіпотетичний приклад, який, наголошую, не має жодного стосунку до реальності, якби Земля і в 318 разів важчий за неї Юпітер були розташовані на однаковій відстані від Сонця, то сила притягання між Сонцем і Юпітером була б у 318 разів більша, ніж між Сонцем і Землею. А якби Юпітер і Земля мали однакову масу, але Юпітер рухався своєю реальною орбітою, тобто приблизно в п'ять разів далі від Сонця, ніж орбіта Землі, то сила притягання між Сонцем і Землею була б у 25 разів більша, ніж між Сонцем і Юпітером, тому що вона обернено пропорційна квадрату відстані між ними.

У своєму знаменитому трактаті «Математичні начала натуральної філософії» (який ми називаємо просто: «Начала»), опублікованому в 1687 році, Ньютон не подає закону всесвітнього тяжіння у вигляді рівняння, але в сучасній фізиці ми найчастіше записуємо його так:

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2},$$

де F — сила гравітаційного притягання між тілами масою m_1 та m_2 , а r — відстань між ними; 2 над r означає «у квадраті». Що таке G ? Це так звана гравітаційна стала². Ньютон, звісно, знав, що така стала існує, але вона не згадується в його «Началах». Відтоді гравітаційну сталу багато разів вимірювали, і найточніше її значення на сьогодні — $(6,67428 \pm 0,00067) \cdot 10^{-11}$. Також ми, фізики, переконані, що вона однакова для всіх тіл у Всесвіті, як і припускав Ньютон.

Закони Ньютона справили колосальний вплив, який неможливо переоцінити. Його «Начала» є однією з найґрунтовніших наукових праць в історії. Його закони повністю змінили фізику й астрономію і дозволили обчислити масу Сонця та планет. Це було зроблено дуже елегантно. Якщо нам відомий період обертання будь-якої планети (наприклад, Юпітера чи Землі) і її відстань до Сонця, то ми можемо обчислити масу Сонця. Магія, чи не так? Можемо піти ще далі: якщо нам відомий період обертання котрогось із яскравих супутників Юпітера (які відкрив Галілей у 1609 році) і відстань від нього до планети, ми можемо обчислити масу Юпітера. Із цього випливає, що, знаючи період обертання Місяця навколо Землі (а це 27,32 дня) і

середню відстань між ними (це приблизно 384 000 кілометрів), можна досить точно обчислити масу Землі. Я поясню цей процес у додатку 2. Якщо вас не лякає математика, думаю, вам сподобається!

Але закони Ньютона виходять далеко за межі Сонячної системи. Вони визначають і пояснюють рух зір, подвійних систем (див. розділ 13), зоряних скупчень, галактик і навіть груп галактик, і саме завдяки законам Ньютона у ХХ столітті було відкрито темну матерію. Згодом я розповім про це докладніше. Його закони прекрасні — приголомшливо прості й водночас універсальні. Вони пояснюють так багато різних явищ, що перехоплює дух.

Поєднавши фізику руху, взаємодію між тілами та рух планет, Ньютон по-новому узагальнив результати астрономічних вимірювань і продемонстрував, що безладно нагромаджені спостереження, здійснені впродовж багатьох століть, насправді пов'язані між собою. Схожі припущення висували й науковці до Ньютона, але вони, на відміну від нього, не змогли поєднати їх в одне ціле.

Галілей, який помер за рік до народження Ньютона, запропонував ранню версію закону інерції та зміг математично описати рух багатьох тіл. Також він з'ясував, що всі тіла, скинуті з однієї висоти, падатимуть з однаковою швидкістю (за відсутності опору повітря). Проте він не зміг пояснити, чому це так. Йоганн Кеплер сформулював основні закономірності руху планет уздовж орбіти, але не розумів, чому вони так рухаються. Це пояснив Ньютон. І, як ми побачили, ці відповіді та більшість наслідків з них ніяк не можна назвати інтуїтивними.

Сили руху викликають у мене безмежний захват. Гравітація супроводжує нас усюди. Вона пронизує Всесвіт. І що найвражаюче — утім не лише це — вона діє на відстані. Ви колись замислювалися над тим, що наша планета залишається на орбіті, а ми всі живі завдяки силі притягання між двома небесними тілами, віддаленими одне від одного на 150 мільйонів кілометрів?

Рух маятників

Попри те що сила тяжіння повсюдно присутня в нашому житті, її прояви в природі часто заганняють нас у глухий кут. За допомогою

досліді з маятником я дивую студентів тим, як дія гравітації суперечить нашим уявленням. Усе відбувається так.

Можливо, більшість із вас вважає, що коли гойдатися на гойдалці поруч зі значно легшою людиною, наприклад дитиною, ви рухатиметеся повільніше за неї. Але насправді це не так. Тому вас може здивувати, що час, за який маятник здійснює одне коливання (який називають періодом коливань маятника), не залежить від ваги підвішеного тіла (це тіло має назву тягарець). Зверніть увагу, що тут ідеться про так званий математичний маятник, тобто мають виконуватися дві умови. По-перше, тягарець має бути важчим за підвіс, щоб вагою останнього можна було знехтувати. По-друге, він має бути достатньо маленьким, щоб його можна було вважати просто точкою, яка не має розмірів⁸. Зробити математичний маятник нескладно: прив'яжіть яблуко до кінця тонкої нитки, довжина якої хоча б у чотири рази більша за розміри яблука.

На занятті я за допомогою законів руху Ньютона виводжу формулу для обчислення періоду коливань математичного маятника, а потім експериментально її перевіряю. Для цього мені потрібно припустити, що маятник відхиляється від центрального положення на невеликий кут. Дозвольте уточнити, що я маю на увазі. Якщо ви поглянете, як гойдається ваш саморобний маятник, — справа наліво, а потім зліва направо — ви побачите, що більшість часу він рухається ліворуч або праворуч. Утім у кожному повному циклі маятник двічі зупиняється, а потім змінює напрямок. Це відбувається, коли кут між ниткою і вертикаллю досягає максимального значення, яке називають амплітудою маятника. Якщо опором повітря (тертям) можна знехтувати, цей максимальний кут, на який відхиляється маятник, буде однаковий з обох боків. Формула, яку я виводжу, годиться тільки для невеликих кутів (невеликих амплітуд). У фізиці такий спосіб виведення називають малокутовим наближенням. Студенти завжди запитують: «Невеликий кут — це скільки?». Одна студентка навіть запитала дуже конкретно: «Амплітуда 5 градусів невелика? Рівняння ще виконується для кута 10 градусів, чи це вже великий кут?». Звісно, це чудові запитання, і я пропоную перевірити їх одразу.

Виведена формула досить проста і дуже елегантна, хоч і може трохи налякати тих, хто давно не мав справи з математикою:

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

де T — це період коливання маятника (у секундах); L — довжина нитки (у метрах); π дорівнює 3,14, а g — це прискорення вільного падіння (9,8 метра на секунду у квадраті). Отже, права частина читається так: два π , помножене на квадратний корінь довжини нитки, поділене на прискорення вільного падіння. Я не зупинятимусь на доведенні цієї формули (за бажання ви можете переглянути запис лекції, на якій я її виводжу; посилання на відео — трохи далі в тексті).

Я наводжу це рівняння, щоб ви зрозуміли, як точно його підтверджують результати моїх дослідів. Згідно із формулою, період коливання маятника, нитка якого завдовжки 1 метр, — приблизно 2 секунди. Я фіксую час, за який маятник з ниткою такої довжини зробить 10 коливань, і отримую приблизно 20 секунд. Поділивши цей час на 10, одержуємо період 2 секунди. Потім я переходжу до маятника з коротшою в чотири рази ниткою. Згідно із формулою, період буде вдвічі меншим. Тож я вкорочую нитку до 25 сантиметрів, і маятник справді робить 10 коливань за майже 10 секунд. Результати дуже обнадійливі.

Для ретельнішої перевірки формули, ніж за допомогою невеликого маятника з яблука, я попросив сконструювати в аудиторії математичний маятник. Сталева куля масою 15 кілограмів, що прикріплена до кінця троса 5,18 метра завдовжки. Його можна побачити під кінець лекції, яка доступна тут: cutt.ly/gwrxs4Y.

Яким має бути період коливань цього маятника T ?

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{5,18}{9,8}},$$

тобто 4,57 секунди. Щоб це перевірити, як я пообіцяв студентам на початку лекції, я вимірюю період коливання для обох амплітуд — 5 і 10 градусів.

Щоб студентам було добре видно, я використовую великий цифровий таймер, що показує час із точністю до однієї соті секунди. Я мав нагоду перевірити час своєї реакції, бо за багато років вмикав і вимикав таймер незліченну кількість разів, і знаю, що це приблизно одна десята секунди (у вдалий день). Тобто якщо я десяток разів вимірюю одне й те саме, отримаю значення для періоду коливань, які

відрізнятимуться не більше ніж на 0,1 (можливо, 0,15) секунди. Отже, незалежно від того, який час я вимірюватиму — одного коливання чи десяти, — похибка дорівнюватиме плюс-мінус 0,1 секунди. Тому я вимірюю час десяти коливань, адже це дає мені в 10 разів точніше значення періоду, ніж якщо вимірювати час одного коливання.

Я відводжу тягарець убік, щоб кут між тросом і вертикаллю був приблизно 5 градусів, потім відпускаю його та вмикаю таймер. Студенти вголос рахують, скільки разів хитнувся маятник, і після 10 коливань я вмикаю таймер. Дивовижно — табло показує 45,70 секунди, у 10 разів більше за мої підрахунки для одного коливання. Студенти зриваються шквалом оплесків.

Тоді я збільшую амплітуду до 10 градусів, відпускаю кулю, вмикаю таймер, прошу студентів рахувати і точно на «десять» зупиняю таймер: 45,75 секунди. Поділивши $45,75 \pm 0,1$ секунди на 10, отримуємо час одного коливання — $4,575 \pm 0,01$ секунди. Результат для амплітуди 5 градусів такий само, як для амплітуди 10 градусів (у межах похибки вимірювань). Отже, формула таки дуже точна.

Потім я запитую студентів: «Якщо я сяду на тягарець і гоїдатимуся разом з ним, період коливань зміниться чи залишиться таким само?». Сидіти на цій штуці — сумнівне задоволення (дуже боляче), але якщо так треба заради науки і щоб розсмішити та зацікавити студентів, я від цього не відмовлюся. Звісно, я не можу сісти на тягарець рівно, тому що так я, по суті, вкоротив би трос, і період дещо зменшився б. Але якщо тримати тіло максимально горизонтально, щоб залишатися на одному рівні з тягарцем, довжина троса практично не зміниться. Тому я підтягую до себе тягарець, усідаюся на нього, хапаюся руками за трос і відштовхуюсь.

Коли я гоїдаюся на маятнику, вмикати й зупиняти таймер, зберігши при цьому швидкість реакції, доволі складно. Проте я робив це стільки разів, що цілком упевнений, що можу досягти похибки вимірювань $\pm 0,1$ секунди. Я розгойдуюся десятком разів, студенти вголос рахують — і сміються з абсурдності мого становища під мої голосні стогони й нарікання — і коли після десяти коливань я зупиняю таймер, він показує 45,61 секунди. Отже, період коливань — $4,56 \pm 0,01$ секунди. «Фізика правдива!» — вигукую я, і студенти шаленіють.

Бабусі й астронавти

Ще однією хитрою особливістю сили тяжіння є те, що часом ми неправильно визначаємо напрямок її дії. Сила тяжіння завжди спрямована до центра Землі — на Землі, звісно, не на Плутоні. Але інколи нам здається, що сила тяжіння діє горизонтально, і ця штучна, або, як ми кажемо, уявна гравітація суперечить самій ідеї гравітації.

Ви можете легко продемонструвати цю штучну гравітацію в домашніх умовах, повторивши те, що завжди робила моя бабуся, коли готувала салат. Їй спадали на думку просто геніальні речі: пригадайте, це ж вона навчила мене, що коли людина лежить, вона вища, ніж коли стоїть. Отже, готуючи салат, вона розважалася від душі. Вона промивала листя салату в друшляку, а потім замість сушити його в рушнику, від чого воно б пошкодилося, користувалася власним методом: накривала друшляк рушником, натягувала зверху резинку, а потім несамовито розмахувала ним по колу.

Саме тому, демонструючи це на лекції, я прошу студентів у перших двох рядах закрити конспекти, щоб вони не намокли. Я приношу на лекцію листя салату, обережно мию його в раковині на моєму столі та складаю в друшляк. «Приготуйтеся», — кажу я студентам і починаю енергійно крутити рукою, роблячи в повітрі кола. Бризки летять на всі боки! Звісно, зараз бабусин метод замінили нудні пластикові сушарки для салату — що, як на мене, дуже прикро. Схоже, сучасне життя витісняє романтику з речей, що нас оточують.

Ту саму штучну гравітацію відчують астронавти, коли прискорюються, виходячи на земну орбіту. Мій друг і колега з МТІ Джеффри Гоффман брав участь у п'яти космічних польотах, і, за його словами, під час зльоту на екіпаж діє різне прискорення. Спершу воно наростає від приблизно 0,5g до 2,5g під кінець фази твердого палива. Потім воно ненадовго знижується до приблизно 1g, а тоді починає горіти рідке пальне, і прискорення знову поступово зростає до 3g в останню хвилину зльоту, під час якого за вісім із половиною хвилин корабель набирає швидкість до 27 000 кілометрів за годину. І відчуття аж ніяк не приємні. Коли корабель нарешті виходить на орбіту, астронавти опиняються у стані невагомості, який вони сприймають як відсутність гравітації.

Як ви тепер знаєте, і листя салату, коли його відштовхують стінки друшляка, й астронавти, коли їх відштовхують крісла, перебувають під впливом чогось на зразок штучної гравітації. Бабусин пристрій (і наші сушарки для салату) — це, звісно, різні варіанти центрифуги, що відділяє салат від краплинок води, які вилітають крізь отвори друшляка. Не обов'язково бути астронавтом, щоб відчувати дію цієї уявної гравітації. Згадайте диявольський атракціон «Ротор», своєрідний циліндр із відкритим верхом, де ви притуляєтеся спиною до стіни. Коли він починає обертатися дедалі швидше, ви відчуваєте, як вас чимраз сильніше втискає в стіну, правда? Згідно із третім законом Ньютона, ви тиснете на стіну з тією самою силою, з якою вона тисне на вас.

Силу, з якою на вас тисне стіна, називають доцентровою. Вона надає вам прискорення, потрібного для руху по колу: що вища швидкість, то більша доцентрова сила. Пригадайте: коли ви рухаєтеся по колу, навіть якщо швидкість не змінюється, має бути присутня сила (а отже, й прискорення). Так само гравітація виконує роль доцентрової сили для планет, унаслідок чого вони обертаються навколо Сонця (я розглядаю це в додатку 2). Силу, з якою ви тиснете на стіну, часто називають відцентровою. Доцентрова й відцентрова сили мають однакове значення, але протилежний напрямок. Не плутайте їх. На вас діє *тільки* доцентрова сила (а не відцентрова), а на стіну діє *тільки* відцентрова (не доцентрова).

Деякі «Ротори» крутяться так швидко, що коли підлога йде з-під ваших ніг, то ви не сповзаєте вниз. Чому так відбувається?

Подумайте. Якщо «Ротор» стоїть на місці, ви сповзатимете вниз під дією сили тяжіння, тому що сили тертя між вами і стіною (спрямованою вгору) не достатньо для того, щоб зрівноважити силу тяжіння. Утім сила тертя під час опущеної підлоги буде вищою, коли «Ротор» обертається, тому що вона залежить від доцентрової сили. Що більша доцентрова сила (з опущеною підлогою), то більша сила тертя. Отже, якщо «Ротор» обертається достатньо швидко з опущеною підлогою, сила тертя може зрости настільки, що вона зрівноважить силу тяжіння, і тому ви не сповзатимете вниз по стінці.

Існує багато способів продемонструвати штучну гравітацію. Цей спосіб ви можете випробувати вдома. Ну добре, на подвір'ї.

Прив'яжіть мотузку до ручки відерця з-під фарби, наповненого водою (краще десь наполовину, інакше його буде дуже важко обертати), а потім якомога швидше розкрутіть відерце над головою. Можливо, щоб робити це достатньо швидко, доведеться трохи потренуватися. Навчившись, ви побачите, що з відерця не проливається жодної краплини води. Мої студенти роблять це на лекціях, і мушу сказати, це справжній хіт! Такий невеличкий експеримент також пояснює, чому в деяких особливо підступних варіантах «Ротора», де атракціон потроху перевертається доти, доки ви якоїсь миті не опинитеся догори ногами, ви все-таки не падаєте на землю (звісно, з міркувань безпеки, там вас пристібають пасками).

Від сили, з якою нас відштовхують ваги, залежить, яку нашу вагу вони покажуть. Завдяки силі тяжіння — а не її відсутності — астронавти перебувають у стані невагомості. А коли яблуко падає на Землю, Земля падає на яблуко. Закони Ньютона прості, універсальні, глибокі та цілком нелогічні. Формулюючи їх, сер Ісаак Ньютон мав справу з абсолютно загадковим Всесвітом, і людству надзвичайно поталанило, що він зміг розгадати деякі із цих загадок і змусити нас зовсім по-новому поглянути на світ.

⁵ Я припустив, що дія гравітації на частинку така незначна, що нею можна знехтувати.

⁶ Британське королівське товариство нещодавно опублікувало оцифровану копію манускрипту Стаклі в інтернеті. Її можна переглянути тут: royalsociety.org/collections/turning-pages.

⁷ Якщо ви захочете використати цей коефіцієнт, зверніть увагу, щоб маса була виражена в кілограмах, а відстань — у метрах. Тоді сила тяжіння буде у ньютонах.

⁸ Якщо масою підвісу не можна знехтувати і/або підвішене тіло не можна вважати матеріальною точкою, тоді це вже не математичний маятник. Це так званий фізичний маятник, який поводиться інакше.

Розділ 4

Магія пиття крізь соломинку

Для одного з моїх улюблених демонстраційних дослідів потрібні дві банки з-під фарби та рушниця. Я наповнюю одну банку водою до країв і щільно закриваю кришкою. Потім наповнюю другу, цього разу не доливаючи кілька сантиметрів до країв, і також щільно закриваю. Поставивши їх поряд на столі, я відходжу на кілька метрів до іншого столу, де стоїть перевернутий довгий білий дерев'яний ящик, у якому явно щось сховано. Я піднімаю ящик, і всі бачать рушницю на підпорі, націлену на банки з-під фарби. Студенти роблять великі очі: невже я стрілятиму на лекції?

«Що б сталося, якби ми прострелили ці бляшанки з-під фарби?» — запитую я. І не чекаю відповідей. Я нахиляюся перевірити приціл і зазвичай ще трохи вовтужуся із затвором. Це допомагає створити напругу. Я видмухую пил з патронника, заряджаю кулю та оголошую: «Ну що, зараз вилетить. Ми готові?». Потім, стоячи збоку від рушниці, я кладу палець на курок, рахую «три, два, один» — і стріляю. Тієї ж миті кришка з однієї банки злітає високо в повітря, тоді як у другій залишається на місці. Як думаєте, у котрої з банок злітає кришка?

Щоб дати правильну відповідь, вам спершу треба знати, що повітря, на відміну від води, стискається. Молекули повітря, як і будь-якого газу, можуть наблизитися одна до одної, чого не можуть зробити молекули води (чи будь-якої іншої рідини). Щоб змінити густину рідини, потрібно докласти страшенних сил і чинити тиск. Коли куля проходить крізь банки з-під фарби, вона створює всередині досить значний тиск. У неповній банці повітря виконує роль буфера, або амортизатора, тому вода залишається в тому самому стані й банка не вибухає. Але в повній банці тільки вода, яка не стискається. Тому додатковий тиск, який створює куля у воді, зі значною силою діє на стінки та кришку банки, і в результаті кришку зриває. Загалом, це надзвичайно драматичне видовище, і на студентів воно щоразу справляє величезне враження.

В оточенні тиску повітря

На лекціях про тиск я демонструю багато цікавинок, а тиск повітря особливо привабливий, тому що з ним пов'язано багато такого, що суперечить інтуїції. Зазвичай ми навіть не замислюємося, що перебуваємо під тиском повітря, але коли беремося його шукати, нам аж перехоплює подих. Щойно ми усвідомлюємо, що він є (і приймаємо цей факт), ми починаємо бачити його вияви всюди: від повітряних кульок до барометрів; у тому, як п'ємо через соломинку, і тому, як глибоко можемо пірнути і плавати з маскою і трубкою.

Виявляється, що явища, яких ми одразу не помічаємо і які сприймаємо як належне, наприклад сила тяжіння чи атмосферний тиск, чи не найбільш захопливі в природі. Це нагадує анекдот про двох риб, які весело собі пливають річкою. Одна риба повертається до другої і скептично запитує: «Що це останнім часом за балачки про якусь “воду”?».

У нашому випадку ми сприймаємо як належне вагу і щільність нашої невидимої атмосфери. Взагалі-то, ми живемо на дні безмежного повітряного океану, який щосекунди і щодня чинить на нас значний тиск. Тепер уявіть у мене в руці довжелезну трубу квадратного перерізу завтовшки 1 сантиметр, яка балансує на моїй долоні та піднімається вгору аж до верхніх шарів атмосфери. Це більше ніж 100 кілометрів. Тільки повітря в трубі — забудьте про саму трубу — важитиме приблизно 1 кілограм². Це один зі способів вимірювання атмосферного тиску: тиск 1,03 кілограма на квадратний сантиметр називають стандартною атмосферою.

Інший спосіб визначити атмосферний тиск — і будь-який інший, — скористатися досить простою формулою, такою простою, що її достатньо описати словами. Тиск — це сила, поділена на площу: $P = F/A$. Отже, атмосферний тиск на рівні моря становить приблизно 1 кілограм на квадратний сантиметр. Ось ще один спосіб наочно продемонструвати зв'язок між силою, тиском і площею.

Уявімо, що ви катаєтеся на ковзанах на озері, і хтось провалюється під кригу. Як ви наблизитиметеся до проломини — підете по кризі? Ні, ляжете на живіт і почнете повільно підповзати, розподіляючи вагу свого тіла на більшу площу, щоб послабити тиск на кригу, значно зменшивши ризик того, що вона трісне під вами. Різниця в тиску людини на кригу стоячи і лежачи вражає.

Скажімо, ви важите 70 кілограмів і стоїте на кризі на двох ногах. Якщо дві ваші ступні мають площу приблизно 500 квадратних сантиметрів (0,05 квадратного метра), ви чините на кригу тиск $70/0,05$ кілограма на квадратний метр, або 1400 кілограмів на квадратний метр. Якщо ви піднімете одну ногу, то тиск подвоїться до 2800 кілограмів на квадратний метр. Якщо ваш зріст, як і в мене, метр вісімдесят і ви ляжете на кригу, то що станеться? Ви розподілите 70 кілограмів на площу приблизно 8000 квадратних сантиметрів, або 0,8 квадратного метра, і ваше тіло тиснутиме на кожен квадратний метр лише 87,5 кілограма, що десь у 32 рази менше, ніж коли ви стояли на одній нозі. Що більша площа, то менший тиск, і навпаки — що менша площа, то більший тиск. Із тиском також виникає багато суперечностей.

Наприклад, тиск не має напрямку. Проте сила, яку створює тиск, його має: вона перпендикулярна поверхні, на яку діє тиск. Тепер витягніть руку долонею догори і подумайте про силу, що діє на неї, — цього разу без труби. Площа моєї долоні приблизно 150 квадратних сантиметрів, а отже, на неї згори повинна тиснути вага 150 кілограмів. То як я без зусиль тримаю руку? Зрештою я аж ніяк не важкоатлет. Справді, якби це була єдина сила, ви б не змогли утримувати на руці таку вагу. Але є ще й інші сили. Повітря тисне на нас з усіх боків, тому на тильний бік кисті також діє сила 150 кілограмів, але спрямована вгору. У результаті рівнодійна сил, що діють на руку, дорівнює нулю.

Але чому вашу руку не розчавлює під таким значним тиском? Кістки вашої руки явно достатньо міцні, щоб їх не розчавило. Візьміть шматок дерева завбільшки з вашу долоню: він витримає тиск атмосфери.

Але як щодо грудної клітки? Її площа приблизно 1000 квадратних сантиметрів. Отже, внаслідок тиску атмосфери на неї діє рівнодійна сила приблизно 1000 кілограмів, тобто 1 тонна. До спини буде прикладено таку само силу — близько тонни. Тоді чому легені не спадаються? Через те що тиск усередині легенів також становить 1 атмосферу, а отже, відсутній перепад тиску між повітрям у легенях і зовнішнім повітрям, що тисне на грудну клітку. Тому ми можемо легко дихати. Візьміть коробку або дерев'яний чи металевий ящик із такими само розмірами, як ваша грудна клітка. Закрийте ящик. Повітря

всередині — це повітря, яке ви вдихаєте, — 1 атмосфера. Ящик не сплющується з тієї самої причини, чому легені не спадаються. Будинки не завалюються під дією атмосферного тиску, тому що тиск повітря всередині та зовні однаковий. Це явище має назву рівновага тиску. Якби тиск повітря всередині ящика (або будинку) був значно нижчим, ніж 1 атмосфера, усе було б зовсім інакше: цілком можливо, що тоді б ящик не витримав, і я демонструю це явище на лекції. Більше про це далі.

Те, що ми зазвичай не помічаємо атмосферного тиску, не означає, що він для нас не важливий. Недарма в прогнозах погоди постійно згадують про зони високого й низького тиску. І всім нам відомо, що зона високого тиску зазвичай приносить хороші ясні дні, а низький тиск означає, що наближається грозовий фронт. Отже, вміння визначати атмосферний тиск нам би не завадило, але як це зробити, якщо ми його не відчуваємо? Ви, можливо, знаєте, що тиск вимірюють за допомогою барометра, але від цього, звісно, зрозуміліше не стає.

Магія соломинок

Почнімо з невеличкого фокуса, який ви, певно, робили десятки разів. Якщо поставити соломинку в склянку з водою або — як я люблю унаочнювати на лекції — із журавлинним соком, рідина заходить усередину неї. Потім, якщо затулити пальцем отвір у соломинці й почати витягати її зі склянки, сік залишиться в соломинці. Майже магія. Чому так відбувається? Пояснити не так просто.

Щоб розтлумачити суть цього явища (а також збагнути принцип дії барометра), нам потрібно зрозуміти, що таке тиск у рідинах. Тиск, що створюється тільки рідиною, називають гідростатичним (латиною це означає «рідина у стані спокою»). Зазначмо, що загальний тиск у товщі рідини — наприклад, в океані — це сума атмосферного тиску над поверхнею води (як у випадку з витягнутою рукою) та гідростатичного тиску. А тепер головний принцип: *у будь-якій нерухомій рідині тиск на одному рівні однаковий. Таким чином, тиск однаковий у всіх точках горизонтальної площини.*

А отже, якщо в басейні ви занурите руку в воду на 1 метр з мілкішого боку, загальний тиск на неї, який є сумою атмосферного (1 атмосфера)

та гідростатичного тиску, буде таким само, як тиск на долоню вашого друга, також на глибині 1 метр під водою, але з глибшого боку басейну. Але якщо ви опустите руку на глибину 2 метри, гідростатичний тиск на неї зросте вдвічі. Що більше рідини над певним рівнем, то сильніший на цьому рівні гідростатичний тиск.

До речі, це правило стосується й атмосферного тиску. Часом ми порівнюємо атмосферу з повітряним океаном, на дні якого, тобто над більшою частиною земної поверхні, тиск становить приблизно 1 атмосферу. Але на вершині височезної гори над нами менше повітря, тому атмосферний тиск теж нижчий. На вершині Евересту він становить лише одну третю атмосфери.

І от, якщо з якихось причин тиск на одному рівні неоднаковий, рідина перетікатиме доти, доки він не вирівняється. Знову-таки, те саме відбувається з повітрям, і нам цей ефект знайомий як вітер: його спричинює рух повітря із зони високого тиску в зону низького, щоб зменшити їхню різницю. Коли вітер вщухає, тиск вирівнюється.

То що відбувається із соломинкою? Коли ви опускаєте її в рідину — поки що з відкритим верхнім отвором, — вона заходить усередину, поки не досягне одного рівня з рідиною у склянці поза соломинкою. Тиск повітря і там і там однаковий: 1 атмосфера.

Тепер уявімо, що я починаю втягувати сік крізь соломинку. Я висмоктую з неї трохи повітря, унаслідок чого зменшується тиск повітряного стовпа над рідиною всередині соломинки. Якби рідина в соломинці залишилася на місці, тиск на її поверхні був би меншим за 1 атмосферу, тому що тиск повітря над рідиною зменшився б. А отже, тиск на дві поверхні, всередині та за межами соломинки, що перебувають на *одному рівні* (в одній горизонтальній площині), відрізнятиметься, що просто неможливо. У результаті рідина в соломинці піднімається доти, доки тиск рідини в ній на одному рівні з тиском рідини у склянці знову не стане однаковим: 1 атмосфера. Якщо я, почавши пити сік через соломинку, зменшу тиск повітря в ній на 1 відсоток (тобто з 1 атмосфери до 0,99 атмосфери), тоді будь-який напій, який тільки можна собі уявити, — вода, журавлинний сік, лимонад, пиво, вино — підніметься приблизно на 10 сантиметрів. Звідки це число?

Отже, рідина в соломинці повинна компенсувати зниження тиску повітря на 0,01 атмосфери. І з формули для обчислення гідростатичного тиску, якої я тут не наводитиму, мені відомо, що гідростатичний тиск в 0,01 атмосфери для води (чи для будь-якої рідини зі схожою густиною) утворюється стовпом заввишки 10 сантиметрів.

Якщо ваша соломинка завдовжки 20 сантиметрів, вам доведеться сильніше втягувати повітря, щоб його тиск знизився до 0,98 атмосфери і сік піднявся на 20 сантиметрів до вашого рота. Ми до цього ще повернемося. Тепер, коли ви знаєте про невагомість у космічному кораблі (див. розділ 3) і принцип дії соломинок для пиття (цей розділ), пропоную вам цікаву задачу. У космічному кораблі в повітрі плаває кулька соку. Склянка не потрібна через невагомість. Астронавт обережно вставляє соломинку в кульку соку і починає втягувати повітря крізь неї. Чи зможе він випити сік? Вважатимемо, що тиск повітря в кораблі — приблизно 1 атмосфера.

А тепер повернімося до ситуації, коли ви затуляєте пальцем верхній отвір соломинки. Якщо ви її повільно піднімете, скажімо на 5 сантиметрів, щоб другий кінець залишався зануреним, сік не витече з неї. По суті, він залишиться майже (не зовсім) на тому самому рівні, що й раніше. Ви можете це перевірити, поставивши мітку, перш ніж витягати соломинку. Рівень соку в ній тепер буде приблизно на 5 сантиметрів вище рівня соку у склянці.

Але як таке можливо, враховуючи наш непорушний принцип, що тиск у соломинці та у склянці на одному рівні має бути однаковим? Хіба це не суперечить правилу? А от і ні! Природа дуже розумна. Повітря в соломинці між соком і вашим пальцем розшириться рівно настільки, щоб його тиск зменшився на потрібну величину (приблизно на 0,005 атмосфери), а тиск рідини в соломинці встановився на одному рівні з тиском рідини у склянці: 1 атмосфера. Саме тому сік підніметься не точно на 5 сантиметрів, а трохи менше, може, лише на 1 міліметр — цього достатньо, щоб повітря розширилось і його тиск знизився до бажаного значення.

Здогадаєтеся, як високо може піднятися по трубці вода (на рівні моря), якщо закрити її з одного кінця і повільно піднімати вгору? Це залежить від того, скільки повітря було в трубці, коли її почали

піднімати. Якщо зовсім мало, або ще краще — узагалі не було, максимальна висота, на яку зможе піднятися вода, становитиме 10,36 метра. Звісно, вам не вдасться перевірити це за допомогою маленької склянки води, а от відра води, мабуть, буде цілком достатньо. Вас це дивує? Ще складніше зрозуміти, що форма трубки не має значення. Її можна зігнути чи навіть скрутити в спіраль, а вода все одно підніметься на 10,36 метра, тому що саме така висота її стовпа створює гідростатичний тиск в 1 атмосферу.

Ми можемо виміряти атмосферний тиск, знаючи про його залежність від максимально можливої висоти стовпа води. Щоб переконатися в цьому, можете поїхати на вершину гори Вашингтон (її висота приблизно 1920 м), де атмосферний тиск становить приблизно 0,82 атмосфери, тобто тиск на поверхню рідини навколо трубки буде вже не 1 атмосфера, а лише 0,82 атмосфери. Отже, якщо виміряти тиск у воді всередині трубки на одному рівні з її поверхнею навколо трубки, він також має становити 0,82 атмосфери, тому максимальна висота стовпа води буде меншою. Вода в трубці тоді підніметься максимум на 8,5 метра.

Якщо взяти замість води журавлинний сік і виміряти висоту цього стовпа, позначивши на трубці метри і сантиметри, ми отримаємо журавлинний барометр — і він також показуватиме зміни атмосферного тиску. До речі, кажуть, що французький учений Блез Паскаль використав як рідину для свого барометра червоне вино, а чого ще чекати від француза? Італієць Еванджеліста Торрічеллі, який недовгий час був учнем Галілея, винайшов барометр у XVII столітті, врешті-решт зупинивши свій вибір на ртуті. Це тому, що за однакової висоти стовпа, рідини з більшою густиною створюють більший гідростатичний тиск і тому їм доводиться менше підніматися в трубці. Ртуть приблизно в 13,6 разів щільніша за воду, тому для приладу з нею достатньо коротенької трубки, що, безумовно, набагато зручніше. Тиск водяного стовпа заввишки 10,36 метра (що становить 1 атмосферу) такий само, як і тиск ртутного стовпа заввишки 10,36 метра, поділений на 13,6, тобто його висота 76 сантиметрів.

Насправді Торрічеллі спершу не мав на меті створити пристрій для вимірювання атмосферного тиску. Він намагався з'ясувати, чи існує обмеження для висоти, на яку всмоктувальні насоси можуть підняти

стовп води — серйозна проблема іригації. Він наповнив ртуттю скляну трубку, завдовжки приблизно метр, запаяну з одного кінця. Потім закрив пальцем другий кінець трубки, перевернув її та поставив у чашку із ртуттю, прибравши палець. Коли він зробив це, частина ртуті вилилася в чашку, а частина залишилася у трубці. Це був стовп заввишки приблизно 76 сантиметрів. Над ртуттю в трубці, як твердив Торрічеллі, утворився безповітряний простір — це був один з перших випадків, коли в лабораторії було створено вакуум. Торрічеллі знав, що густина ртуті приблизно в 13,6 раза більша за густину води, тому зміг обчислити максимальну висоту водяного стовпа — те, що він і хотів дізнатися — 10,36 метра. Розв'язуючи цю задачу, він також помітив, що із часом ртуть то піднімається, то опускається, і вирішив, що ці зміни пов'язані зі змінами атмосферного тиску. Блискучий здогад. І його експеримент пояснює, чому у верхній частині трубки ртутних барометрів завжди є невеликий безповітряний простір.

Тиск під водою

Намагаючись визначити максимальну висоту водяного стовпа, Торрічеллі також з'ясував те, над чим ви, можливо, замислювалися, намагаючись мигцем побачити рибу в океані. Маю підозру, що ви, мабуть, пробували пірнати із трубкою. І хоча більшість трубок для підводного плавання завдовжки не більше ніж 30 сантиметрів, я впевнений, що часом ви хотіли зануритися глибше і шкодували, що трубка така коротка. Як думаєте, на яку максимальну глибину можна зануритися із трубкою? Півтора метра, три метри чи, може, п'ять метрів?

На лекції я знаходжу відповідь на це запитання за допомогою простого приладу — манометра, що належить до типового лабораторного обладнання. Він дуже простий, і далі я опишу, як зробити його вдома. Мене цікавить, на якій максимальній глибині можливо вдихати повітря крізь трубку. Щоб це з'ясувати, потрібно виміряти тиск води на грудну клітку, який посилюється із глибиною занурення.

Тиск навколо нас, який, не забуваймо, однаковий на одному рівні, дорівнює сумі атмосферного та гідростатичного тиску. Плаваючи під

водою, я вдихаю повітря ззовні. Його тиск 1 атмосфера. Унаслідок цього, коли я вдихаю крізь трубку, тиск повітря в моїх легенях стає таким само і становить 1 атмосферу. Проте тиск, що діє на мою грудну клітку, являє суму атмосферного і гідростатичного тиску. І тому тепер тиск на грудну клітку стає *більшим*, ніж тиск усередині легенів. Різниця між ними дорівнює гідростатичному тиску. Це не ускладнює видих, але щоб вдихнути, потрібно розширити грудну клітку. І якщо гідростатичний тиск занадто високий, мені просто не вистачить сили м'язів, щоб подолати різницю тиску, і я не зможу вдихнути. Саме тому, якщо я захочу зануритися глибше, мені доведеться дихати стисненим повітрям, що дозволить компенсувати тиск води. Проте дихання стисненим повітрям аж надто виснажує організм, і тому час занурення строго обмежено.

А тепер повернімося до плавання із трубкою — як глибоко можна зануритися? Щоб з'ясувати це, я майструю манометр на стіні аудиторії. Уявіть прозору пластикову трубку завдовжки приблизно 4 метри. Я закріплюю один її кінець на стіні ліворуч, потім вигинаю її у формі літери U і закріплюю на стіні, залишивши вільний кінець. Довжина обох частин літери U — трохи менше за 2 метри. Я заповнюю трубку журавлиним соком, і він, звісна річ, устанавлюється на однаковому рівні з обох боків. Потім, дмухаючи у правий кінець трубки, я виштовхую сік у лівій частині вище. Висота, на яку я можу виштовхнути сік, це й буде найбільша глибина, на якій я зможу плавати із трубкою. Чому? Бо це показує, який тиск можуть створити мої легені, щоб подолати тиск води: журавлиний сік і вода в цьому випадку рівноцінні, але сік студентам видно краще.

Я нахиляюся, максимально видихаю, глибоко вдихаю, підношу до рота правий кінець трубки і щосили дму в неї. Щоки западають, очі викочуються, а сік у лівій частині трубки поволі повзе вгору, ледь піднявшись на — хто б міг подумати? — 50 сантиметрів. Це вимагає від мене надзвичайних зусиль, і я можу протриматися так не більше кількох секунд. Таким чином, я проштовхнув сік з лівого боку на 50 сантиметрів угору, а отже, я на стільки само проштовхнув його вниз із правого боку, тобто загалом я перемістив стовп рідини по вертикалі приблизно на метр. Звісно, коли ми дихаємо крізь трубку під водою, то втягуємо повітря, а не видуваємо. То, можливо, втягувати його легше?

Отже, я повторюю експеримент, але цього разу намагаюся щосили всмоктати сік, щоб він якомога вище піднявся у трубці. Утім результат приблизно такий само: сік піднімається приблизно на 50 сантиметрів з того боку, де я втягував повітря, — і відповідно на стільки само опускається з іншого. А я геть виснажений.

Це була імітація плавання з трубкою на метровій глибині, що відповідає тиску в одну десяту атмосфери. Експеримент незмінно дивує студентів, і вони вважають, що в них вийде краще, ніж у їхнього немолодого викладача. Тому я запрошую одного здорованя підійти і спробувати. Він старається щосили — його обличчя розчервонілося — але результат шокує студента. У нього вийшло не набагато краще, ніж у мене — лише на кілька сантиметрів більше.

Це, як виявляється, і є приблизна максимальна глибина, на якій ми ще можемо дихати крізь трубку, — один нещасний метр. І робитимемо ми це впродовж кількох секунд. Саме тому більшість трубок для підводного плавання значно коротші за метр, зазвичай їхня довжина становить приблизно 30 сантиметрів. Спробуйте поплавати з довшою трубкою (для цього згодиться шматок будь-якої трубки) і подивіться, що станеться.

Вам, мабуть, цікаво, яка сила тисне на вашу грудну клітку, коли ви занурюєтеся, щоб трохи поплавати із трубкою. На глибині 1 метр гідростатичний тиск становить приблизно одну десяту атмосфери, або, інакше кажучи, одну десяту кілограма на квадратний сантиметр. Площа поверхні грудної клітки — десь 1000 квадратних сантиметрів. Таким чином, сила, що тисне ззовні на груди, становитиме 100 кілограмів, а сила, що діє на внутрішню стінку грудної клітки внаслідок тиску повітря в легенях, — приблизно 1000 кілограмів. Отже, різниця в тиску на одну десяту атмосфери дає додаткові 100 кілограмів ваги. З такого погляду плавання із трубкою здається набагато важчим, чи не так? А на глибині 10 метрів гідростатичний тиск дорівнюватиме 1 атмосфері, тобто 1 кілограму на квадратний сантиметр поверхні, і сила, що тиснутиме на вашу бідолашну грудну клітку, буде приблизно на тонну більша за спрямовану зовні силу, що створює тиск у легенях.

Саме тому азійські шукачі перлів — дехто з них регулярно пірнав на 30 метрів — ризикують своїм життям. Вони не можуть скористатися

трубкою, тому їм доводиться затримувати дихання і за кілька хвилин, що в них є, швидко робити свою справу.

Тільки зараз ви можете по-справжньому оцінити, яким технічним досягненням є підводний човен. Візьмімо підводний човен, занурений на глибину 10 метрів, і припустімо, що тиск повітря усередині — 1 атмосфера. Гідростатичний тиск (який буде *різницею* між тиском на підводний човен ззовні та зсередини) становить приблизно 10 тонн на квадратний метр, тому, як ви бачите, навіть дуже маленький підводний човен має бути надзвичайно міцним, щоб зануритися на глибину лише 10 метрів.

Зважаючи на це, успіх, якого досяг на початку XVII століття винахідник підводного човна Корнеліс ван Дреббель — я особливо пишаюсь тим, що він також голландець, — просто вражає. Човен занурювався на глибину лише 5 метрів, але навіть у цьому випадку мав витримати гідростатичний тиск у піватмосфери, а це, на хвилиночку, конструкція з дерева і шкіри! Як повідомляють тогочасні джерела, ван Дреббелю вдалося пропливти одним зі своїх суден на цій глибині під час випробувань на Темзі в Англії. За описами, човен, якому надавали рух шість веслярів, був розрахований на 16 пасажирів і міг перебувати під водою кілька годин. «Дихальні трубки» над поверхнею води утримували спеціальні поплавки. Винахідник сподівався вразити короля Якоба I, щоб той замовив у нього кілька таких суден для флоту, але, на жаль, монарха та його адміралів новація не здивувала, і підводний човен так і не використали в бою. Як таємна зброя, можливо, підводний човен ван Дреббеля не годився, але з технічного погляду це було дивовижне досягнення. Більше про ван Дреббеля та перші підводні човни ви можете дізнатися на цьому сайті: dutchsubmarines.com/specials/special_drebbel.htm.

Глибина, на яку занурюються сучасні бойові субмарини, — військова таємниця, але вважають, що це приблизно 1000 метрів, де гідростатичний тиск становить 100 атмосфер, тобто мільйон кілограмів (1000 тонн) на квадратний метр. Не дивно, що корпуси американських підводних човнів виготовлено із високоміцної сталі, а російські підводні човни — із ще міцнішого титану, тому вони можуть занурюватися ще глибше.

Можна легко продемонструвати, що сталося б із підводним човном, якби його корпус був недостатньо міцним або він занурився на занадто велику глибину. Для цього я приєдную вакуумний насос до чотирьолітрової каністри з-під фарби і повільно відкачую з неї повітря. Різниця між тиском повітря ззовні та зсередини не може перевищувати 1 атмосферу (порівняйте із тиском на підводний човен!). Металеві каністри, як ми знаємо, досить міцні, але через різницю тиску ця зминається просто на наших очах, наче тонесенька алюмінієва бляшанка з-під пива. Таке враження, що невидимий велетень схопив її та стиснув у кулаку. Напевно, ми всі колись робили щось подібне із пластиковою пляшкою для води, висмоктуючи з неї значну частину повітря, від чого вона зминалася. На інтуїтивному рівні можна подумати, що пляшку пожмакало через зусилля, з яким ви висмоктали з неї повітря. Але насправді це відбувається тому, що коли я повністю відкачую повітря з каністри або ви висмоктуєте його частину з пляшки, тиск повітря зсередини більше не може компенсувати тиск повітря ззовні. Це те, що в будь-яку мить готовий зробити тиск нашої атмосфери. Абсолютно в будь-яку мить.

Каністра з-під фарби, пластикова пляшка — цілком буденні речі, чи не так? Але якщо поглянути на них очима фізика, можна побачити щось зовсім інше — рівновагу фантастично потужних сил. Наше життя було б неможливе без цієї рівноваги здебільшого невидимих сил, що виникають унаслідок атмосферного та гідростатичного тиску, а також неблаганної сили тяжіння. Ці сили такі могутні, що коли їхня рівновага хоч трохи порушується, це може призвести до катастрофи. Що, як у літака, який летить зі швидкістю 880 кілометрів за годину на висоті 10 кілометрів (де атмосферний тиск 0,25 атмосфери), розгерметизується шов фюзеляжу? Або якщо на даху тунелю Балтиморської гавані, що пролягає нижче поверхні річки Патапско на 15-30 метрів, з'явиться тонюсінька тріщинка?

Наступного разу, йдучи містом, спробуйте думати як фізик. Що ви бачите насправді? Перед вами — результат запеклих битв, що вирують у кожній будівлі, і я маю на увазі не офісні інтриги. По один бік поля бою земна гравітація тягне все донизу — не тільки стіни, підлогу і стелю, а й столи, кондиціонери, поштові скриньки, ліфти, секретарів, топ-менеджерів і навіть ранкову каву з круасанами. По інший бік діють

об'єднані сили сталі, цегли й бетону, і зрештою самої земної поверхні, що виштовхують будівлю доверху.

Якщо так, то можна розглядати архітектуру й будівництво як різні способи зупинити силу тяжіння. Нам може здатися, що деякі невагомні хмарочоси подолали гравітацію. Аж ніяк — просто битва переходить на вищий рівень. Якщо трохи над цим замислитися, стане зрозуміло, що ця зупинка тимчасова. Будівельні матеріали іржавіють, зношуються та руйнуються, тоді як сили природи невблаганні. Це лише питання часу.

Таке балансування може бути неабиякою загрозою у великих містах. Згадайте жахливу аварію 2007 року в Нью-Йорку, коли 83-річна підземна труба діаметром більше ніж півметра зненацька не витримала тиску пари, яку вона подавала. Гейзер пари пробив в асфальті на Лексінгтон-авеню величезну шестиметрову яму, яка проковтнула евакуатор, і вистрілив вище за розташований неподалік 77-поверховий Крайслер-білдинг. Якби ми майже весь час не утримували такі потенційно руйнівні сили в довершеній рівновазі, було б неможливо ходити по вулицях.

Це перемир'я між надзвичайно могутніми силами не завжди є справою рук людини. Згадайте дерева. Спокійні, мовчазні, непорушні, повільні, покірливі, вони використовують десятки біологічних стратегій у боротьбі із силою тяжіння та гідростатичним тиском. Це таке досягнення — щороку випускати нові гілки і нарощувати нові кільця на стовбурі, стаючи міцнішим, хоча сила гравітаційного притягання між деревом і Землею теж зростає. І все одно воно жене сік аж до найвищих своїх гілок. Хіба не дивовижно, що дерева виростають вище за 10 метрів? Адже в моїй соломинці вода піднімається лише на 10 метрів і не більше. Чому (і як) вода може підніматися у деревах значно вище? Секвої сягають у висоту до 100 метрів, і вони якимось постачають воду аж до самої верхівки.

Тому мені невимовно шкода велике дерево, повалене буревієм. Шалений вітер або іній і сніг, що налипли на його гілках, змогли порушити хитку рівновагу сил, яку воно підтримувало. Розмірковуючи над цією нескінченною битвою, я мимоволі ще більше усвідомлю значення того далекого дня, коли наші предки стали із чотирьох кінцівок на дві і виявилися на висоті становища.

Бернуллі та інші

Мабуть, жодне досягнення людства, яке дозволило кинути виклик силі тяжіння та приборкати непостійні вітри й атмосферний тиск, не викликає такого захвату, як польоти. Як літак тримається в повітрі? Ви, можливо, чули, що це пов'язано із законом Бернуллі й повітряними потоками під крилами і над ними. Цей закон названо на честь математика Даніеля Бернуллі, який 1738 року у своїй праці «Гідродинаміка» опублікував рівняння, сьогодні відоме як рівняння Бернуллі. Згідно із цим законом, якщо швидкість руху потоку рідин й газу збільшується, тиск у потоці зменшується. Це важко збагнути, але ви можете побачити закон Бернуллі в дії.

Піднесіть до рота аркуш паперу, наприклад формату А4, коротшою стороною до себе. Аркуш загнеться вниз через силу тяжіння. Тепер з усіх сил дмійте над аркушем і подивіться, що станеться. Ви побачите, як він підніметься. І якщо дмухати досить сильно, аркуш може просто злетіти. Ви щойно продемонстрували закон Бернуллі, і це просте явище також допомагає пояснити, чому літаки тримаються в повітрі. Можливо, більшість із нас уже звикла бачити, як злітає Боїнг 747, або сидіти пристебнутими в кріслі його салону — насправді це вельми дивний досвід. Просто подивіться на захват дітей, які вперше в житті спостерігають за зльотом літака. Максимальна злітна вага Боїнга 747-8 — 448 тонн. Як же він може триматися в повітрі?

Крило літака сконструйовано так, щоб повітря над ним прискорювалося відносно повітря під ним. Згідно із законом Бернуллі, швидший потік повітря зверху від крила зменшує тиск над ним, внаслідок чого виникає різниця між цим низьким тиском і вищим тиском під крилом, яка й забезпечує підймання літака. Назвімо це піднімальною силою Бернуллі. У багатьох книжках із фізики ви прочитаєте, що піднімальна сила Бернуллі — це єдине пояснення, чому літак злітає в повітря. Власне, так пишуть майже всюди. А втім, якщо ви трохи над цим подумаете, то зрозумієте, що це не може бути правдою. Бо інакше як тоді літаки могли б літати догори дриґом?

Тому очевидно, що піднімальну силу не можна пояснити лише законом Бернуллі. Крім піднімальної сили Бернуллі існує також так звана піднімальна сила протидії. Це докладно описує Б. Джонсон у

чудовій статті «Аеродинамічна піднімальна сила, ефект Бернуллі, піднімальна сила протидії» (Aerodynamic Lift, Bernoulli Effect, Reaction Lift, mb-soft.com/public2/lift.html). Піднімальна сила протидії (назва походить від третього закону Ньютона: на кожну дію існує рівна й протилежна протидія) виникає, коли повітря проходить під крилом літака під кутом до потоку. Це повітря, рухаючись від переднього до заднього краю крила, виштовхується ним униз. Це дія. У відповідь на неї має виникнути рівна протидія повітря, спрямована вгору, тому на крило діє піднімальна сила. Для Боїнга 747 (що летить зі швидкістю 880 кілометрів за годину на висоті приблизно 10 кілометрів) піднімальна сила більш як на 80 відсотків забезпечується за рахунок піднімальної сили протидії і менш як на 20 відсотків — за рахунок закону Бернуллі.

Ви можете досить легко продемонструвати піднімальну силу протидії, коли наступного разу їхатимете машиною. Цілком можливо, що ви вже робили це в дитинстві. На ходу опустіть вікно і висуньте руку, тримаючи долоню в напрямку руху, а потім трохи підніміть її, щоб пальці вказували вгору. Ви відчуєте, як вашу руку повітря виштовхує вгору. Будь ласка! Піднімальна сила протидії.

Тепер ви, можливо, думаєте, що збагнули, як деякі літаки можуть літати догори дригом. Проте чи розумієте ви, що коли літак перевертається на 180 градусів, то і сила Бернуллі, і піднімальна сила протидії буде спрямована вниз? Пригадайте: під час польоту в нормальному положенні піднімальна сила спрямована вгору, тому що крила спрямовані вгору, але після перевертання на 180 градусів вони будуть нахилені вниз.

Повторіть ще раз експеримент із висунутою з вікна машини рукою. Коли ваші пальці вказують угору, ви відчуваєте силу, спрямовану вгору. Тепер нахиліть долоню: ви відчуєте, як руку тягне вниз.

Як тоді літаки можуть літати догори шасі? Піднімальна сила повинна якимось чином виникати зі спрямованої вгору сили протидії повітря, адже інших варіантів тут немає. Це можливо, якщо пілот (під час польоту в перевернутому положенні) так піднімає передню частину літака, щоб крила знову опинилися під кутом, спрямованим угору. Це складний маневр, який до снаги тільки дуже досвідченим пілотам. Крім того, покладатися лише на піднімальну силу протидії досить

небезпечно, тому що вона за своєю природою не дуже стабільна. Ви можете відчути цю нестабільність під час експерименту з рукою, висунутою з вікна автівки. Вашу руку трохи бовтає. По суті, це й пояснює, чому більшість авіакатастроф стаються під час зльоту чи посадки — бо силу протидії складно контролювати. А під час зльоту й посадки її частка в піднімальній силі більша, ніж під час польоту на нормальній висоті. Саме тому, коли сідає великий авіалайнер, ви інколи відчуваєте, як його хитає.

Лимонадний злодій

Таємниці тиску, мабуть, і далі нас спантеличуватимуть. Наприклад, повернімося до фізики пиття крізь соломинку. Ось вам остання загадка — чудова головоломка.

Якось удома на вихідних я подумав: «Цікаво, яка найбільша довжина соломинки, крізь яку можна пити сік?». Ми всі бачили довжелезні і вигадливо закручені соломинки, які так обожають діти.

Як ми переконалися раніше, втягуючи повітря, ми можемо змістити сік не більше ніж на метр — і то лише на кілька секунд — отже, я не зможу пити сік із соломинки, вищої за метр. Тому я вирішив відрізати від тонкої пластикової трубки метровий шматок і перевірити, що із цього вийде. Жодних проблем: я спокійнісінько міг пити сік. Тоді я відрізав триметровий шматок трубки, поставив на підлогу відро з водою, а сам заліз на кухонний стілець, і знову напився з такої відстані. Дивовижно! І я подумав: якби я, перебуваючи на другому поверсі свого будинку, побачив, як хтось сидить унизу, скажімо на терасі, з великою склянкою соку, келихом вина чи ще чогось такого, приміром з *гігантським* бокалом журавлиного соку з горілкою. Чи зміг би я викрасти в нього цей напій, висмоктавши його згори через довжезну соломинку? Я вирішив з'ясувати це, що стало одним з моїх найулюбленіших демонстраційних дослідів, з якого студенти і досі дивуються.

Я дістаю довгий шматок прозорої пластикової трубки, змотаної в кільце, і прошу когось, хто сидить у передніх рядах, допомогти мені. На підлозі на видноті стоїть велика лабораторна склянка із

журавлиним соком — ніякої горілки. Я беру моток трубки й починаю підніматися високою драбиною: майже на 5 метрів.

«Що ж, от моя соломинка», — кажу я, кидаючи студентці один кінець трубки. Вона притримує його у склянці, і я відчуваю, що студенти в очікуванні дива. Вони і досі не вірять, що я заліз так високо. Пам'ятаєте: раніше мені вдалося змістити сік у трубці лише на метр. А тепер я піднявся приблизно на 5 метрів. На що я взагалі розраховую?

Я починаю тягнути, трохи покректуючи, і сік у трубці поволі повзе вгору: перший метр, другий, третій. Потім рівень злегка опускається, але згодом сік знову починає дуже повільно рухатися вгору аж до мого рота. Я голосно кажу: «М-м-м-м-м», і аудиторія вибухає оплесками. Що сталося? Як мені вдалося втягнути сік на таку висоту?

Якщо відверто, я трохи зшахраював. Байдуже, адже в цій грі немає правил. Щоразу, коли я вже не міг набрати більше повітря, то затуляв язиком кінець трубки. Інакше кажучи, я герметизував її, і, як ми бачили раніше, сік залишався всередині. Тоді я видихав і починав тягти знову, повторюючи цей сценарій багато разів. Мій рот перетворювався в щось на зразок всисного насоса, а язик — запірною клапана.

Щоб сік піднявся на ці 5 метрів, мені потрібно зменшити тиск повітря у трубці до приблизно піватмосфери. До речі, якщо вам цікаво, я би міг також скористатися цим трюком у досліді з манометром, і тоді я змістив би значно вищий стовп журавлиного соку. Але чи зміг би я тоді плавати із трубкою ще глибше від поверхні озера чи моря?

Як ви гадаєте? Якщо знаєте відповідь, напишіть мені!

⁹ Пам'ятайте, науковці, я тут послуговуюся радше повсякденною, ніж науковою мовою. Хоч кілограм — це насправді одиниця маси, а не ваги, його часто вживають і так, і так, що я і роблю.

Розділ 5

Навколо веселки

У нашому повсякденному житті так багато маленьких див — справді приголомшливих — більшість часу залишаються непоміченими, бо нас не навчили їх бачити. Пригадую, якось уранці, чотири або п'ять років тому, я пив еспресо, сидячи на своєму улюбленому червоно-синьому стільці Рітвельда, і несподівано помітив на стіні неймовірно гарний візерунок із круглих цяток світла серед мерехтливих тіней, які падали від листя дерева за вікном. Мої очі випромінювали радість від того, що я їх помітив. Моя дружина С'юзан, ще не зрозумівши, що сталося, поцікавилася із властивою їй проникливістю, у чому річ.

«Знаєш, що це таке? — відповів я, вказуючи на сонячні кола. — Ти розумієш, звідки вони беруться?» Тоді я пояснив. Можливо, ви очікували, що світло, падаючи на стіну, утворюватиме багато маленьких мерехтливих відблисків, а не плями, правильно? Але кожен невеличкий просвіт між листям діє неначе камера-обскура, яка відтворює зображення джерела світла — у нашому випадку сонця. Форма просвітів не має значення: якщо вони маленькі, то відблиски на стіні повторюватимуть форму самого джерела світла.

Тому під час неповного сонячного затемнення світло, що летіть крізь моє вікно, більше не утворюватиме кіл на стіні: усі кола будуть надщербленими, тому що таку форму матиме затемнене сонце. Про це було відомо ще Аристотелю понад 2000 років тому! Я був у захваті, побачивши на стіні власної спальні ці відблиски, які демонструють дивовижні властивості світла.

Таємниці веселки

Хоч би куди ми глянули, усюди можемо побачити неймовірні світлові явища — іноді їх можна спостерігати в буденних речах, а деколи в найпрекрасніших витворах природи. Наприклад, веселки — надзвичайне явище. І вони повсюди. Відомі науковці, зокрема Ібн аль-Хайсам, арабський учений і математик XI століття, «батько» оптики, Рене Декарт, французький філософ, математик і фізик, а також сам сер

Ісаак Ньютон, зачаровувалися веселками і намагалися їх пояснити. А проте більшість сучасних викладачів фізики не приділяють належної уваги цьому фантастичному явищу. Мені просто не віриться. Я вважаю, що це *злочин*.

Фізика веселки не те щоб проста. То й що? Як можна не братися за те, що має такий потужний вплив на нашу уяву? Як можна не хотіти розгадати таємницю, яка криється за внутрішньою красою цих неймовірних творінь? Я завжди любив читати лекції про веселки і перед цим незмінно казав студентам: «Після цієї лекції ваше життя зміниться назавжди!». Те саме стосується і вас.

Колишні студенти і ті, хто дивився мої лекції онлайн, уже не одне десятиліття надсилають мені прекрасні фотографії веселок та інших атмосферних явищ. Таке відчуття, наче я керую всесвітньою мережею мисливців на веселки. Серед цих світлин трапляються надзвичайні — особливо з Ніагарського водоспаду, де через величезну кількість дрібних бризок веселки просто приголомшливі. Можливо, ви теж захочете надіслати мені фотографії. Буду радий!

Упевнений, що за своє життя ви бачили десятки, якщо не сотні веселок. Якщо ви були у Флориді чи на Гаваях або десь ще в тропіках, де часто під час зливи світить сонце, то бачили їх навіть більше. Якщо ви сонячного дня поливали галявину зі шланга або розбризкувача, то, можливо, самі створювали веселки.

Більшість із нас часто *дивилася* на веселки, проте дуже мало хто з нас їх *бачив*. У давніх міфах веселку називали дугою богів, мостом або дорогою, що поєднує світ смертних зі світом богів. У західній культурі у Старому завіті веселка була втіленням обіцянки Бога більше не посилати на Землю нищівний потоп: «Я веселку Свою дав у хмарі».

Одна із причин привабливості веселок — їхній розмах, те, як вони, величні й такі короткочасні, розкидаються на все небо. Але, як це часто буває у фізиці, за цією величчю стоїть незліченна кількість надзвичайно малого — крихітних, інколи діаметром менше міліметра, сферичних краплинок води, розсіяних у повітрі.

Хоча вчені намагалися обґрунтувати виникнення веселки впродовж тисячоліття, перше переконливе пояснення запропонував Ісаак Ньютон у праці «Оптика», опублікованій 1704 року. Він одночасно зрозумів кілька речей, які мають важливе значення для формування

веселки. По-перше, учений показав, що звичайне біле світло складається з усіх кольорів (я хотів сказати «з усіх кольорів веселки», але так ми надто забігли б наперед). Пропустивши світло крізь скляну призму, він розділив його на кольори-складники. Потім, спрямувавши це заломлене світло назад крізь іншу призму, він знову поєднав кольорове світло в біле, довівши, що сама призма жодним чином не забарвлює світла. Також він з'ясував, що багато різних речовин, зокрема вода, можуть заломлювати світло. І так він зрозумів, що в основі виникнення веселки лежить заломлення світла в дощових краплях і його відбивання.

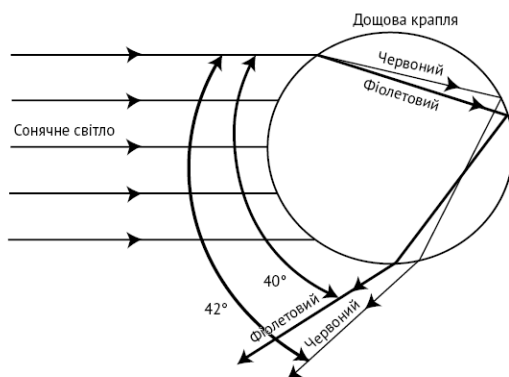
Веселка на небі, як цілком правильно вирішив Ньютон, — це результат взаємодії між сонцем, силою-силенною дощових крапель і вашими очима, які повинні спостерігати за цими краплинами точно під потрібними кутами. Щоб зрозуміти, як виникає веселка, потрібно зупинитися на тому, що відбувається, коли світло потрапляє на дощову краплю. Але пам'ятайте: все, що я скажу про цю одну краплю, стосується незліченної кількості крапель, з яких складається будь-яка веселка.

Щоб побачити веселку, потрібно дотримуватися трьох умов. По-перше, сонце має бути у вас за спиною. По-друге, в небі перед вами мають бути дощові краплі — чи за кілька кілометрів, чи лише за кілька сотень метрів від вас. По-третє, на шляху сонячного світла до крапель не повинно бути жодних перешкод, наприклад хмар.

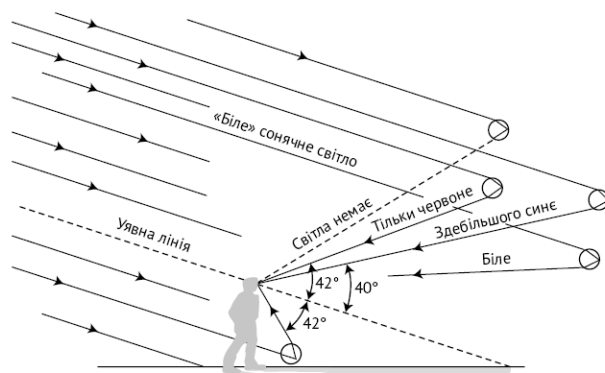
Коли пучок світла потрапляє в дощову краплю і заломлюється в ній, він розпадається на кольорові пучки. Найменше заломлюється червоне світло, а найбільше — фіолетове. Усі ці різнокольорові пучки рухаються далі крізь краплю. Частина світла при цьому не змінює напрямку і виходить назовні, а частина — відбивається під кутом до передньої стінки краплі. Насправді якась частина світла відбивається більше одного разу, але цей факт поки що неважливий. На цей момент нас цікавить лише світло, що відбивається один раз. Коли світло виходить із передньої поверхні краплі, частина його знову заломлюється, далі розділяючись на різнокольорові промені.

Після того як сонячні промені, проходячи крізь краплю, заломлюються, відбиваються і знову заломлюються, їхній напрямок значно змінюється. Ми бачимо веселки тому, що кут між червоними

променями на виході з краплі та початковим напрямком сонячного світла, що падає на краплю, *завжди менше* ніж 42 градуси. І це однаково стосується всіх крапель, адже сонце, по суті, нескінченно далеко від них. Червоне світло може виходити під будь-яким кутом від 0 до 42 градусів, але не більше, і цей максимальний кут для різних кольорів буде іншим. Для фіолетового світла він становить приблизно 40 градусів. Різні максимальні кути для кожного кольору пояснюють кольорові смуги веселки.



Коли дотримано всіх вищеперерахованих умов, можна помітити веселку. Як видно з малюнка нижче, якщо провести уявну лінію від сонця через свою голову до кінця своєї тіні на землі, вона буде точно паралельна напрямку від сонця до крапель. Якщо сонце стоятиме вище, ця лінія буде крутішою, а тінь — коротшою. Тобто це обернена залежність. Назвімо цю лінію, що йде від сонця через голову до тіні її на землі, уявною лінією. Вона дуже важлива, тому що підкаже, де в небі шукати веселку.



Дощові краплі, розташовані під кутом 42 градуси до уявної лінії, будуть червоними. Під кутом 40 градусів – синіми. Для кутів, менших за 40 градусів, краплі будуть білими (як сонячне світло). Світла, відбитого від крапель, розташованих під кутами більше ніж 42 градуси, ми не побачимо (див. текст).

Якщо ви подивитесь під кутом приблизно 42 градуси від цієї уявної лінії (не має значення — вгору, правіше чи лівіше), ви побачите там червону смугу веселки. На відстані приблизно 40 градусів від уявної лінії — угорі, справа чи зліва — ви побачите фіолетову смугу веселки. Але річ у тім, що її не дуже добре видно, тому ви, найімовірніше, помітите синю смугу. З огляду на це далі ми називатимемо її синьою. Хіба це не ті самі кути, на які максимально може відхилятися світло, потрапляючи в дощові краплі? Так, і це не випадково. Ще раз подивіться на малюнок.

Як щодо синьої смуги веселки? Пригадайте: її магічне число — приблизно 40 градусів, на 2 градуси менше, ніж у червоної смуги. Тому *максимальний* кут, у межах якого синє світло буде заломлюватися, відбиватися і знову заломлюватися в *різних дощових краплях*, становить 40 градусів. Таким чином, ми побачимо синє світло під кутом 40 градусів до уявної лінії. Це ближче до уявної лінії, ніж 42 градуси, тому синя смуга завжди буде із *внутрішнього* краю червоної смуги веселки. Решта кольорів веселки — оранжевий, жовтий, зелений — розташовані між червоною і синьою смугами. Щоб дізнатися більше, ви можете переглянути мою лекцію про веселки онлайн: cutt.ly/awrxgJt.

Можливо, вам цікаво, чи бачимо ми на синій смузі ще якісь інші кольори. Червоне світло може з'являтися і під кутом 40 градусів, бо це менше 42 градусів. Якщо ви поставили це запитання, ви розумники — воно дуже слухне. Відповідь полягає в тому, що за максимального кута для певного кольору цей колір переважатиме над рештою. Утім у випадку із червоним інших кольорів таки не буде, бо його кут найбільший.

Чому веселка має форму дуги, а не прямої лінії? Повернімося до уявної лінії від ваших очей до тіні вашої голови на землі та до магічного числа 42. Якщо відкласти 42 градуси в усіх напрямках від уявної лінії, утвориться кольорова дуга. Але, як вам відомо, не всі веселки мають вигляд повної дуги — часом ми бачимо лише маленькі фрагменти. Це стається, коли в небі не достатньо дощових крапель в усіх напрямках або якісь частини веселки опиняються в тіні від хмар.

У цієї взаємодії між сонцем, дощовими краплями і вашими очима є ще один важливий аспект, і він допоможе значно краще зрозуміти,

чому веселки — як природні, так і штучні — саме такі. Наприклад, чому одні веселки гігантські, а інші ледь піднімаються над горизонтом? І як пояснити веселки, які часом можна побачити серед прибіжних хвиль, у фонтанах, на водоспадах чи в бризках із садового шланга?

Повернімося до уявної лінії, що проходить від ваших очей до тіні від вашої голови. Вона починається від сонця й доходить до землі. Утім цю лінію можна подумки продовжити як завгодно далеко, навіть набагато далі за кінець вашої тіні. Ця уявна лінія дуже корисна, бо можна уявити, що вона проходить через центр кола (його називають антисонячною точкою), на довжині якого розташована веселка. Це коло показує, де б утворилася веселка, якби їй не перешкоджала поверхня Землі. Залежно від висоти сонця, веселка також буде нижча або вища. Коли сонце дуже високо, веселка лише трохи визирає над горизонтом, тоді як увечері перед заходом або рано-вранці одразу після світанку, коли сонце низько й ваша тінь довга, веселка може сягати гігантських розмірів, здіймаючись до середини неба. Чому до середини? Бо максимальний кут, під яким веселка може з'явитися над горизонтом, 42 градуси, що близько до 45 градусів, а це половина прямого кута, тобто прямо над головою.

То як упольовати веселку? По-перше, довіртеся інтуїції, яка підкаже, коли можна побачити веселку. Більшість із нас зазвичай добре відчуває це: коли сонце світить перед зливою або виходить одразу після неї. Або коли під час невеличкого дощу сонячне світло все-таки потрапляє на дощові краплі.

Відчувши, що ось-ось з'явиться веселка, зробіть таке. По-перше, поверніться спиною до сонця. Потім знайдіть тінь своєї голови й подивіться під кутом приблизно 42 градуси до уявної лінії в будь-який бік. Якщо сонячного світла достатньо, так само як і кількості дощових крапель, вони почнуть взаємодію, і ви побачите барвисту дугу.

Припустімо, сонця не видно — воно ховається за хмарами чи будинками, але світить. Це не повинно завадити вам побачити веселку, за умови, що між сонячним світлом і краплями відсутні хмари. Під вечір я, наприклад, бачу веселку з вітальні, вікна якої виходять на схід, хоч мені й не видно сонця, яке в цей час пішло на захід. Крім того, зазвичай веселку легко помітити й без уявної лінії та не знаючи про 42 градуси, але в одному випадку ці дві обставини можуть мати

вирішальне значення. Я люблю гуляти пляжами Плам-Айленду, що неподалік від узбережжя штату Массачусетс. Під вечір сонце на заході, а океан — зі східного боку. Якщо хвилі досить високі й від них здіймаються хмари дрібних бризок, у яких відбувається те саме, що в дощових краплях, то можна побачити два невеличкі фрагменти веселки: один під кутом приблизно 42 градуси лівіше від уявної лінії, а другий — правіше. Ці веселки «живуть» лише якусь мить, тому помітити їх значно простіше, якщо наперед знаєш, куди дивитися. Хвилі знаходять одна за одною, тому якщо наберетеся терпіння, ви обов'язково їх дочекаєтеся. Далі я розповім про це більше.

Наступного разу, коли ви побачите веселку, можете звернути увагу на ось що. Пам'ятаєте нашу розмову про максимальний кут, під яким світло певного кольору виходить із краплі? Хоч ви й бачите на виході з крапель синє, червоне або зелене світло, самі краплі не такі перебірливі: вони заломлюють, відбивають і знову заломлюють безліч світла, що виходить і під *меншими* за 40 градусів кутами. Це світло — суміш усіх кольорів приблизно однакової інтенсивності, яку ми сприймаємо як біле світло. Саме тому небо всередині веселки дуже світле і ясне. Водночас світло, що заломлюється, відбивається і знову заломлюється в краплі, не *може* вийти з неї під кутом, більшим за 42 градуси, тому небо біля зовнішнього краю веселки темніше, ніж усередині неї. Це особливо впадає у вічі, якщо порівняти колір неба під і над дугою. Можливо, ви ніколи цього й не помітили б, якби спеціально не звернули уваги. На сайті Atmospheric Optics (atoptics.co.uk) є чудові фотографії веселок, на яких можна побачити цей ефект.

Щойно я почав пояснювати студентам веселки, я зрозумів, яка це глибока тема — і скільки мені ще треба дізнатися. Візьмімо подвійну веселку, яку ви, мабуть, спостерігаєте час від часу. Насправді в небі майже завжди з'являються дві веселки: так звана первинна веселка, про яку ми досі говорили, і та, що зветься вторинною веселкою.

Якщо ви бачили подвійну веселку, то, очевидно, помітили, що вторинна веселка значно тьмяніша за первинну. Проте, мабуть, не завважили, що кольори вторинної веселки розташовані у зворотному порядку: синій — зовні, а червоний — усередині. У вклейці із фотографіями ви можете побачити чудовий знімок подвійної веселки.

Щоб зрозуміти, як виникає вторинна веселка, повернімося до нашої ідеальної краплі — звісно, не забувайте, що для вторинної веселки їх так само потрібна незліченна кількість. Деякі промені, потрапляючи в краплі, відбиваються всередині тільки раз. Деякі відбиваються двічі. Хоча світло може відбиватися всередині краплі багато разів, первинну веселку створюють лише ті, в яких це стається *один* раз. Тоді як вторинну веселку — тільки ті, в яких світло відбивається *двічі*. Через те що промінь зайвий раз відскакує всередині краплі, кольори на вторинній веселці розташовані у зворотному порядку.

Дуги подвійної веселки розташовані на відстані одна від одної — вторинна завжди зовні — тому що червоне світло після другого відбивання виходить із краплі під кутами, *більшими* (так, більшими) за 50 градусів, а синє — під кутами, більшими за 53 градуси. Тому вторинну веселку слід шукати на відстані близько 10 градусів *над* первинною. Невиразність вторинної веселки зумовлена тим, що променів, які відбиваються двічі, значно менше, ніж тих, що віддзеркалюються раз, тому світла для її створення менше. Звісно, із цієї самої причини її складніше помітити, але тепер, коли ви знаєте, що вона супроводжує первинну веселку і де її шукати, ви безперечно бачитимете її частіше. Також я пропоную вам на кілька хвилин завітати на сайт [Atmospheric Optics](http://AtmosphericOptics.com).

Тепер, знаючи, як виникають веселки, ви можете створити маленьке диво на власному подвір'ї, під'їзній доріжці або навіть тротуарі. Усе, що вам потрібно, — це садовий шланг. Але оскільки ви можете маніпулювати краплями і вони розташовані близько до вас, врахуйте декілька суттєвих відмінностей. По-перше, створити веселку можна, навіть коли сонце перебуває в зеніті. Чому? Бо можна розсіяти краплі між собою та своєю тінню, що в природі стається дуже рідко. Якщо є краплі, на які потрапляє сонячне світло, цього досить, щоб з'явилася веселка. Можливо, ви вже робили це, але не так цілеспрямовано.

Якщо шланг має насадку, відрегулюйте його на дрібне розпилювання, щоб краплі були маленькими, і вдень, коли сонце буде високо, спрямуйте шланг до землі й відкрийте воду. Ви не зможете побачити все коло, а лише фрагменти веселки. А розвертаючись зі шлангом по колу, ви шматок за шматком побачите повне коло веселки. Навіщо розвертатися? Тому що в людей немає очей на потилиці!

Червону смугу ви побачите під кутом 42 градуси до уявної лінії, на внутрішньому краї веселки буде синя смуга, а всередині — біле світло. Я люблю виконувати цей скромний акт творення, коли поливаю сад, і особливо мене тішить можливість розвернутися на 360 градусів і створити повну веселку. (Звісно, тоді сонце не завжди залишатиметься за спиною).



Якось холодного зимового дня 1972 року я так хотів зробити хороші фотографії цих саморобних веселок для студентів, що змусив свою бідолашну семирічну дочку Емму стояти на подвір'ї зі шлангом і високо розбризкувати воду, поки я клацав фотоапаратом. Але, напевно, дочці вченого іноді доводиться трохи страждати заради науки. І я таки отримав чудові фотографії. Мені навіть вдалося сфотографувати вторинну веселку на тлі темного асфальту під'їзної доріжки. У вклейці ви можете побачити фотографію Емми.

Сподіваюся, ви спробуєте здійснити цей експеримент — але влітку. І не засмучуйтеся, якщо не побачите вторинної веселки, можливо, вона занадто бліда, а асфальт на доріжці не досить темний, тому її не видно.

Тепер, коли ви розумієте, де й за яких умов з'являється веселка, ви захочете шукати їх знову і знову. Часто я нічого не можу із собою вдіяти. Кілька днів тому, коли ми із С'юзан поверталися додому, почався дощ, але ми їхали точно на захід, у бік сонця. Тому я, попри щільний рух, зупинився на узбіччі, вийшов з машини та озирнувся — а от і вона, справжня красуня!

Зізнаюся, що щоразу, проходячи повз фонтан у сонячну погоду, я намагаюся стати туди, звідки може бути видно веселку, яка, я знаю, там є. Якщо ви сонячного дня опинитеся біля фонтана, теж спробуйте. Станьте між сонцем і фонтаном спиною до сонця і пам'ятайте, що бризки від фонтана виконують таку саму роль, як розсіяні в небі

краплі. Знайдіть тінь від своєї голови — це буде уявна лінія. Потім подивіться під кутом 42 градуси до неї. Якщо в цьому напрямку достатньо крапель, ви помітите спочатку червону смугу веселки, а тоді з'явиться й решта. У фонтані рідко можна побачити повне півколо веселки — хіба що ви стоїте до нього дуже близько — але це так красиво, що спробувати, безперечно, варто.

Попереджаю, щойно ви знайдете веселку, у вас може виникнути сильне бажання розказати про неї своєму оточенню. Я частенько показую фонтанні веселки перехожим і впевнений, що дехто з них вважає мене диваком. Але чому тільки я повинен насолоджуватися цими прихованими дивами? *Звісно*, я демонструю їх іншим. Якщо ви знаєте, що просто перед вами може бути веселка, чому б не пошукати її, а знайшовши, не допомогти іншим також побачити її? Адже це таке захопливе явище!

Студенти часто мене запитують, чи трапляється третинна веселка. І так і ні. Третинна веселка, як ви, можливо, вже здогадалися, виникає, коли сонячне світло всередині краплі відбивається тричі. Центром третьої дуги є «сонце» і так само, як у первинної веселки, її центр лежить в антисонячній точці, кут до якої — приблизно 42 градуси, а червона смуга розташована із зовнішнього краю. Таким чином, щоб її побачити, потрібно дивитися в бік сонця, а між вами й сонцем має іти дощ. Але в такому випадку сонця майже ніколи не видно. Це ще не всі проблеми — багато сонячного світла проходить крізь краплі, взагалі не відбиваючись, і тому навколо сонця з'явиться дуже яскраве й велике сяйво, через що побачити третинну веселку майже неможливо. Вона ще тьмяніша за вторинну. Також вона значно ширша за первинну і вторинну веселки: а отже, й без того слабке світло ще більше розсіюється по небу, внаслідок чого побачити її ще складніше. Як мені відомо, фотографій третинної веселки не існує, і я не чув, щоб хтось її бачив. Утім інформація про такі спостереження є.

Безумовно, усіх цікавить питання, чи реальні веселки. Люди кажуть собі: «Можливо, це міраж, що без кінця відступає, поки ми наближаємося до нього». Урешті-решт, чому ми не бачимо кінця веселки? Якщо ви в глибині душі теж так вважаєте, можете заспокоїтися. Веселки існують насправді, це результат взаємодії між справжнім сонячним світлом, справжніми краплями і вашими

справжніми очима. Але оскільки йдеться про конкретну взаємодію саме між вашими очима, сонцем і краплями, ви й людина через дорогу побачите різні веселки. Однаково істинні, але різні.

Зазвичай ми не бачимо, як кінець веселки торкається землі, не тому, що його не існує, а тому, що він дуже далеко або його затуляють будинки, дерева чи гори, або в повітрі біля землі менше крапель, і веселка занадто тьмяна. Але якщо вам вдасться достатньо наблизитися до веселки, ви можете навіть її торкнутися, зокрема, це можна зробити з веселкою, що з'являється у бризках води зі шланга.

У мене навіть сформувалася звичка тримати веселки в руці, коли я приймаю душ. Я відкрив це випадково. Стоячи обличчям до струменів води, я несподівано побачив у душі дві (саме так, дві!) яскраві первинні веселки, кожна кілька десятків сантиметрів завдовжки й кілька сантиметрів завширшки. Це було так неймовірно й прекрасно — наче у сні. Я простягнув руки та взяв ці веселки в долоні. Дивовижне відчуття! Я сорок років читав лекції про веселки, але мені ще не доводилося бачити дві первинні веселки на відстані витягнутої руки.

Сталося от що. Крізь вікно ванної у душ потрапила вузька смуга світла. У певному розумінні це було так, наче я стояв не перед фонтаном, а всередині нього. Оскільки вода була дуже близько від мене, а мої очі розташовані на відстані приблизно шести сантиметрів одне від одного, кожне око мало свою уявну лінію. Правильні кути, потрібна кількість води — і кожне око побачило свою первинну веселку. Коли я заплющував одне око, одна з веселок зникала. Заплющував друге — щезала друга. Я залюбки сфотографував би це неймовірне видовище, але не можу, тому що у фотоапарата лише одне «око».

Завдяки тим веселкам, що були так близько, я по-новому усвідомив, які ж вони реальні. Коли я повертав голову, вони теж рухалися, але поки я не ворушив головою, вони також залишалися на місці.

Іноді я по змозі обираю для ранкового душу час, коли можна «спіймати» ці веселки. Щоб сонце зазірало у вікно ванної під прямим кутом, воно має перебувати в певному положенні на небі, і це можливо тільки від середини травня до середини липня. Ви, мабуть, знаєте, що в певні місяці сонце сходить раніше й піднімається на небо вище і що в

Північній півкулі воно взимку сходить південніше, а влітку — північніше.

Вікно моєї ванної виходить на південь, але через сусідню будівлю світло аж ніяк не може потрапити у ванну строго з півдня. Тому сонячне проміння падає туди тільки приблизно з південного сходу. Коли я вперше побачив веселку в душі, я приймав його дуже пізно, близько десятої ранку. Щоб ви побачили веселку в душі, у вашій ванній має бути вікно, крізь яке сонячне світло зможе потрапити на водяні бризки. Насправді, якщо з вікна ванної ніколи не видно сонця, немає сенсу шукати веселки в душі — їх просто там не буде. Сонячне світло повинно мати змогу досягти вашого душу. І навіть якщо воно таки потрапляє туди, це ще не є гарантією, що ви побачите веселку, бо потрібна достатня кількість крапель води, розташованих під кутом 42 градуси від уявної лінії, а це не завжди можливо.

Очевидно, всі ці умови рідко коли виконуються, але чому б не спробувати? І якщо з'ясується, що сонячне світло потрапляє у ваш душ саме під кінець дня — що ж, тоді ви можете подумати про зміну графіка ранкового душу.

Чому моряки одягають сонцезахисні окуляри

Коли вирішите піти на полювання на веселки, обов'язково зніміть сонцезахисні окуляри, якщо вони поляризовані, інакше ви можете все прогавити. Зі мною колись стався подібний кумедний випадок. Як я вже розповідав, я люблю прогулянки по пляжу на Плам-Айленді. І я вже пояснював, як можна побачити маленькі веселки в бризках хвиль. Якось давно я ішов уздовж пляжу. День видався сонячний, було вітряно, і від хвиль, що накочувалися на берег, здіймалося безліч дрібних бризок, тому я часто бачив невеличкі фрагменти веселок, про які вже згадував у цьому розділі. Я став показувати їх своєму другу, який гуляв разом зі мною, але він сказав, що нічого такого не бачить. Цей діалог повторювався, певно, з півдесятка разів. «Он вона!» — кричав я дещо роздратовано. «Нічого не бачу!» — вигукував він у відповідь. Але потім мені сяйнула думка, і я попросив його зняти сонцезахисні окуляри й показати мені — звісно, вони виявилися

поляризованими. Без окулярів він побачив веселки й навіть став показувати їх мені. У чому була річ?

Веселки за своєю природою дещо дивні, тому що майже повністю складаються з поляризованого світла. Мабуть, термін «поляризований» відомий вам як характеристика сонцезахисних окулярів. З наукового погляду він не зовсім точний, але спершу я поясню, що таке поляризоване світло, а тоді повернемося до сонцезахисних окулярів і веселок.

Хвилі виникають унаслідок коливання «чогось». Унаслідок коливання камертона або скрипкової струни утворюються звукові хвилі, про які я розповім у наступному розділі. Світлові хвилі з'являються через коливання електронів. Хвилі, в яких усі коливання відбуваються в одному напрямку, перпендикулярному до напрямку їхнього поширення, називають лінійно поляризованими. Для простоти я далі опускатиму слово «лінійний», тому що в цьому розділі йтиметься лише про такий вид поляризованого світла.

У звукових хвилях поляризація неможлива, тому що напрямок їхнього поширення збігається з напрямком руху молекул повітря в поздовжніх механічних хвилях. Подібні хвилі можна створити за допомогою іграшки-пружинки «слінкі». Натомість у світлі може відбуватися поляризація. Сонячне світло або світло від лампочки у вас удома — приклади неполяризованого світла. Утім його можна легко перетворити на поляризоване. Один зі способів — купити так звані поляризовані сонцезахисні окуляри. Тепер ви розумієте, чому ця назва не зовсім правильна. Насправді це поляризаційні окуляри. Або можна купити лінійний поляризатор (винахід Едвіна Ленда, засновника компанії Polaroid) і поглянути на світ крізь нього. Поляризатори Ленда, зазвичай завтовшки 1 міліметр, мають різні розміри. Майже все світло, що проходить крізь такі поляризатори (включно з поляризаційними окулярами), стає поляризованим.

Якщо два прямокутні поляризатори (я роздаю їх усім студентам, щоб вони могли експериментувати з ними вдома) покласти один на одного під прямим кутом, вони взагалі не пропускатимуть світло.

Природа створює багато поляризованого світла і без допомоги поляризаторів Ленда. Світло з блакитного неба, що падає під прямим кутом до сонця, майже повністю поляризоване. Як про це дізнатися?

Подивіться на небо (в будь-яку точку під прямим кутом до сонця) через один лінійний поляризатор і, не перестаючи дивитися, повільно обертайте його. Ви помітите, що яскравість неба зміниться. Коли небо стане майже повністю темним, світло із цієї частини неба буде практично повністю поляризованим. Таким чином, щоб розпізнати поляризоване світло, достатньо одного поляризатора (хоча значно цікавіше, якщо їх у вас два).

У розділі 1 я описував свій демонстраційний досвід, у якому біле світло, розсіюючись у сигаретному димі, стає блакитним. Я влаштовую все так, що блакитне світло розсіюється в аудиторію приблизно під прямим кутом: воно також майже повністю поляризоване. Студенти можуть переконатися в цьому за допомогою поляризаторів, які вони завжди беруть із собою на лекції.

Сонячне світло, що відбивається від води або скла, також може стати майже повністю поляризованим, якщо падає на поверхню під певним кутом, який називають кутом Брюстера. (Девід Брюстер — шотландський фізик XIX століття, який багато працював у царині оптики). Саме тому човнярі й моряки одягають поляризаційні сонцезахисні окуляри — вони не пропускають більшість світла, що відбивається від поверхні води.

Я завжди ношу в гаманці хоча б один поляризатор — так-так, *завжди* — і закликаю до цього студентів.

Чому я розповідаю вам усе це про поляризоване світло? Тому що світло від веселки майже повністю поляризоване. Світло поляризується, коли відбивається всередині краплі, а це, як ви тепер знаєте, необхідна умова для виникнення веселки.

На лекції я створюю особливу веселку (за допомогою однієї, але дуже великої краплі води), яка дозволяє мені продемонструвати, що: 1) червона смуга розташована із зовнішнього краю веселки, 2) фіолетова — із внутрішнього, 3) світло всередині дуги веселки біле і яскраве, на відміну від світла за дугою, а також 4) світло від веселки поляризоване. Остання особливість веселок надзвичайно мене захоплює (і це одна із причин, чому я завжди ношу із собою поляризатори). Ви можете переглянути цей чудовий експеримент на відео з моєї лекції: cutt.ly/awrxgJt.

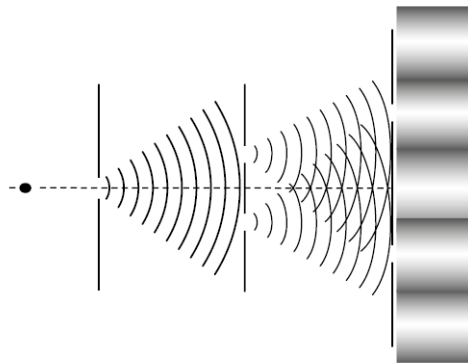
Окрім веселки

Веселки — найвідоміші та найбарвистіші витвори атмосфери, проте аж ніяк не єдині. Існує ще сила-силенна атмосферних явищ, деякі з них досить дивні й надзвичайні, а деякі — глибоко незбагненні. Але поки що не прощаймося з веселками й погляньмо, куди вони нас приведуть.

Якщо уважно придивитися до дуже яскравої веселки, часом можна помітити з її внутрішнього краю кілька то яскравіших, то темніших смуг. Їх називають додатковими веселками (вони зображені на фотографії у вклейці). Щоб пояснити це явище, нам доведеться відмовитися від уявлень Ньютона про природу світлових променів. Він вважав, що світло складається із частинок, і коли окремі промені проникають у дощову краплю, заломлюються в ній і виходять з неї, вони поводяться як маленькі частинки. Але ми зможемо пояснити додаткові веселки, тільки якщо уявлятимемо світло як хвилі. І щоб виникла додаткова веселка, світлові хвилі мають пройти крізь дуже маленькі краплі — діаметром менше міліметра.

Хвильову природу світла продемонстрував один з найважливіших у всій фізиці експериментів, який зазвичай називають експериментом з подвійною щілиною. Орієнтовно в 1801–1803 роках англійський учений Томас Юнг, розщепивши вузький пучок світла на два, побачив на екрані візерунок (суму цих двох пучків), який можна пояснити, тільки якщо припустити, що світло складається із хвиль. Згодом цей експеримент проводили інакше, використовуючи дві щілини (або мікроотвори). Для подальших пояснень уявімо, що вузький пучок світла падає на два близько розташовані крихітні отвори в аркуші тонкого картону. Світло, проходячи крізь ці отвори, потрапляє на екран. Якби світло складалося із частинок, кожна з них пройшла б або крізь один отвір, або крізь другий (вона не може пройти крізь обидва), і тому ви побачили б на екрані дві яскраві точки. Утім ми спостерігаємо зовсім інший малюнок. Він точно повторює те, що було б, якби на екран потрапили дві хвилі — одна вийшла з одного мікроотвору, і водночас така сама — із другого. Додавання хвиль відбувається за принципами так званої інтерференції. Коли гребені хвиль з одного отвору збігаються із западинами хвиль із другого, хвилі гасять одна одну. Це явище має назву послаблювальна (або

деструктивна) інтерференція, і місця на екрані, де це спостерігають (і їх кілька), залишаються темними. Хіба це не чарівно — світло плюс світло дає темряву! І навпаки, в інших місцях екрана, де дві хвилі синхронізовані одна з одною, а їхні найвищі й найнижчі точки збігаються, відбувається підсилювальна (або конструктивна) інтерференція, і ми в результаті отримуємо яскраві точки (їх теж буде кілька). Таким чином, ми побачимо на екрані *розсіяний* малюнок з темних і світлих точок, і саме це спостерігав Юнг під час свого експерименту з розщеплення світлового пучка.



Я демонструю цей дослід на лекції, використовуючи світло червоного, а також зеленого лазера. Це дуже ефектно. Студенти помічають, що зелене й червоне світло утворюють дуже схожий малюнок, хіба що у випадку із зеленим світлом яскраві й темні плями розташовані дещо ближче. Відстань між ними залежить від кольору світла, а отже, від довжини хвилі (більше про довжину хвилі я розповім у наступному розділі).

Учені століттями сперечалися, із чого складається світло — з частинок або хвиль, і цей експеримент дозволив дійти приголомшливого й неспростовного висновку, що світло — це хвиля. Тепер нам відомо, що світло може поводитися і як частинка, і як хвиля, але до *цього* неймовірного висновку наука прийде тільки через століття, коли з'явиться квантова механіка. Зараз ми не заглиблюватимемося в це.

Повернемося до додаткових веселок. Ті темні та яскраві смуги виникають саме через інтерференцію світлових хвиль. Це явище дуже чітко виражене, коли діаметр крапель становить близько 0,5 міліметра.

Ви можете побачити фотографію додаткової веселки у вклейці, а інші знімки на сайті: atoptics.co.uk/rainbows/supdrsz.htm.

Інтерференція створює ще разючіший ефект, коли діаметр краплі менше ніж 40 мікрон (0,04 міліметра). У таких випадках промені різних кольорів так сильно розсіюються, що їхні хвилі повністю накладаються. Кольори змішуються, і веселка стає білою. На білій веселці часто видно одну чи дві темні смуги (додаткові веселки). Білі веселки надзвичайно рідкісні, особисто я їх ніколи не бачив. У середині 1970-х мій студент Карл Вельс надіслав мені світлини кількох прекрасних білих веселок. Він фотографував їх улітку о другій ночі (саме так) із Крижаного острова Флетчера — великого плавучого айсберга завбільшки приблизно 5 на 11 кілометрів. Тоді він перебував приблизно за 490 кілометрів від Північного полюса. Прекрасну фотографію білої веселки ви можете роздивитися у вклейці.

Також білі веселки можна побачити в тумані, який складається з надзвичайно крихітних краплинок води. Часом білі туманні веселки важко розгледіти. Ви, можливо, безліч разів їх бачили, навіть не здогадуючись про це. Зазвичай вони з'являються, коли туман не дуже густий і тому пропускає сонячне світло. Рано-вранці на березі річки або в гавані, коли сонце ще низько і часто стоїть туман, я полюю на туманні веселки і спостерігав їх неодноразово.

Інколи туманну веселку можна створити за допомогою фар машини. Якщо ви в дорозі й навколо вас збирається вечірній туман, пошукайте місце, де можна безпечно припаркуватися. Або якщо туман застав вас удома, розверніть машину до туману та ввімкніть фари. Потім відійдіть від машини й подивіться на місце в тумані, куди падає світло фар. Якщо пощастить, ви, можливо, побачите туманну веселку. З нею темрява туманної ночі стає ще більш моторошною. Ви можете побачити, що відбулося, коли один хлопець випадково помітив туманну веселку від фар своєї машини: cutt.ly/VtLwHe. Помітили темні смуги в білих дугах?

Розмір крапель і хвильова природа світла пояснюють ще одне надзвичайно гарне оптичне явище, яке прикрашає небеса, — глорії. Найкраще їх видно з літака, що летить понад хмарами. Спробуйте їх пошукати — повірте, воно того варте. Для цього ви, звісно, маєте сидіти біля вікна, але не над крилами, які затуляють усе, що внизу. Вам

слід переконатися, що сонце з протилежного боку від вашого місця, тому зверніть увагу на час польоту і напрямок рейсу. Якщо з вікна видно сонце, експеримент завершено. (Тут я змушений попросити вас узяти це на віру: щоб дати переконливе пояснення, потрібно здійснити багато дуже складних обчислень). Якщо дотримано всіх умов, спробуйте вирахувати розташування антисонячної точки й подивіться вниз на неї. Може, вам поталанить, і ви побачите у хмарах кольорові кільця, а якщо літак перебуває не надто високо над хмарами — то, можливо, навіть глорію навколо тіні літака. Діаметр глорії може варіюватися від кількох до приблизно 20 градусів. Що дрібніші краплі, то більші глорії.

Я зробив багато фотографій глорій, до того ж на деяких чітко видно тінь мого літака, і найцікавіше те, що місце розташування мого крісла збігається із центром глорії — антисонячною точкою. Одна з моїх фотографій увійшла в цю книжку.

Глорії можна побачити в найрізноманітніших місцях, не лише з вікна літака. Їх часто спостерігають мандрівники, коли дивляться згори на імлісту долину, стоячи спиною до сонця. У таких випадках стає трохи страхотливо. Туристи бачать на поверхні туману власну тінь, оточену глорією, а часом кількома кольоровими кільцями, і це схоже на якусь примару. Таке явище також відоме як Брокенський привид — за назвою піка в Німеччині, де його бачать найчастіше. Глорії навколо людських тіней так схожі на німби святих, а самі фігури мають такий потойбічний вигляд, що ви не здивуєтеся, що англійське слово «glory» серед іншого означає сяйво у формі круга навколо голови або над головою. У Китаї глорію називають «світло Будди».

Якось я зробив чудове фото власної тіні в оточенні глорії, яке я називаю образом святого Волтера. Багато років тому мої друзі-астрономи з Радянського Союзу запросили мене попрацювати з їхнім шестиметровим телескопом на Кавказі. На той час це був найбільший телескоп у світі. Погода стояла просто жахлива й зовсім не сприяла спостереженням. Поки я був там, щодня приблизно о пів на шосту вечора з долини здіймалася стіна туману, що повністю вкривала телескоп. Цілком і повністю. За весь час ми так і не змогли поспостерігати за небом. У вклейці є фотографія, де зображено, як піднімається цей туман. З розмов з астрономами я довідався, що

тумани там — дуже часте явище. І я запитав: «Чому тоді встановили тут телескоп?». Мені відповіли, що його збудували на цьому місці, бо так захотіла дружина одного партійного чиновника, і це не обговорювалося. Я ледь не впав зі стільця.

Хай там як, за кілька днів мені спало на думку, що, можливо, я зможу зробити пречудові кадри. Щодня, коли починав заповзати туман із долини на сході, сонце на заході було ще досить яскравим — ідеальні передумови для глорії. Тому наступного дня я взяв із собою в обсерваторію фотоапарат, трохи нервуючись, що туман відмовиться від співпраці зі мною. Але, як і слід було чекати, все оповилося туманом, сонце ще світило, а я стояв до нього спиною. Я чекав і чекав, аж тут — бац! — навколо моєї тіні з'явилася глорія, і я зробив фото. Мене брала нетерплячка швидше проявити плівку — це було ще в доцифрову добу — справа варта заходу! Моя тінь довга й примарна, а тінь фотоапарата — у центрі кілець розкішної глорії. Ви можете побачити цю фотографію у вклейці.

Щоб побачити ореол навколо власної голови, не обов'язково їхати в таке екзотичне місце. Якщо сонячної ранкової години подивитися на свою тінь на вкритій рососою траві (звісно, коли сонце точно за спиною), часто можна побачити те, що німецькою називається *Heiligenschein*, буквально — «священне світло»: сяйво навколо тіні голови. (Воно не різнокольорове — це не глорія). Такий ефект створюють краплини роси, які відбивають сонячне світло. Якщо ви спробуєте — а я сподіваюся, що так, — їх простіше знайти, ніж глорію. Рано-вранці сонце ще низько, тому ваша тінь буде доволі довга й дуже нагадуватиме витягнуті, увінчані німбами фігури святих на середньовічних картинах.

Багато різних видів веселок і німбів можуть заскочити вас зненацька в найнесподіваніших місцях. Мій улюблений випадок стався якось сонячного дня в червні 2004 року (я пам'ятаю, що це було літнє сонцестояння — 21 червня), коли я відвідував музей deCordova в Лінкольні, штат Массачусетс, разом із С'юзан (яка тоді ще не була моєю дружиною), сином і його дівчиною. Ми йшли територією музею до входу, коли мене гукнув син. Перед нами на землі була приголомшлива, барвиста веселка, що утворювала майже повне коло. (Оскільки було сонцестояння, сонце піднялося на максимальну висоту

для Бостона — приблизно 70 градусів над горизонтом). Це було фантастично!

Я дістав фотоапарат і якнайшвидше наклацав побільше фотографій. Як несподівано. На землі не було крапель води, і я швидко зрозумів, що ця веселка в будь-якому разі не могла утворитися із крапель, бо її кут був значно менший за 42 градуси. А проте на вигляд це була справжнісінька дощова веселка: із зовнішнього краю — червона смуга, із внутрішнього — фіолетова, а всередині дуги — яскраве біле світло. Що могло її спричинити? Я здогадувався, що її, напевно, створили якісь прозорі сферичні частинки, але що б то могло бути?

Одна з моїх фотографій цієї веселки, яку ви можете побачити у вклейці, виявилася такою вдалою, що 13 вересня 2004 року її опублікували на сайті NASA як загадкову астрономічну фотографію дня¹⁰. (До речі, це прекрасний веб-сайт, раджу вам заходити на нього щодня: apod.nasa.gov/apod/astropix.html). Я одержав приблизно три тисячі повідомлень із гіпотезами, що б це могло бути. Моя улюблена відповідь — записка від чотирирічного Бенджаміна Гайслера, написана рукою: «Думаю, ваша загадкова фотографія зроблена світлом, кольоровою крейдою, фломастерами й олівцями». Я повісив її на дошці оголошень біля свого кабінету в МТІ. З усіх відповідей лише тридцять респондентів мали правильний хід думок, але найточнішими були п'ять.

Найкращою підказкою до цієї загадки є те, що коли ми відвідували музей, там проводили капітальний ремонт. Зокрема, стіни в багатьох місцях обробляли за допомогою піскоструминної установки. Мій давній колега Маркос Ханкін, який у МТІ відповідав за фізичні демонстраційні експерименти, сказав мені (тоді я цього ще не знав), що в деяких піскоструминних апаратах використовують скляні кульки. А на землі й справді було *розкидано* величезну кількість крихтих скляних кульок. Я приніс жменю додому. Ми тоді побачили скляну веселку, яку тепер визнано окремим видом веселки, що утворюється завдяки скляним кулькам. Її кут приблизно 28 градусів, але точне значення залежить від типу скла.

Нам з Маркосом одразу захотілося спробувати самим створити таку веселку для лекцій. Ми купили близько кілограма скляних кульок, приклеїли їх до великих аркушів чорного паперу, які повісили на

дошку в аудиторії. Потім, під кінець лекції про веселки, із задніх рядів аудиторії спрямували світло прожектора на папір. Вийшло! Я запросив студентів виходити по одному наперед, і вони ставали біля дошки, а їхня тінь падала просто в центр їхньої власної скляної веселки.

Цей експеримент був приголомшливий, тому раджу вам теж спробувати зробити це вдома — створити скляну веселку не надто складно. Утім усе залежить від того, яка ваша мета. Якщо ви просто хочете побачити кольори веселки, це досить просто. Якщо вам потрібна повна веселка навколо голови, доведеться попрацювати більше.

Для невеликого фрагмента веселки вам потрібен тільки шматок чорного картону площею приблизно 30 сантиметрів, трохи прозорого аерозольного клею (ми використовували Spray Mount від 3М, але згодиться будь-який прозорий) і прозорі скляні кульки сферичної форми. Вони обов'язково мають бути прозорими та сферичними. Ми взяли чималі кульки діаметром від 150 до 250 мікрон.

Нанесіть клей на картон і рівномірно насипте кульки. Середня відстань між ними не має значення, але що густіше, то краще. Обережно з кульками — можливо, краще робити це надворі, щоб не розсипати їх по підлозі. Зачекайте, поки клей висохне, і якщо за вікном сонце, виходьте надвір.

Проведіть уявну лінію від очей до тіні вашої голови. Розташуйте картонку десь на цій лінії — таким чином, тінь від голови падатиме на неї. Якщо сонце низько, можна покласти аркуш на стілець, якщо високо — на землю (як ви пам'ятаєте, в музеї deCordova кульки також лежали на землі). Ви можете обирати, на якій відстані від голови розташувати картонку. Припустімо, ви виклали її на відстані 1,2 метра. У такому разі посуňte її приблизно на 0,6 метра перпендикулярно до уявної лінії. У будь-якому напрямку — ліворуч, праворуч, угору чи вниз. І ви побачите кольорові смуги скляної веселки. Якщо ви захочете розташувати картонку далі, наприклад за 1,5 метра, тоді, щоб побачити фрагмент веселки, вам потрібно посунути її приблизно на 0,75 метра. Може, вам цікаво, як я отримав ці числа. Усе просто — кут до скляної веселки становить приблизно 28 градусів¹¹.

Знайшовши кольорові смуги, ви можете пошукати решту веселки, рухаючи картонку навколо уявної лінії. Таким чином ви по частинах

накреслите повне коло веселки, так само, як із садовим шлангом.

Якщо ви хочете одразу побачити навколо своєї тіні повну веселку, вам доведеться взяти більший аркуш чорного картону — метр на метр згодиться — і наклеїти на нього значно більше скляних кульок. Покладіть аркуш так, щоб тінь від вашої голови падала орієнтовно в його центр. Якщо він буде на відстані приблизно 80 сантиметрів від ваших очей, ви одразу побачите повну скляну веселку. Якщо ви покладете аркуш занадто далеко, наприклад за 1,2 метра, то не зможете побачити всю веселку. Вибір за вами. Розважайтеся!

У хмарну погоду можна здійснити цей експеримент у приміщенні, повісивши аркуш картону на стіну та спрямувавши на нього *дуже* яскраве світло (наприклад, прожектор), як я робив на лекції. Станьте між джерелом світла і стіною так, щоб тінь від вашої голови падала в центр метрового картонного аркуша. З відстані 80 сантиметрів ви маєте побачити повну веселку навколо своєї тіні. Ласкаво просимо у скляну веселку!

Щоб насолоджуватися красою будь-якої веселки, звісно, не обов'язково знати, чому вони утворюються, але розуміння фізичних закономірностей, що за ними стоять, безумовно, дає нам змогу поглянути на них по-новому (я називаю це красою знання). Ми стаємо відкритішими до маленьких див, які отак просто можна побачити туманного ранку, миючись у душі, проходячи повз фонтан або визируючи з вікна літака, поки всі інші дивляться кіно. Сподіваюся, наступного разу, коли ви відчуєте, що має з'явитися веселка, то мимоволі повернетесь спиною до сонця, подивитесь під кутом 42 градуси до уявної лінії та помітите на небі червону верхню облямівку веселки.

Ось мій прогноз. Коли ви наступного разу побачите веселку, то переконаєтесь, що червона смуга із зовнішнього краю, а синя — із внутрішнього. Ви відшукаєте вторинну веселку й пересвідчитесь, що кольори на ній розташовані у зворотному порядку. Помітите, що всередині первинної веселки небо світліше, а за її межами — значно темніше. І якщо у вас із собою буде лінійний поляризатор (раджу носити його завжди), ви впевнитесь, що обидві веселки значною мірою поляризовані. Ви не зможете цьому опиратися. Це хвороба, що

не відпускати вас до кінця життя. У цьому моя провина, але я не зможу вас зцілити й аніскілечки про це не шкодую.

10 Щоб побачити знімок онлайн, зайдіть в архів веб-сайту та оберіть 13 вересня 2004 року. Посилання на веб-сайт ви знайдете далі в тексті.

11 Щоб зрозуміти, про розрахунок якого саме трикутника йдеться, варто повернутися до опису звичайної веселки. — *Прим. наук. ред.*

Розділ 6

Гармонії струн і вітрів

У десять років я вчився грати на скрипці, але в мене нічого не виходило, і через рік я облишив цю справу. Згодом, у двадцять із гаком я почав брати уроки фортепіано, і знову безрезультатно. Досі не можу зрозуміти, як люди читають ноти й перетворюють їх на музику за допомогою десяти пальців на обох руках. Утім я дуже люблю музику та, крім емоційного зв'язку з нею, я вирішив досягнути її крізь призму фізичних законів. Власне, мені подобається фізика музики, яка починається, звісно, із фізики звуку.

Напевно, ви знаєте, що звук з'являється з одного або більшої кількості дуже швидких коливань якогось тіла, наприклад поверхні барабана, камертона або скрипкової струни. Ці коливання досить очевидні, чи не так? Утім уже не так зрозуміло, що насправді відбувається під час коливань, бо зазвичай цього не видно.

Колівальні рухи камертона спершу стискають прилегле повітря, а потім, коли він рухається в інший бік, розріджують його. Таке послідовне відштовхування й притягання створює у повітрі хвилю тиску, яку називають звуковою. Вона стрімко досягає нашого вуха, поширюючись зі швидкістю, яку ми зevamo швидкістю звуку, — це приблизно 340 метрів за секунду (або трохи більше кілометра за три секунди).

Така швидкість звуку в повітрі за кімнатної температури. Вона може значно змінюватися залежно від середовища, в якому поширюється звук. У воді швидкість звуку в чотири рази більша, а в залізі — у 15 разів більша, ніж у повітрі.

Швидкість світла (як і будь-яке електромагнітне випромінювання) у вакуумі — це відома стала, що позначають літерою c і яка приблизно становить 300 000 кілометрів за секунду, але у воді швидкість видимого світла десь на третину менша.

Повернімося до камертона. Коли хвиля, яку він створює, досягає нашого вуха, вона тисне на барабанну перетинку із тією самою частотою, з якою камертон тисне на повітря. Потім, за допомогою майже абсурдно складного процесу, барабанна перетинка передає

коливання слуховим кісточкам середнього вуха, які мають чудові назви: молоточок, коваделко і стремінце, а вони, своєю чергою, створюють хвилі в рідині внутрішнього вуха. Потім ці хвилі перетворюються на електричні нервові імпульси й надходять у мозок, який інтерпретує ці сигнали як звук. Нічогенький процес.

Звукові хвилі (точніше, будь-які хвилі) мають три основні характеристики — частоту, довжину й амплітуду. Частота — це кількість хвиль, що проходить через певну точку за певний проміжок часу. Можливо, дивлячись на хвилі в океані з човна або круїзного судна, ви помітили, що за хвилину прокотилося, наприклад, десяток хвиль. Отже, можна було б сказати, що їхня частота — десять за хвилину. Але насправді для вимірювання частоти зазвичай використовують одиницю, що показує кількість коливань за секунду й має назву герц, або скорочено Гц. Двісті коливань за секунду — це 200 герців.

Що ж до довжини хвилі, то це відстань між її сусідніми гребенями — або між сусідніми западинами. Одна з головних особливостей хвиль: що вища частота, то коротша хвиля, і навпаки — що довша хвиля, то нижча частота. Тут ми підійшли до надзвичайно важливої сукупності взаємозв'язків — системи відношень між швидкістю, частотою і довжиною хвилі. Довжина хвилі — це її швидкість, поділена на частоту. Це справедливо як для електромагнітних хвиль (рентгенівські промені, видиме світло, інфрачервоне випромінювання і радіохвилі), так і для звукових хвиль у ванні та хвиль в океані. Наприклад, довжина хвилі для звуку із частотою 440 герців (ля першої октави на фортепіано) у повітрі дорівнює $\frac{340}{440}$, тобто 0,77 метра.

Якщо на хвильку над цим замислитися, ви побачите, що все цілком логічно. Швидкість звуку в певному середовищі постійна (за винятком газів, де вона залежить від температури), тому що більше хвиль проходить за певний проміжок часу, то коротшими вони мають бути, щоб укластися в цей час. Справедливе також і протилежне твердження: що менше хвиль проходить у певний проміжок часу, то довгими вони мають бути. Довжина хвиль різних видів вимірюється в різних одиницях. Наприклад, довжину звукових хвиль ми вимірюємо в метрах, тоді як світлових — у нанометрах (мільярдна частина метра).

А що з амплітудою? Ще раз пригадайте хвилі в океані, які можна спостерігати із човна. Ви побачите, що деякі хвилі вищі за інші, навіть якщо їхня довжина однакова. Ця характеристика хвиль називається амплітудою. Від амплітуди звукової хвилі залежить гучність звуку: більша амплітуда означає гучніший звук, і навпаки. Так стається тому, що хвиля з більшою амплітудою переносить більше енергії. Як скаже будь-який серфінгіст, що вища хвиля, то більше в ній енергії. Коли ви сильніше вдараєте по струнах гітари, то надаєте їм більше енергії і звук стає гучнішим. Амплітуда морських хвиль вимірюється в метрах і сантиметрах. Для звукової хвилі, що поширюється в повітрі, амплітудою була б відстань, на яку, коливаючись, зміщуються молекули повітря, але її так ніколи не виражають. Натомість ми вимірюємо *гучність* звуку, що виражається в децибелах. Шкала децибелів досить складна. На щастя, вам не обов'язково про неї знати.

З іншого боку, висота звуку, тобто його розташування в музичній гамі, залежить від його частоти. Що більша частота, то вищий тон. Що менша частота, то він нижчий. Граючи музику або співаючи, ми постійно змінюємо частоту (а отже, й висоту) звуку.

Людське вухо сприймає велетенський діапазон частот — від приблизно 20 герців (найнижча нота на фортепіано має частоту 27,5 герца) аж до орієнтовно 20 000 герців. На лекціях я демонструю надзвичайно цікавий експеримент, під час якого використовую аудіометр — звуковий прилад, що створює коливання різної частоти й сили. Я прошу студентів підняти руку й не опускати її, поки вони чують звук. Поступово я підвищую частоту. З віком більшість із нас перестає чути звуки високих частот. Мій верхній поріг сприйняття звуку — приблизно 4000 герців, нота до п'ятої октави, що в самому кінці клавіатури фортепіано. Але коли я вже не чую нічого, студенти ще довго можуть чути значно вищі ноти. Я знову й знову повертаю ручку регулятора: 10 000, потім 15 000 герців — і руки починають опускатися. На висоті 20 000 герців тільки приблизно половина студентів усе ще тримає руку. Тоді я сповільнююся: 21 000, 22 000, 23 000. Коли я доходжу до 24 000 герців, піднятими залишаються зазвичай лише кілька рук. У цей момент я вдаюся до невеличкого виверту. Я вимикаю прилад, але вдаю, наче ще підвищив частоту — до 27 000 герців. Один чи два сміливці стверджують, що чують ці

надвисокі ноти, — і тоді я обережно розкриваю свої карти. Це лише жарт.

А тепер подумайте про те, як звучить камертон. Якщо вдарити по ньому сильніше, кількість коливань, які здійснюють його зубці за секунду, не зміниться. Отже, й частота хвиль, що від нього поширюються, залишиться такою самою. Саме тому він завжди дає звук однакової висоти. Проте амплітуда коливань зубців камертона зростає, якщо вдарити по ньому сильніше. Побачити це можна, якщо записати на відео, як ви вдаряєте в камертон, а потім переглянути запис у режимі сповільненого відтворення. Зубці камертона хитатимуться тим більше, чим сильніше ви по ньому вдарите. Через зростання амплітуди звук буде гучнішим, але оскільки частота коливань не змінюється, звучатиме та сама нота. Хіба не дивно? Якщо трохи подумати, це те саме, що з маятником (див. розділ 3), період коливань якого (тобто час одного повного коливання) не залежить від амплітуди.

Звукові хвилі в космосі?

Чи зберігається цей взаємозв'язок основних характеристик звуку за межами Землі? Ви чули, що звук не поширюється в космосі? Це означатиме, що навіть якщо максимально енергійно грати на фортепіано на поверхні Місяця, не пролунає жодного звуку. Невже це правда? Так, на Місяці немає атмосфери — там майже вакуум. Звідси можна було б зробити висновок, для когось, мабуть, невтішний, що навіть найвидовищніші спалахи зір і зіткнення галактик відбуваються в цілковитій тиші. Можна було б навіть припустити, що і Великий вибух, первісний вибух, з якого приблизно 14 мільярдів років тому утворився Всесвіт, був беззвучним. Але чекайте-но. Космос, як і багато що в нашому житті, значно хаотичніший і складніший, ніж ми вважали ще кілька десятиліть тому.

Безперечно, якби ми спробували дихати в космосі, то дуже швидко померли б через нестачу кисню, але, правду кажучи, космос, навіть глибокий — не ідеальний вакуум. Такі поняття дуже відносні. Міжзоряний і міжгалактичний простір у мільйони разів ближчі до вакууму, ніж найкращий вакуум, який ми можемо створити на Землі.

Але річ у тім, що матерія, присутня-таки в космосі, має важливі й ототоженні характеристики.

Більшість цієї матерії становить так звана плазма — іонізований газ, який частково або повністю складається із заряджених частинок, зокрема ядер водню (протонів) та електронів. Густина цього газу варіюється в широких межах. Плазма присутня в Сонячній системі; її джерелом є Сонце, тому її ще називають сонячним вітром (про це явище ми багато дізналися завдяки Бруно Россі). Крім того, різні види плазми трапляються в зорях, а також між зорями в галактиках (її називають міжзор'яним середовищем) і навіть між галактиками (її називають міжгалактичним середовищем). На думку більшості астрофізиків, понад 99,9 відсотка всієї видимої матерії у Всесвіті — це плазма.

Подумайте лишень. Усюди, де існує матерія, можуть виникати й поширюватися хвилі тиску (а отже, й звук). І оскільки плазма присутня всюди в космосі (зокрема і в Сонячній системі), там також є велика кількість звукових хвиль, хоч ми ніколи їх не почуємо. Наш обмежений слух розрізняє досить широкий діапазон частот — власне, він охоплює більше ніж три порядки, — але ми не здатні почути музику небесних сфер.

Дозвольте навести приклад. Ще 2003 року фізики виявили брижі на поверхні розжареного газу (плазми) навколо надмасивної чорної діри в центрі однієї з галактик скупчення Персея — великої групи з тисяч галактик приблизно за 250 мільйонів світлових років від Землі. Ці брижі були явною ознакою звукових хвиль, які виникали внаслідок вивільнення великої кількості енергії, коли чорна діра поглинала матерію. (Докладніше про чорні діри я розповім у розділі 12). Фізики обчислили частоту хвиль і отримали ноту сі-бемоль, але таку низьку, що на 57 октав (приблизно в 10^{17} разів) нижча за до першої октави, яка має частоту приблизно 262 герци. Ці космічні брижі можна побачити тут: science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2003/09sep_blackholesounds.

Повернімося до Великого вибуху. Якщо внаслідок цього початкового вибуху, з якого народився Всесвіт, у первісній матерії — що потім розширилася, охолонула, і з неї сформувалися галактики, зорі та зрештою планети, — утворилися хвилі тиску, тоді ми можемо

побачити залишки цих звукових хвиль. Фізики підраховали, яка мала бути відстань між брижами в ранній плазмі (приблизно 500 000 світлових років) і якою ця відстань має бути зараз, після того як Всесвіт розширювався більше ніж 13 мільярдів років. У результаті вони отримали відстань приблизно 500 мільйонів світлових років.

Зараз тривають два надзвичайно масштабні проекти з картографування галактик — Слоанівський цифровий огляд неба (Sloan Digital Sky Survey, або SDSS) у Нью-Мексико та Дослідження з вимірювання червоного зсуву галактик із полем огляду 2 градуси (Two-degree Field (2dF) Galaxy Redshift Survey) в Австралії. Астрономи з обох проектів шукали ці брижі в розподілі галактик і незалежно одне від одного з'ясували... знаєте, що? Вони з'ясували, «що галактики на цей момент імовірніше перебувають на відстані 500 мільйонів світлових років одна від одної, ніж на будь-якій іншій відстані». Отже, від Великого вибуху виник низький протяжний звук, довжина хвилі якого зараз становить приблизно 500 мільйонів світлових років, а частота приблизно на 50 октав (у 10^{15} разів) нижча за звук, що ми здатні почути. Астроном Марк Вітл досить багато грався із тим, що він називає акустикою Великого вибуху, і ви теж можете це зробити, зайшовши на його веб-сайт: astro.virginia.edu/~dmw8f/BBA_web/index_frames.html. Там ви побачите й почуєте, як він стиснув час (перетворивши 100 мільйонів років на 10 секунд) і водночас штучно підвищив висоту звуку раннього Всесвіту на 50 октав, щоб ви змогли послухати «музику» Великого вибуху.

Дива резонансу

Завдяки явищу під назвою резонанс стають можливими дуже багато речей у нашому житті, які без нього або не існували б узагалі, або були б не такими цікавими. Це стосується не тільки музики, але й радіо, годинників, батутів, дитячих гойдалок, комп'ютерів, гудка потяга, церковних дзвонів і МРТ, що ви, можливо, робили, коли обстежували коліно чи плече (ви знали, що «Р» в аббревіатурі означає «резонансна»?).

Що таке взагалі резонанс? Це легко відчутти, якщо уявити, як ви гойдаєте дитину на гойдалці. Інтуїтивно ви знаєте, що можете сильно

розгойдати гойдалку, докладаючи незначних зусиль. Гойдалка, що є маятником, має певну визначену частоту коливань (див. розділ 3), тому якщо штовхати її в такт із цією частотою, несильні додаткові поштовхи матимуть значний кумулятивний ефект на висоту гойдалки. Можна розгойдувати гойдалку дедалі вище, просто легко підштовхуючи її кількома пальцями.

Роблячи це, ви використовуєте резонанс. У фізиці резонанс — це схильність чогось (маятника, камертона, скрипкової струни, келиха, мембрани барабана, сталеві балки, атома, електрона, ядра або навіть стовпа повітря) коливатися сильніше на певних частотах. Ці частоти називають резонансними (або власними).

Камертон, наприклад, настроєний так, щоб він завжди вібрував на своїй резонансній частоті коливань. Якщо вона дорівнює 440 герців, він видає ноту, відому як ля першої октави на фортепіано. Практично не має значення, яким способом видобувати з нього звук, — зубці коливатимуться, тобто рухатимуться туди-сюди 440 разів за секунду.

Усі матеріали мають резонансну частоту, і якщо ви збільшите енергію системи або тіла, вони можуть почати вібрувати на цих частотах, і, витративши відносно невелику енергію, ми отримаємо відчутний результат. Приміром, коли легенько постукати по тонкому порожньому келиху ложкою або провести по його краю вологим пальцем, він задзвенить, видавши звук певної висоти. Це і є резонансна частота. Резонанс — не безкоштовне задоволення, хоча інколи можна подумати, що так. Просто на резонансній частоті тіла використовують вкладену в них енергію найефективніше.

Те саме відбувається, коли крутити скакалку. Якщо вам доводилося тримати один кінець, ви знаєте, що скакалка не одразу починає описувати в повітрі красиву дугу, і коли ви крутите рукою, щоб утворилася ця дуга, по суті, рухаєте кінець скакалки вгору-вниз або вперед-назад, змушуючи її коливатися. Якоїсь миті скакалка починає слухняно крутитися, описуючи прекрасну дугу. Для цього достатньо ледь ворухити рукою, щоб вона не зупинялася, а ваші друзі починають стрибати біля середини скакалки, інтуїтивно прилаштовуючись до її резонансної частоти.

Можливо, ви не знали цього в дитинстві, але скакалку достатньо крутити лише одній людині — інша може просто тримати за другий

кінець, і це працює безвідмовно. Головне, щоб скакалка між вами коливалася з найнижчою резонансною частотою, яку ще називають основною. Якби не це, гра під назвою дабл-датч, у якій двоє людей крутять дві скакалки в протилежних напрямках, була б майже неможливою. Дві скакалки крутяться в руках обох учасників гри в різних напрямках завдяки тому, що для підтримання руху кожної з них потрібно зовсім мало енергії. Оскільки ваші руки в цьому випадку є рушійною силою, скакалка здійснює так звані вимушені коливання. Коли ви досягаєте резонансу, то на підсвідомому рівні відчуваєте, що потрібно залишатися на цій частоті, тому не розкручуєте скакалку сильніше.

Якщо ви зробите це, то прекрасна обертова дуга перетвориться на кривульку, і той, хто стрибає, неабияк роздратується. Але якби скакалка була досить довга і ви швидше обертали свій кінець, то невдовзі на ній утворилось би дві дуги, які б рухалися в протилежних напрямках, одна — угору, а друга — униз, тоді як середина скакалки залишалась би нерухомою. Цю точку називають вузлом. Тоді через скакалку могли б стрибати двоє ваших друзів — кожен через свою дугу. Можливо, ви бачили таке в цирку. Що тут відбувається? Ви досягли другої резонансної частоти. Практично в усього, що може коливатися, є ціла низка резонансних частот, про що я докладніше розповім уже за хвилину. Ваша скакалка також має вищі резонансні частоти, і я вам це продемонструю.

На лекції я показую множинність резонансних частот на прикладі мотузки приблизно три метри завдовжки, підвішеної між двома вертикальними опорами. За допомогою невеликого двигуна, частоту якого можна регулювати, я то піднімаю, то опускаю один кінець мотузки (лише на кілька сантиметрів), змушуючи її коливатися. Незабаром мотузка досягає своєї найнижчої резонансної частоти коливань, що називають першою гармонікою (або ще основною частотою), і вигинається дугою, як скакалка. Коли я прискорюю розкручування, ми невдовзі бачимо дві дуги, що дзеркально відображають одна одну. Це так звана друга гармоніка, яка виникає, коли частота коливання мотузки вдвічі вища за частоту першої гармоніки. Отже, якщо частота першої гармоніки — 2 герци, два коливання за секунду, тоді частота другої — 4 герци. Якщо змусити

мотузку коливатися ще швидше — на втричі вищій за основну гармоніку частоті, у нашому випадку — 6 герців, отримаємо третю гармоніку. Мотузка поділиться на три рівні частини із двома нерухомими точками (вузлами), а дуги через одну то підніматимуться, то опускатимуться разом із кінцем мотузки, що коливається шість разів за секунду.

Пам'ятаєте, що найнижчий звук, який ми можемо почути, — приблизно 20 герців? Саме тому ми не чуємо музики скакалки — її частота занадто низька. Але якщо зіграти на іншій струні — наприклад, на скрипковій або віолончельній — відбувається зовсім інша річ. Візьміть скрипку. Я краще її не братиму — повірте, за останні шістдесят років я не став грати краще.

Щоб ви почули одну довгу, красиву і пронизливу ноту на скрипці, має відбутися величезна кількість фізичних явищ. Звук скрипки, віолончелі, арфи чи гітари — або будь-якої мотузки чи струни — залежить від трьох чинників: довжини, сили натягу й густини. Що довша струна, то слабкіший натяг, а що вона важча, то нижчий звук. І, звісно, навпаки: що коротша струна, то сильніший натяг, а що вона легша, то вищий звук. Тому музиканти-струнники час від часу настраюють інструменти, регулюючи натяг струн, щоб вони видавали звуки потрібної частоти і ноти були чистими.

А далі вже відбувається магія. Коли скрипалька проводить смичком по струні, вона надає їй енергії, і струна якимось чином обирає свої резонансні частоти (з усіх можливих частот) і — це вражає навіть ще більше — хоч ми й не бачимо цього, *коливається одночасно на кількох різних резонансних частотах* (з кількома гармоніками). На відміну від камертона, який може вібрувати лише на одній частоті.

Ці додаткові гармоніки (із частотами, вищими за основну) часто називають обертонами. Взаємодія різноманітних резонансних частот, сильніших і слабших, — такий собі коктейль з гармонік — це те, що визначає, як кажуть фахівці, забарвлення, або тембр, зіграної на скрипці чи віолончелі ноти, а ми сприймаємо її як характерне звучання інструмента. У цьому різниця між звуком однієї-єдиної частоти камертона, аудіометра чи сигналу оповіщення по радіо й значно складнішим звучанням музичних інструментів, які одночасно видають звуки на кількох частотах гармонік. Характерне звучання

труби, гобоя, банджо, фортепіано чи скрипки зумовлене особливим «коктейлем» гармонічних частот, властивих кожному інструменту. Мені подобається образ невидимого космічного бармена, що майстерно змішує сотні різноманітних коктейлів із гармонік і може подати одному клієнту банджо, другому — литаври, а третьому — ерху або тромбон.

Творці перших музичних інструментів виявили винахідливість, наділивши їх ще однією важливою особливістю, завдяки якій ми можемо насолоджуватися їхнім звучанням. Щоб ми чули музику, звукові хвилі не тільки мають перебувати в діапазоні нашого сприйняття, але й бути достатньо гучними. Наприклад, якщо просто тихенько вдарити по струні, звуку не буде чути на відстані. Можна вдарити сильніше й цим надати струні (а отже, і хвилям, які вона створює) більше енергії, але все одно навряд чи ви отримаєте потужний звук. На щастя, дуже багато років тому (кілька тисячоліть точно) люди здогадалися, як можна зробити струнні інструменти достатньо гучними для того, щоб їхній звук було чути на іншому кінці галявини чи приміщення.

Ви можете точно відтворити проблему, що постала перед нашими предками. А потім розв'язати її. Візьміть 30-сантиметровий шматок струни, прив'яжіть один її кінець до дверної ручки або ручки шухляди, натягніть, тримаючи її за другий кінець, а потім ударте по ній пальцем другої руки. Майже нічого не відбувається, чи не так? Ви чуєте звук, і, залежно від довжини струни, її товщини і сили натягу, можливо, впізнаєте якусь ноту. Але звук не особливо гучний, правда? Його не чути із сусідньої кімнати. Але якщо ви пропустите струну через пластиковий стаканчик, піднімете вільний кінець струни вище рівня ручки (щоб стаканчик не сповзав до вашої руки) і вдарите у струну, звук буде гучнішим. Чому? Тому що струна передає частину своєї енергії стаканчику, який тепер коливається із такою самою частотою, але має значно більшу площу поверхні, через яку вібрація передається у повітря. У результаті ви чуєте гучніший звук.

За допомогою стаканчика ви продемонстрували принцип дії резонатора, або деки, — обов'язкової частини всіх струнних інструментів: від гітар і контрабасів до скрипок і фортепіано. Їх

зазвичай роблять з дерева, і вони вловлюють коливання струн і передають їх у повітря, значно підсилюючи їхнє звучання.

Деку легко побачити в гітарах і скрипках. Пласка дека рояля розташована горизонтально під струнами, що закріплені на ній. У піаніно дека стоїть вертикально за струнами. Дека арфи — це зазвичай основа, до якої прикріплено струни.

На лекції я по-різному демонструю, як працює резонатор. Зокрема, я показую це на прикладі музичного інструмента, який моя дочка Емма зробила в дитячому садку. Він складається з однієї звичайної струни, прикріпленої до картонної коробки з ресторану швидкого харчування Kentucky Fried Chicken. Натяг струни можна регулювати за допомогою шматочка дерева. Це страшенно весело. Коли я підтягую струну, вона звучить вище. Коробка з KFC — чудовий резонатор, і студентам чутно звук від струни з досить великої відстані. Ще одна моя улюблена демонстрація — використання музичної скриньки, яку я придбав багато років тому в Австрії. Вона не більша за сірникову коробку, і в ній відсутній резонатор. Якщо прокрутити ручку, зубці у скриньці починають вібрувати, і тихесенько лунає музика. Я демонструю це на лекції, тримаючи скриньку в руках, і ніхто не чує мелодії, навіть я! Тоді я ставлю скриньку на стіл і знову повертаю ручку. Тепер мелодію чують усі студенти, навіть на задніх рядах величезної аудиторії. Просто дивовижно, яким ефективним може бути навіть дуже простий резонатор.

Але деякі деки — справжні витвори мистецтва. З виготовленням високоякісних музичних інструментів пов'язано багато таємниць, і співробітники Steinway & Sons навряд чи вам розкажуть, як вони роблять деки для своїх всесвітньо відомих роялів. Ви, мабуть, чули про знамениту династію Страдіварі, яка в XVII–XVIII століттях створила фантастичні скрипки, мрію будь-якого скрипаля. Сьогодні відомо про існування приблизно 540 скрипок Страдіварі, і одну з них у 2006 році було продано за 3,5 мільйона доларів. Щоб розгадати «секрет Страдіварі», фізики ретельно досліджували ці скрипки, сподіваючись, що це допоможе виготовляти дешевші інструменти із таким само чарівним звучанням. Про деякі із цих досліджень ви можете прочитати тут: cutt.ly/RtLeIA.

Те, як приємно чи неприємно для наших вух звучать певні комбінації нот, багато в чому пов'язано із частотами й гармоніками. Найвідоміший тип поєднання двох нот — принаймні в західній музиці — це коли частота однієї рівно вдвічі більша за частоту другої. Тоді кажуть, що інтервал між цими двома нотами — октава. Але також існує багато інших приємних співзвуч: акорди, терції, квінти тощо.

Математики і природодослідники захоплювалися красою і пропорційністю числового співвідношення між частотами ще від часів Піфагора. Серед істориків немає згоди, що з цього Піфагор винайшов сам, що він запозичив у вавилонян, а що відкрили його учні. Але саме йому приписують відкриття, що струни різної довжини і натягу створюють різну висоту звуків у передбачуваних і приємних на слух співвідношеннях. Багато фізиків люблять називати його автором теорії струн.

Майстри музичних інструментів дуже розумно скористалися із цього знання. Наприклад, струни скрипки мають різну товщину і натяг, завдяки чому вони дають вищі або нижчі частоти й гармоніки, хоч їхня довжина приблизно однакова. Скрипалі змінюють довжину струни, перебираючи пальцями вздовж грифа. Коли пальці зміщуються в напрямку підборіддя, струна стає коротшою і частота (а отже, й висота) першої та всіх вищих гармонік зростає. Бувають і досить складні випадки. Деякі струнні інструменти, наприклад індійський ситар, мають додаткові резонансні струни, розташовані вздовж основних струн або під ними. Під час гри на інструменті резонансні струни коливаються на власних резонансних частотах.

Побачити окремі гармонічні частоти, на яких одночасно коливаються струни музичного інструмента, складно, якщо взагалі можливо. Але я можу ефектно їх продемонструвати, під'єднавши мікрофон до осцилоскопа, який ви, можливо, бачили по телевізору або навіть наживо. Осцилоскоп показує на екрані вібрації (або коливання) у вигляді кривої, що то піднімається, то опускається відносно центральної горизонтальної лінії. Їх повно у відділеннях інтенсивної терапії та кабінетах невідкладної допомоги, де з їхньою допомогою відстежують серцебиття пацієнтів.

Я завжди пропоную студентам приносити на заняття свої музичні інструменти, щоб ми могли порівняти різні коктейлі з гармонік, які

створює кожен з них.

Коли я підношу до мікрофона камертон, настроєний на ля першої октави, ми бачимо на екрані просту синусоїду для частоти 440 герців. Лінія чітка і надзвичайно правильна, тому що, як ми вже знаємо, камертон вібрує лише на одній частоті. Але коли я прошу студентку, яка принесла скрипку, зіграти ту саму ля, зображення на екрані стає значно цікавішим. Основний тон залишається — він відображається на екрані як основна синусоїда, але через наявність вищих гармонік крива тепер значно складніша. Картина знову зміниться, коли інший студент заграє на віолончелі. А уявіть, що відбудеться, якщо скрипаль зіграє на скрипці дві ноти одночасно!

Коли фізику резонансу починають демонструвати співаки, пропускаючи повітря через голосові зв'язки (точніше було б сказати «голосові складки»), останні коливаються і створюють звукові хвилі. Я прошу студентку заспівати, і знову та сама історія — на екрані нагромаджуються складні криві.

Коли ви натискаєте на клавішу фортепіано, молоточок вдаряє по струні, довжина, товщина й натяг якої підібрані так, що вона коливається на частоті першої гармоніки. Але якимось чином, як і у випадку зі скрипковими струнами й голосовими зв'язками, струна фортепіано коливається одночасно й на частотах вищих гармонік.

А тепер подумки полиньте в цілковито іншу сферу — у субатомний світ, і уявіть надзвичайно крихітні, значно менші за атомне ядро струни, наче в скрипки, які коливаються на різних частотах і мають різні гармоніки. Інакше кажучи, подумайте про те, що, можливо, у самій своїй основі матерія складається із цих крихітних струн, які, коливаючись на різних гармонічних частотах у багатьох вимірах, утворюють усі так звані елементарні частинки — наприклад кварки, глюони, нейтрино, електрони. Якщо ви змогли уявити таке, то щойно збагнули основне положення теорії струн — узагальнений термін, який застосовують до опису зусиль, яких докладають фізики-теоретики протягом останніх сорока років, щоб створити єдину теорію, яка пояснила б усі елементарні частинки та сили у Всесвіті. У певному розумінні це теорія «всього».

Ніхто не має жодного уявлення, чи підтвердиться теорія струн, а нобелівський лауреат Шелдон Глешоу запитав себе, «яка це теорія:

фізична чи філософська». Але якщо основними елементами Всесвіту і справді є різні резонансні рівні немислимо крихітних струн, тоді, можливо, Всесвіт, його сили й елементарні частинки схожі на космічну версію чудових, дедалі складніших варіацій Моцарта на тему дитячої пісеньки «Сяй, маленька зіронько» («Twinkle, Twinkle, Little Star»)¹².

Усі тіла мають резонансні частоти — від пляшки кетчупу у вашому холодильнику до найвисоченнішого у світі хмарочоса. Деякі із цих частот загадкові й дуже непередбачувані. Якщо у вас є машина, ви вже чули резонансні вібрації і навряд чи були від них у захваті. Упевнений, що вам не раз доводилося чути в дорозі шум, який припинявся, коли ви їхали швидше.

Приладова панель моєї останньої машини, схоже, потрапляла в резонанс щоразу, коли я зупинявся на світлофорі. Якщо я натискав на газ і розганяв двигун, навіть не рушаючи з місця, частота коливань машини змінювалася, і шум зникав. Інколи я ще деякий час чув гудіння, яке зазвичай щезало, коли я розганявся або сповільнювався. На різних швидкостях, тобто на різній частоті коливань, машина — разом з тисячами своїх деталей, з яких деякі, на жаль, були погано закріплені, — досягала резонансної частоти, скажімо, розхитаного глушника або зношених опор двигуна, і ті починали зі мною розмовляти. Вони всі повторювали одне й те саме: «Їдьмо до автомеханіка, їдьмо до автомеханіка», але я надто часто ігнорував це і тільки потім виявляв пошкодження, спричинені цими резонансними коливаннями. А коли я нарешті загнав машину в автосервіс, не зміг відтворити ці жахливі звуки майстрові й почувався трохи по-дурному.

Пам'ятаю зі своїх студентських часів, коли після вечері у братстві хтось виступав із промовою, яка нам не подобалася, ми брали свої келихи і вологими пальцями описували кола по вінцях, створюючи доволі дивний звук (таке можна легко повторити і вдома). Це була власна частота наших келихів. Звісна річ, коли таке одночасно робило сто студентів, звук був відразливий (урешті-решт, це братство), зате спосіб спрацьовував дуже ефективно, і промовець розумів, на що йому натякають.

Існує поширена думка, що коли оперна співачка досить гучно візьме потрібну ноту, скляний келих може тріснути. Тепер, коли ви знаєте про резонанс, подумайте: чому таке можливо? Усе просто, принаймні

теоретично, чи не так? Що станеться, якщо взяти келих, виміряти його власну частоту коливань і створити звук такої самої частоти? Ну, в більшості випадків, судячи з мого досвіду, абсолютно нічого. Я ніколи не бачив, щоб оперні співаки робили таке. Тому я не запрошую їх на свої лекції. Я обираю келих, легенько цокаю по ньому й за допомогою осцилографа вимірюю його власну частоту коливань. Звісно, для кожного келиха вона буде своя, але для цього коливається десь у межах від 440 до 480 герців. Потім я за допомогою електронного пристрою створюю звук *точно* такої самої частоти (ну, звісно, *точно* такої самої частоти домогтися неможливо, але я намагаюся отримати максимально близьке значення). Я ставлю келих біля підсилювача і починаю потроху збільшувати гучність. Навіщо це робити? Бо що голосніший звук, то з більшою енергією звукова хвиля вдарятиметься об келих. А що більшою буде амплітуда коливань келиха, то більше скло вигинатиметься всередину і назовні, доки не трісне (сподіваємося).

Щоб показати студентам, як вібрує келих, я наводжу на нього камеру, збільшуючи її масштаб, й освітлюю стробоскопом, налаштованим на трохи інакшу частоту, ніж звук. Неймовірно! Ми бачимо, як «чаша» келиха починає вібрувати. Його стінки спочатку сходяться, потім розходяться, і відстань, на яку вони зміщуються, дедалі зростає, щойно я збільшую гучність динаміка, часом мені доводиться підправляти частоту і — бац! — келих розлітається. Студентам ця частина експерименту подобається найбільше: вони не можуть дочекатися, коли келих трісне. (Ви можете переглянути цей експеримент онлайн приблизно на сьомій хвилині 27-ї лекції мого курсу «Електрика і магнетизм» за цим посиланням: cutt.ly/TwrxlZK).

Також мені подобається показувати студентам так звані пластини Хладні, які демонструють резонанс дуже незвично і красиво. Це металеві пластини завширшки приблизно 30 сантиметрів, які бувають квадратними, прямокутними й навіть круглими, але найкращі квадратні. Вони кріпляться по центру до стрижня або підставки. Насипемо на пластину трохи дрібного порошку й проведемо смичком вздовж будь-якої її сторони, використовуючи всю довжину смичка. Пластина почне коливатися на одній або кількох резонансних частотах. У місцях, де розташовані гребені й западини хвиль, порошок

зміститься і відкриється метал — він збереться у вузлах, де не відбувається жодних коливань. (Струни мають вузлові точки, а двовимірні об'єкти, наприклад пластини Хладні, — вузлові лінії).

Залежно від того, як і де ви «граєте» на пластині, проводячи по ній смичком, виникатимуть резонансні коливання різної частоти й на її поверхні утворюватимуться дивовижні й геть непередбачувані візерунки. На лекції я використовую більш ефективний, але менш романтичний спосіб — під'єдную пластину до вібратора. Щойно ми змінюємо частоту вібратора, як на наших очах з'являються й зникають приголомшливі візерунки. Ви можете побачити те, про що я розкажу, переглянувши відео на YouTube: cutt.ly/3tLrrd. Лишень уявіть, яка математика криється в цих візерунках!

На своїх відкритих лекціях для родин я пропоную дітлахам провести смичком по краю пластини — вони обожнюють створювати прекрасні й загадкові візерунки. Саме таке *почуття* до фізики я й намагаюся донести.

Музика вітрів

Але ми забули про половину оркестру! Як щодо флейти, гобоя чи тромбона? У них же немає струн, які коливалися б, чи деки, яка посилювала б звук. Хоч перші духові інструменти було створено дуже давно — нещодавно я бачив у газеті фотографію вирізьбленої з кістки грифа флейти віком 35 000 років, — вони трохи загадковіші за струнні, частково тому, що їхній механізм невидимий.

Духові, звичайно, бувають різні. Деякі, наприклад флейта і блок-флейта, відкриті з обох кінців, тоді як у кларнета, гобоя і тромбона один кінець закритий (утім вони мають отвір, у який удмухують музиканти). Але всі вони утворюють звук, коли внаслідок нагнітання повітря, яке зазвичай вдуюють через рот, виникає коливання стовпа повітря *всередині* інструмента.

Дути в духовий інструмент або нагнітати в нього повітря — це те саме, що щипати гітарну струну або проводити по струні скрипки смичком. Передаючи енергію повітряному стовпу, ви скидаєте в повітряну порожнину цілий спектр частот, а повітряний стовп сам обирає частоту, на якій він резонуватиме. Ця частота здебільшого

залежить від його довжини. Як це відбувається, уявити складно, хоча умовно просто обчислити результат. Повітряний стовп усередині інструмента визначить свою основну частоту, а також кілька вищих гармонік і почне вібрувати на них. Коливання стовпа стискають і розріджують навколишнє повітря так само, як коливаються зубці камертона, посилаючи звукові хвилі до вуха слухача.

У випадку з гобоєм, кларнетом і саксофоном потрібно дмухати у так звану тростину, яка передає енергію повітряному стовпу, змушуючи його резонувати. У флейтах, блок-флейтах і флейтах-піколо резонанс виникає, коли музикант дме у край отвору або в мундштук. А щоб видобути звук з мідних духових, потрібно міцно стиснути губи і погудіти в інструмент — не маючи практики, зробити це вкрай складно. Я в підсумку лише наплював у цю штуківину!

У відкритих з обох кінців інструментах, таких як флейта чи флейта-піколо, повітряний стовп може коливатися на частотах своїх гармонік, кожна з яких кратна основній частоті, так само, як у випадку зі струнами. Щодо дерев'яних духових інструментів, закритих з одного кінця і відкритих з другого, то тут усе залежить від форми отвору. Якщо внутрішній канал має конічну форму, як у гобоя чи саксофона, то звучатимуть усі гармоніки. Проте якщо внутрішній канал циліндричний, як у кларнета, повітряний стовп резонуватиме тільки на непарних кратних частотах, вищих за основну у три, п'ять, сім, дев'ять разів тощо. Щоб не вдаватися в довгі пояснення, скажу лише, що всі мідні духові резонують на частотах усіх гармонік, як флейта.

Зрозуміліше те, що зі збільшенням висоти повітряного стовпа знижується частота й висота звуку, який видає інструмент. Якщо поділити трубу навпіл, частота першої гармоніки подвоїться. Саме тому звук флейти-піколо такий високий, а фагота — такий низький. Це загальне правило також пояснює, чому труби органа мають такі різні довжини і діаметр: діапазон деяких органів — дев'ять октав. Щоб прозвучав основний тон частотою приблизно 8,7 герца (це нижче порога людського сприйняття, але ми можемо відчутти вібрацію), потрібна довжелезна труба — 19,5 метра (відкрита з обох кінців). У світі лише дві такі велетенські труби, тому що вони геть не зручні. Труба, в 10 разів коротша, дасть у 10 разів вищий основний тон —

тобто 87 герців. У 100 разів коротша — основний тон частотою приблизно 870 герців.

Музиканти, що грають на духових, не тільки дмуть у свої інструменти. Вони також закривають і відкривають розташовані на інструменті отвори, практично скорочуючи або подовжуючи повітряний стовп і таким чином змінюючи частоту звуку. Саме тому, якщо закрити пальцями всі отвори дитячого свистка, збільшивши довжину повітряного стовпа, він звучатиме нижче. Те саме стосується і мідних духових інструментів. Що довший стовп повітря, навіть якщо йому доводиться рухатися по спіралі, то нижча нота, а отже, й частота всіх гармонік. Трубка туби з найнижчим строем, яку називають контрабасовою тубою, або тубою в строї сі-бемоль, має довжину 6 метрів і основну частоту приблизно 30 герців. Допоміжні поворотні вентиля дозволяють знизити тон до 20 герців. Труба в строї сі-бемоль складається із трубки завдовжки 1,4 метра. Натискаючи на вентиля на трубі чи тубі, можна відкрити або закрити додаткові трубки та змінити висоту резонансних частот. Найкраще це демонструє тромбон. Якщо витягнути кулісу, тобто висувну трубку, довжина повітряного стовпа збільшиться, а резонансні частоти знизяться.

На лекції я граю на дерев'яному тромбоні «Jingle Bells», і студенти в захваті — я не кажу їм, що це єдина мелодія, яку я вмю грати. Якщо чесно, з мене такий собі музикант: хоч і читав цю лекцію безліч разів, а досі доводиться щоразу репетирувати. Я навіть зробив на кулісі позначки — цифри 1, 2, 3 і так далі: бо не навчився читати ноти. Але як я вже казав, відсутність музичних здібностей не заважає мені насолоджуватися музикою та з величезним задоволенням експериментувати з нею.

Пишучи це, я здійснюю цікаві досліді зі стовпом повітря в літровій пластиковій пляшці з-під газованки. Цей стовп аж ніяк не ідеальної форми, тому що її шийка поступово розширюється до повного діаметра пляшки. Фізика пляшкової шийки, як ви можете уявити, досить складна. Але тут усе одно виконується основний принцип духових інструментів — зі збільшенням довжини повітряного стовпа резонансні частоти знижуються. Ви також можете спробувати здійснити цей дослід.

Наповніть майже до верху пляшку з-під газованої води або вина (водою!) і подмухайте над шийкою. З першого разу, може, не вдасться, утім через деякий час стовп повітря почне коливатися на своїх резонансних частотах. Спочатку звучатиме висока нота, але що більше ви відпиватимете (тому я й запропонував воду), то довшим ставатиме повітряний стовп, і висота основного тону знижуватимуться. Також я помітив, що зі збільшенням довжини повітряного стовпа звучання стає приємнішим. Що нижча частота першої гармоніки, то більше шансів, що виникнуть додаткові вищі гармоніки і звук матиме насиченіший тембр.

Вам може здатися, що цей звук видає пляшка, вібруючи, подібно до струни, і ви й справді відчуєте вібрацію пляшки, так само, як ви, можливо, відчували вібрацію саксофона. Але знову-таки — резонує тут стовп повітря всередині пляшки. Щоб добре це затишити, подумайте над такою загадкою. Якщо взяти два однакові келихи — один порожній, а другий наполовину повний і видобути з них звук, легко стукаючи по них ложкою або водячи по обідку вологим пальцем, котрий з них звучатиме вище і чому? З мого боку нечесно ставити таке запитання, бо я підвів вас до неправильної відповіді (вибачте!). Але, можливо, ви зможете розв'язати цю загадку.

Такий само принцип використовується в іграшці з гнучкої гофрованої пластикової трубки завдовжки 80 сантиметрів. Очевидно, ви бачили таку або гралися нею. Пам'ятаєте, що треба робити? Коли ви розкручуєте трубку над головою, то спочатку чуєте низький звук. Звісно, ви вирішуєте, що це перша гармоніка, як і я, коли вперше грався із цією іграшкою. Проте чомусь я так і не зміг отримати першу гармоніку. Я завжди чую другу. Розкручуючи трубку швидше, можна отримати дедалі вищі гармоніки. Реклама в інтернеті стверджує, що з цієї трубки можна видобути чотири різні ноти, але, можливо, ви почуєте лише три: для четвертої ноти (п'ятої гармоніки) доведеться крутити дуже-дуже швидко. Я обчислив частоти перших п'яти гармонік для труби завдовжки 80 сантиметрів, і результати такі: 223 герци (цієї я так і не почув), 446, 669, 892 і 1115 герців. Висота звуку зростає досить швидко.

Небезпечний резонанс

Фізика резонансу аж ніяк не обмежується демонстраційними експериментами. Подумайте про те, яку безліч різних настроїв створює музика за допомогою такого різноманіття інструментів. Музичний резонанс звертається до наших емоцій, викликаючи радість, тривогу, спокій, шанобливий трепет, страх, щастя, сум... Недарма ми говоримо про емоційний резонанс, з якого можуть вирости насичені й глибокі стосунки, про нотки розуміння, ніжності й бажання. Навряд чи це випадково, що ми хочемо бути з кимось «у гармонії». І як прикро втрачати цей резонанс, тимчасово чи назавжди, коли те, що раніше здавалося гармонією, перетворюється на какофонію та емоційний шум. Згадайте Джорджа і Марту із п'єси Едварда Олбі «Хто боїться Вірджинії Вулф?». Вони влаштовують гучні сварки. Коли Джордж і Марта кидаються одне на одного, створюючи величезну напругу, їхні гості все ще спостерігають за «грою». Подружжя стає значно небезпечнішим, коли об'єднує зусилля, щоб зіграти в гру «дошкуль гостю».

У фізиці резонанс також може стати потужною руйнівною силою. Найвидовищніший у сучасній історії випадок деструктивного резонансу стався в листопаді 1940 року, коли боковий вітер врізався в центральний проліт мосту Такома-Нерроуз. Це диво інженерії (яке за свої розгойдування вгору-вниз отримало назву «Галопуюча Герті») потрапило в сильний резонанс. Через те що вітер збільшив амплітуду коливань мосту, конструкція стала вібрувати й вигинатися, і що далі, то сильніше, аж поки проліт не розірвався і не плюхнув у воду. Це феєричне падіння можна переглянути тут: cutt.ly/otLrqn.

За дев'яносто років до того у французькому місті Анже обвалився підвісний міст через річку Мен, коли по ньому строєм марширувало 478 солдатів. Їхні кроки викликали резонансні коливання мосту, від яких тріснуло кілька проіржавілих тросів. Тоді загинуло понад 200 солдатів. Через цю трагедію будівництво підвісних мостів у Франції було зупинено на двадцять років. У 1831 році, коли британські солдати стройовим кроком переходили через Бротонський підвісний міст, настил почав резонувати, з одного кінця випав болт, і міст обвалився. Ніхто не загинув, але за наказом британського командування всі військові від цього моменту переходили через мости вільним кроком.

У 2000 році в Лондоні відкрили міст Міленіум (або міст Тисячоліття), під час переходу якого багато тисяч пішоходів помітили, що його добряче хитає (через явище, яке інженери називають резонансом бічних коливань). За кілька днів влада закрила міст на реконструкцію аж на два роки, за які було встановлено демпфери, що не давали мосту розгойдуватися від кроків. Навіть величезний Бруклінський міст у Нью-Йорку неабияк налякав пішоходів, які зібралися на ньому, коли у 2003 році в місті внаслідок аварії зникло електропостачання. Полотно мосту почало розхитуватися, і декого навіть закачало.

У таких ситуаціях пішоходи створюють більше навантаження на міст, ніж машини, які зазвичай ним проїжджають, бо сумарний вплив їхніх кроків, навіть якщо вони не синхронні, може викликати резонансну вібрацію (розхитування) мостового полотна. Коли міст відхиляється в один бік, вони ступають в інший бік, щоб зберегти рівновагу, посилюючи таким чином коливання. Навіть самі інженери визнають, що не зовсім розуміють, як натовп може впливати на мости. На щастя, їм добре відомо, як будувати хмарочоси, що витримують потужний вітер і землетруси, коли існує небезпека виникнення руйнівних резонансних коливань. Уявіть: явище, завдяки якому жалібно звучала давня флейта наших предків, може загрожувати монументальному Бруклінському мосту і найвищим будівлям у світі.

¹² Ідеться про варіації на тему «Ах, я казала вам, мамо» (Ah vous dirai-je, Maman) — французької народної пісні, на мелодію якої пізніше було написано багато дитячих пісень, зокрема «Сяй, маленька зіронько». — *Прим. пер.*

Розділ 7

Дива електрики

Найкраще це робити взимку, коли повітря дуже сухе. Станьте в поліестеровій сорочці або светрі перед дзеркалом у темній кімнаті та почніть їх знімати. Ви очікуєте почути потріскування, як тоді, коли дістаєте білизну із сушарки (хіба що ви не користуєтеся цими неромантичними серветками з антистатиком, призначення яких — знімати цей заряд). Але тепер ви ще й помітите світло десятків манюсінських іскорок. Я люблю так робити, бо це нагадує мені, як фізика тісно переплетена з нашим повсякденням, якщо ми тільки знаємо, де її шукати. І, як я завжди кажу своїм студентам, цей невеличкий дослід ще цікавіший, якщо робити його з кимось.

Ви знаєте, що коли взимку пройтися по килиму і взятися за дверну ручку, — ви вже здригаєтеся? — вас може вдарити струмом, і стається це через статичну електрику. Можливо, ви навіть якось ударили струмом подругу, вітаючися з нею за руку, або вас било, коли ви здавали пальто в гардероб. Чесно кажучи, таке враження, що взимку статична електрика всюди. Волосся під час розчісування відштовхується між собою, а часом навіть стає дибки, коли ви знімаєте шапку. Що ж такого в зимі, і чому літає стільки іскорок?

Щоб дати відповідь на ці запитання, почнімо з давніх греків, які першими назвали й описали явище, відоме нам як електрика. Ще задовго до початку нашої ери греки знали, що коли потерти шматочок бурштину (скам'янілої смоли, з якої вони та єгиптяни виготовляли прикраси) об тканину, він притягуватиме шматочки сухого листа. А якщо потерти гарненько, може навіть добре трусонутися.

Якось я вчитав, що коли греки нудилися на бенкетах, їхні жінки натирали свої бурштинові прикраси об одяг і торкалися ними жаб. Жаби, звісно, стрибали, відчайдушно тікаючи від ошалілих гуляк, що, мабуть, неабияк розважало гостей. Ця історія безглузда. По-перше, як думаєте, чи на багатьох вечірках сидять повсюди зграями жаби, чекаючи, коли їх почнуть бити струмом оп'янілі ледарі? По-друге, із причин, які я поясню трохи згодом, статична електрика виявляється слабко впродовж тих кількох місяців, коли ймовірність зустріти жабу

найбільша, а повітря має високу вологість (особливо у спекотній Греції). Правда ця історія чи ні, але безсумнівний той факт, що слово «бурштин» давньогрецькою звучить як *електрон*; тому це греки дали назву електриці, як і багатьом іншим речам у Всесвіті — як великим, так і малим.

Європейські фізики XVI–XVII століть, коли фізика називалася натурфілософією, нічого не знали про атоми чи їхні складники, але вони були чудовими спостерігачами, експериментаторами й винахідниками, а деякі ще й блискучими теоретиками. Тихо Браге, Галілео Галілей, Йоганнес Кеплер, Ісаак Ньютон, Рене Декарт, Блез Паскаль, Роберт Гук і Роберт Бойль, Готфрід Лейбніц, Християн Гюйгенс — усі вони робили відкриття, писали трактати, заперечували теорії одне одного і ставили середньовічну схоластику з ніг на голову.

У 1730-ті в Англії, Франції та, звісно, Філадельфії вже активно тривали справжні наукові дослідження електрики (на противагу салонним фокусам). Під час усіх цих експериментів з'ясувалося, що коли потерти скляну паличку об шовк, вона набуде заряду певного типу (назвімо його А). Але якщо те саме зробити з бурштином або каучуком, вони набудуть іншого заряду (поки що назвімо його Б). Дослідники знали, що заряди різні, бо коли вони взяли дві скляні палички, що мають заряд А, і наблизили їх одну до одної, вони відштовхувалися під дією якоїсь невидимої, але водночас відчутної сили. Тіла, що мали заряд Б, також відштовхувались одне від одного. Тоді як по-різному заряджені тіла, наприклад скляна (А) і каучукова (Б) палички, не відштовхувались, а притягувались.

Електризація тіл тертям — надзвичайно захопливе явище; воно має навіть чудову назву: «трибоелектричний» ефект, від грецького слова, що означає «тертя». Можна подумати, що заряд виникає за рахунок тертя між двома предметами, але це не так. Виявляється, що одні матеріали жадібно притягують заряд Б, тоді як інші прагнуть якнайшвидше позбутися його, набуваючи при цьому заряду А. Тертя дає такий ефект, бо збільшується кількість точок дотику між речовинами, що сприяє перенесенню заряду. Складено список матеріалів, які утворюють так званий трибоелектричний ряд (його легко знайти в інтернеті), і що далі на шкалі розташовані матеріали, то простіше вони взаємно електризуються.

Візьмімо пластмасу або твердий каучук, з яких зазвичай виготовляють гребінці. У трибоелектричному ряді ці матеріали розташовані далеченько від волосся людини, що пояснює, чому коли його розчісуєш узимку, воно швидко починає іскрити і ставати дибки — особливо моє. А ще подумайте над таким: воно не тільки іскрить, а ще енергійно розчісує, я заряджаю і гребінець, і волосся, але оскільки волосся набуває однакового заряду (не має значення, якого саме), усі однойменно заряджені волосини починають відштовхуватися одна від одної, і я стаю схожим на божевільного професора. Коли ви човгаєте туфлями по килиму, то набуваєте заряду А чи Б залежно від матеріалу підшви й килима. І коли вас потім ударяє струмом дверна ручка, то ваша рука або приймає заряд від неї, або віддає їй свій заряд. Для вас, утім, це не має жодного значення — ви так чи інакше відчуєте удар.

Ідею про те, що всі речовини пронизані «електричним флюїдом, або «електричним вогнем», запропонував Бенджамін Франклін¹³ — дипломат, державний діяч, видавець, політичний філософ, винахідник біфокальних окулярів, ластів, переносного одометра і бездимної труби¹⁴. Його теорія видавалася переконливою, бо чудово пояснювала результати експериментів інших натурфілософів. Наприклад, англієць Стівен Ґрей продемонстрував, що металевий дріт передає електрику на великі відстані, тому ідея про зазвичай невидимий флюїд, або вогонь (урешті-решт, іскри таки нагадують вогонь), здавалася обґрунтованою.

Франклін стверджував, що коли «вогню» забагато, тіло має позитивний заряд, а в разі його нестачі — негативний. Також він започаткував традицію позначати заряд знаком «+» або «-» і вирішив, що коли потерти шматочок скла об вовну або шовк (створюючи заряд А), у ньому утвориться надлишок «вогню», і тому цей заряд слід називати позитивним.

Франклін не знав, що викликає електричний струм, але його теорія про «електричний флюїд» була блискучою, а також корисною, хоч і не зовсім правильною. Він запевняв, що коли перенести флюїд з однієї речовини в іншу, та, що його отримала, стане позитивно зарядженою, а та, що втратила, — негативно зарядженою. Франклін відкрив закон збереження електричного заряду, згідно з яким заряд не виникає нізвідки й нікуди не зникає. Створюючи певну кількість позитивного

заряду, ви автоматично генеруєте таку само кількість негативного заряду. Електричний заряд — це гра з нульовою сумою. Мовою фізики це означає, що заряд залишається сталим.

Як і ми сьогодні, Франклін розумів, що однакові заряди (обидва позитивні або обидва негативні) відштовхуються, а протилежні (позитивний і негативний) притягуються. Як показали його експерименти, що більше «вогню» мали тіла і що меншою була відстань між ними, то сильніше вони притягалися чи відштовхувалися. Також він, приблизно одночасно з Греем та іншими дослідниками, з'ясував, що одні речовини проводять флюїд, або «вогонь» (сьогодні ми називаємо їх провідниками), а інші — ні, тому їх називають непровідниками (діелектриками), або ізоляторами.

Єдине, чого не зрозумів Франклін, із чого складається цей «вогонь». Якщо це не «вогонь» і не флюїд, то що тоді? І чому його, з огляду на це, значно більше взимку, принаймні в моїх краях, на північному сході Сполучених Штатів, і воно б'є нас струмом з усіх боків?

Перш ніж зазирнути всередину атома, щоб розібратися із природою «електричного вогню», нам потрібно зрозуміти, що електрика проникла в наше життя значно глибше, ніж вважав Франклін — і ніж це уявляє більшість із нас. На ній не лише тримається лєвова частка наших щоденних справ. Тільки завдяки електриці можливе те, що ми бачимо, знаємо й робимо. Ми здатні думати, відчувати, розмірковувати й сумніватися лише тому, що електричні заряди щосекунди проскакують між незліченними мільйонами з майже 100 мільярдів клітин у нашому мозку. Крім того, ми можемо дихати тільки завдяки тому, що наші нейрони виробляють електричні імпульси, які змушують різні м'язи грудної клітки скорочуватися й розслаблятися у складній симфонії рухів. Наприклад, якщо геть просто, коли діафрагма скорочується й опускається, грудна порожнина розширюється і в легені заходить повітря. А коли вона розслабляється, то піднімається і виштовхує повітря з легенів. За кожним із цих рухів стоїть сила-силенна крихітних електричних імпульсів, які безперервно розсилають повідомлення по нашому тілу, в цьому випадку наказуючи м'язам скорочуватися, а потім розслаблятися, щоб почали працювати інші м'язи. Туди-сюди, туди-сюди — і так усе життя.

Ми бачимо тому, що крихітні клітини сітківки ока, палички й колбочки, які сприймають відповідно чорно-біле й кольорове зображення, реагуючи на стимул, передають зоровими нервами електричні сигнали в мозок. А мозок тоді визначає, що перед нами — ятка із фруктами чи хмарочос. Більшість наших машин їздить на бензині, хоча в гібридах дедалі частіше використовують електрику, але жоден бензиновий двигун не зможе працювати без електричного струму, що йде від акумулятора через запалювання до циліндрів, де електричні іскри викликають керовані вибухи — тисячі за хвилину. Молекули утворюються в результаті дії електричних сил, які поєднують між собою атоми, тому хімічні реакції, наприклад, горіння бензину, були б неможливими без електрики.

Завдяки електриці скачуть коні, хекають собаки й потягуються коти. Через електрику зминається харчова плівка, склеюється скотч, а целофанова обгортка ніяк не відлипає від коробки цукерок. Цей перелік аж ніяк не повний, але все, що ми можемо уявити, існує завдяки електриці. Ми навіть думати без неї не можемо.

Те саме можна сказати, якщо перемкнути увагу на частинки, які менші за мікроскопічні клітини нашого тіла. Уся матерія на Землі складається з атомів, і щоб по-справжньому зрозуміти електричні явища, потрібно зазирнути всередину атома й побіжно розглянути його складові — поки що не всі, щоб занадто не ускладнювати, а лише ті, які нам цікаві зараз.

Самі атоми такі крихітні, що їх можна побачити хіба що за допомогою найпотужнішого і найдосконалішого обладнання: сканувальних тунельних, атомно-силових і просвічувальних електронних мікроскопів. (В інтернеті є дивовижні зображення із цих приладів. Деякі з них можна побачити тут: almaden.ibm.com/vis/stm/gallery.html).

Якби я взяв 6,5 мільярда атомів, приблизно як кількість населення Землі, та щільно розташував їх у ряд, то його довжина була б трохи більше ніж півметра. Ще менше за атом, приблизно в 10 000 разів, його ядро, яке складається з позитивно заряджених протонів і нейтронів. Останні, як ви, мабуть, здогадалися з їхньої назви, електрично нейтральні — вони взагалі не мають заряду. Протони (грецькою «перший») мають приблизно таку саму масу, як нейтрони, — немислимо мізерні дві мільярдні мільярдної мільярдної ($2 \cdot 10^{-27}$)

кілограма. Тому незалежно від того, скільки в ядрі протонів і нейтронів, — а в деяких ядрах їх більше двохсот — воно все одно буде дуже легким. І крихітним — його діаметр лише приблизно одна трильйонна сантиметра.

Утім для розуміння електрики найважливіше те, що протон заряджений позитивно. Позитивність не впливає з його властивостей, просто від часів Франкліна повелося називати позитивним заряд, якого набуває скляна паличка, наелектризована тертям об шовк, тому і протони вважають зарядженими позитивно.

Ще важливішою, як виявляється, є решта атома, яка складається з електронів — негативно заряджених частинок, що хмарою літають навколо ядра на досить значній за субатомними мірками відстані. Якщо подумки збільшити ядро до розмірів бейсбольного м'яча, хмара електронів обертатиметься навколо нього на відстані аж *800 метрів*. В атомі, безперечно, багато вільного місця.

Негативний заряд електрона за силою дорівнює позитивному заряду протона. Унаслідок цього атоми й молекули, що мають однакову кількість протонів і електронів, електрично нейтральні. Коли вони вже не є нейтральними, тобто в них спостерігається надлишок або нестача електронів, ми називаємо їх іонами. Плазма, як ми говорили в розділі 6, — це частково або повністю іонізований газ. Більшість атомів і молекул, з якими ми маємо справу на Землі, електрично нейтральні. У чистій воді кімнатної температури лише одна з 10 мільйонів молекул буде йонізована.

Згідно з умовними позначеннями, які запропонував Франклін, ми називаємо тіла з надлишком електронів негативно зарядженими, а тіла з нестачею електронів — позитивно зарядженими. Якщо ви трете скляний предмет об шовк, то «стираєте» багато електронів, тому скло стає позитивно зарядженим. Якщо потерти об той самий шовк бурштин чи ебоніт, вони приймуть електрони й набудуть негативно заряду.

У металах велика кількість електронів залишає межі атома й більш-менш вільно переміщується в різних напрямках. Ці електрони особливо сприйнятливі до зовнішнього заряду, як позитивного, так і негативно, і коли потрапляють під його дію, рухаються до чи від нього, створюючи таким чином електричний струм. Я можу

розповідати про струм ще багато чого, але на цей момент обмежуся зауваженням, що такі матеріали називають провідниками, бо вони добре проводять (пропускають) заряджені частинки — у цьому випадку електрони. (Іони також можуть створювати електричний струм, але не в твердих тілах, а отже, не в металах).

Мені подобається уявляти електрони, які ладні вступити в гру будь-якого моменту, знявшись з місця у відповідь на позитивний чи негативний заряд. Діелектрики не такі активні: усі електрони міцно прив'язані до конкретних атомів. Утім це не означає, що діелектрики нудні — особливо наша прозаїчна гумова повітряна кулька-непровідник.

Ви можете самі здійснити експеримент, який я тут описую, придбавши невеличку упаковку гумових повітряних кульок (краще тонших, на зразок тих, з яких скручують тваринок). Оскільки навряд чи в більшості з вас удома десь валяються скляні палички, я сподівався, що їх може замінити склянка, пляшка з-під вина чи навіть лампочка, але, попри всі мої старання, ніщо із цього не згодилося. То чому б не взяти великий пластмасовий або ебонітовий гребінець? Також незайвим буде шматок шовку, приміром стара краватка або шалик, або гавайська сорочка, якій, на думку вашої половинки, місце на смітнику. Але якщо ви не проти зіпсувати свою зачіску, — а хто заперечуватиме, якщо це заради науки? — можете скористатися власним волоссям. А ще вам потрібно нарізати трохи паперу, скажімо, на кілька десятків клаптиків. Кількість не має значення, але вони повинні бути маленькими — приблизно з монетку.

Як і всі експерименти зі статичною електрикою, цей найкраще здійснювати взимку (або в пустелі після полудня), коли повітря зазвичай сухе. Чому? Тому що повітря не є провідником — узагалі-то, воно непоганий ізолятор. Утім якщо в повітрі є волога, заряд, з кількох складних причин, на яких я тут не зупинятимуся, може «витікати». У сухому повітрі заряд накопичуватиметься на паличці, шматку тканини, кульці чи вашому волоссі, натомість у вологому він поступово «витікатиме». Саме тому дверні ручки б'ють струмом тільки тоді, коли повітря дуже сухе.

Невидима індукція

Зберіть усі матеріали і приготуйтеся споглядати дива електрики. Для початку наелектризуйте гребінець, енергійно потерши його об повністю сухе волосся чи шовк. Із трибоелектричного ряду ми знаємо, що гребінець стане негативно зарядженим. А тепер зупиніться й подумайте, що станеться, якщо піднести гребінець до купки паперових клаптиків, і чому. Звісно, я зрозумію, якщо ви скажете: «Нічогосінько».

Тоді піднесіть гребінець до вашої невеличкої кучугури з паперових клаптиків, тримаючи його на кілька сантиметрів вище. Повільно опускайте гребінець і дивіться, що відбувається. Правда, дивовижно? Спробуйте ще раз — це не випадковість. Деякі клаптики підстрибують до гребінця, інші приклеюються до нього, провисівши із секунду, і знову падають, а ще інші — міцно тримаються. Якщо трохи погратися, можна домогтися того, щоб клаптики стояли на ребрі або навіть танцювали на поверхні гребінця. Що відбувається? Чому одні клаптики висять на гребінці, тоді як інші підстрибують, торкаючись його й одразу падають?

Це чудові запитання з дуже крутими відповідями. От що відбувається. Негативно заряджений гребінець відштовхує електрони в атомах паперу, і тому, хоч вони й не вільні, зовсім трохи затримуються по інший бік своїх атомів. У цей час заряд найближчих до гребінця боків атомів стає на якусь крихітну частку позитивнішим, ніж до того. Таким чином, цей бік паперу притягується до негативно зарядженого гребінця, і легкі клаптики підстрибують до нього. Чому сила притягання переважає над силою відштовхування між негативно зарядженим гребінцем і електронами у клаптиках паперу? Тому, що сила відштовхування — і притягання — між зарядами пропорційна величині зарядів, але *обернено пропорційна* квадрату відстані між ними. Це правило називають законом Кулона — на честь французького фізика Шарля Огюстена Кулона, який зробив це важливе відкриття. Також ви можете помітити дивовижну схожість цього формулювання із законом всесвітнього тяжіння Ньютона. Зверніть увагу, що кулоном також називають основну одиницю вимірювання електричного заряду: позитивно заряджена одиниця заряду — це +1 кулон (приблизно $6 \cdot 10^{18}$ протонів), а негативно заряджена — -1 кулон (приблизно $6 \cdot 10^{18}$ електронів).

Як впливає із закону Кулона, навіть невелика різниця у відстані між різнойменними зарядами може мати значний ефект. Інакше кажучи, сила притягання між ближче розташованими зарядами переважає силу відштовхування між віддаленішими.

Увесь цей процес називають *електростатичною індукцією*: підносячи заряджене тіло до нейтрального, ми *індукуємо*, тобто наводимо електричні заряди на протилежні частини незарядженого тіла, створюючи щось на зразок поляризації зарядів у клаптиках паперу. На відео моєї лекції для дітей і їхніх батьків «Дива електрики й магнетизму» можна побачити кілька версій цього невеличкого досліду. Запис доступний для перегляду тут: archive.org/details/walter_lewin_wonders_of_electricity_magnetism.

Як ви пам'ятаєте, одні папірці одразу падають із гребінця, а інші міцно на ньому тримаються. Цьому також є цікаве пояснення. Щойно клаптик паперу торкається гребінця, частина надлишкових електронів гребінця переходить у папірець. Коли це відбувається, між папірцем і гребінцем усе ще може зберігатися сила електричного притягання, але вона вже не буде достатньо великою, щоб подолати силу тяжіння, і тому папірець упаде. За інтенсивного перенесення заряду притягання може навіть змінитися відштовхуванням, і тоді під дією обох сил — сили тяжіння й електричної сили — папірець падатиме ще швидше.

Тепер надміть кульку, кінець якої зав'яжіть і прикріпіть до нього мотузку. Знайдіть удома місце, де можна підвісити кульку. Наприклад, прикріпіть до підвісної лампи. Або можна звисити її з кухонного столу, притиснувши чимось мотузку, на відстані 15 сантиметрів від ніжки. Знову наелектризуйте гребінець, енергійно потерши його об шовк або своє волосся. Не забувайте — що довше терти, то сильніший буде заряд. Дуже повільно піднесіть гребінець до кульки. Як думаєте, що станеться?

А тепер спробуйте. Правда, теж досить дивно? Кулька рухається до гребінця. Як і у випадку із клаптиками паперу, під дією гребінця заряд у кульці наче розділився (індукція!). То що станеться, коли ви заберете гребінець, і чому? Інтуїтивно ви здогадуєтесь, що кулька повернеться у вертикальне положення. Але тепер ви знаєте чому, чи не так? Коли зовнішній вплив припиняється, в електронів не залишається жодної причини затримуватися на протилежному боці своїх атомів. Бачите,

яких висновків нам вдалося дійти, лише трохи потерши гребінець і погравшись із маленькими клаптиками паперу й повітряною кулькою?

Тепер надміть ще кілька кульок. Що станеться, якщо енергійно потерти одну з них об волосся? Точно. Ваше волосся поводитиметься дивно. Чому? Тому що волосся людини в трибоелектричному ряді перебуває далеко на позитивному кінці, а гумова повітряна кулька — на негативному. Інакше кажучи, гума забирає з волосся багато електронів, роблячи його позитивно зарядженим. А оскільки однойменні заряди відштовхуються, що залишається вашому волосся, якщо кожна волосинка має позитивний заряд і прагне опинитися подалі від решти так само заряджених волосин? Вони відштовхуються одна від одної, і тому волосся стає сторч. Те саме, звісно, відбувається, коли ви взимку знімаєте в'язану шапку. Внаслідок тертя об волосся шапка забирає від нього багато електронів, і воно стає позитивно зарядженим і настобурчується.

Повернімося до кульок. Отже, ви енергійно потерли кульку об волосся (можливо, ефект буде навіть більшим, якщо потерти її об синтетичну сорочку). Думаю, ви здогадуєтесь, що я збираюся вам запропонувати. Притуліть кульку до стіни або до сорочки друга. Вона прилипає. Чому? Ось розгадка. Тертям ви електризуєте кульку. Коли ви притуляєте її до стіни, провідник з якої кепський, електрони, що крутяться довкола її атомів, під дією сили відштовхування негативного заряду кульки на зовсім трошки затримуються у найвіддаленішому від кульки боці атома й проводять на крихту менше часу в найближчому до неї боці. А це індукція!

Інакше кажучи, поверхня стіни в тому місці, де її торкається кулька, набуває незначного позитивного заряду, що притягує негативно заряджену кульку. Дивовижний результат. Але чому ці два заряди — позитивний і негативний — не компенсують один одного? Чому не відбувається переміщення заряду, після чого кулька одразу б відпала? Дуже хороше запитання. По-перше, гумова кулька прийняла зайві електрони. У непровідниках, зокрема й гумі, вони не можуть вільно переміщуватися, тому заряди мають тенденцію зберігатися. Крім того, ви не трете кульку об стіну й між ними не утворюється безліч точок дотику. Кулька просто собі висить, роблячи свою притягальну справу. Але її також тримає сила тертя. Пам'ятаєте атракціон «Ротор» з розділу

3? Електрична сила тут виконує таку само роль, як доцентрова сила в атракціоні. Тому кулька якийсь час триматиметься, поки з неї через вологу в повітрі поступово не «вितече» заряд. (Якщо ваші кульки не липнуть до стіни, то це або через надто високу вологість, завдяки якій повітря стає кращим провідником, або через те, що ваші кульки, можливо, занадто важкі — саме тому я радив узяти тонкі).

Я з величезним задоволенням на своїх відкритих лекціях приліплюю кульки до дітлахів. Я робив це багато років на днях народження своїх дітей і раджу вам спробувати і повеселитися!

Електростатична індукція відбувається в будь-яких тілах — як у провідниках, так і в ізоляторах. Ви можете взяти для експерименту з гребінцем наповнену гелієм фольговану кульку. Коли піднести гребінець до кульки, її вільні електрони прагнуть віддалитися від негативно зарядженого гребінця і ближче до нього утворюються позитивно заряджені йони, що притягують кульку до гребінця.

Хоча гумову кульку можна наелектризувати, потерши її об волосся чи сорочку, насправді гума — практично ідеальний ізолятор, і тому з неї роблять оболонку для електричних дротів. Гума запобігає витoku струму в вологе повітря і не дозволяє заряду «перестрибувати» на розташовані поруч предмети. Урешті-решт, ніхто не хоче, щоб іскри літали довкола легкозаймистих матеріалів, наприклад стін вашого будинку. Гума може захистити нас від електрики і, по суті, постійно робить це. Чого вона не може, це захистити нас від найпотужнішого з усіх відомих виявів статичної електрики — блискавки. Люди чомусь досі вірять у міф, що кросівки на гумовій підшві чи гумові покришки здатні вберегти від блискавки. Не знаю, чому такі уявлення все ще поширені, але наполегливо раджу *негайно* про них забути. Розряд блискавки такий потужний, що його анітрохи не хвилює якийсь шматочок гуми. *Можливо*, з вами нічого не станеться, якщо у вашу машину влучить блискавка (насправді, найімовірніше, станеться), але це жодним чином не пов'язано з гумовими покришками. Я поясню це трохи згодом.

Електричні поля й іскри

Вище я вже казав, що блискавка — це просто велика іскра, складна, але все одно іскра. «Тоді що ж таке іскри?» — можете спитати ви. Добре, щоб зрозуміти, що це таке, ми маємо розібратися з дуже важливою особливістю електричного заряду. Будь-який електричний заряд створює невидиме електричне поле, так само, як будь-яка маса створює невидиме гравітаційне поле. Електричне поле можна виявити, якщо наблизити одне до одного два протилежно заряджені тіла, які взаємно притягатимуться. Або два однойменно заряджені тіла, які відштовхуватимуться. Це все вияви електричного поля між тілами.

Напруженість електричного поля вимірюють у вольтах на метр. Якщо відверто, складно пояснити, що таке вольт, не кажучи вже про вольт на метр, але я спробую. Вольтаж, або напруга тіла, — це міра його електричного потенціалу. Вважатимемо, що Земля має нульовий електричний потенціал. Отже, напруга Землі дорівнює нулю. Позитивно заряджене тіло має позитивну напругу: це кількість енергії, яку потрібно виробити, щоб перемістити 1 кулон позитивного заряду (що дорівнює заряду приблизно $6 \cdot 10^{18}$ протонів) від Землі або будь-якого пов'язаного із Землею тіла-провідника (наприклад, водопровідного крана у вас удома) до цього тіла. Навіщо нам для цього енергія? Пригадайте: позитивно заряджене тіло відштовхуватиме позитивний заряд. Тому потрібно виробити енергію (ми, фізики, кажемо «виконати роботу»), щоб подолати цю силу відштовхування. Одиницею енергії (або роботи) є джоуль. Якщо потрібно виробити 1 джоуль енергії, тоді електричний потенціал тіла +1 вольт, а якщо 1000 джоулів, тоді потенціал +1000 вольтів. (Означення джоуля можна знайти в розділі 9).

А що, як тіло заряджене негативно? Тоді його електричний потенціал негативний і визначається як енергія, яку потрібно виробити, щоб перемістити 1 кулон негативного заряду (це заряд приблизно $6 \cdot 10^{18}$ електронів) від Землі до цього тіла. Якщо ця енергія дорівнює 150 джоулів, електричний потенціал тіла дорівнює -150 вольтів.

Таким чином, вольт — це одиниця електричного потенціалу, названа на честь італійського фізика Алессандро Вольта, який у 1800 році створив перший гальванічний елемент, або електричну батарею. Зверніть увагу, що вольт — це не одиниця енергії: це одиниця енергії, поділена на одиницю заряду (джоуль/кулон).

Електричний струм рухається від вищого потенціалу до нижчого. Сила цього струму залежить від різниці потенціалів і електричного опору між тілами. Ізолятори мають дуже великий опір, метали — малий. Що більша різниця напруги і що менший опір, то більша сила струму. Різниця потенціалів між двома малюсінькими отворами в електричній розетці у Сполучених Штатах становить 120 вольтів (у Європі — 220 вольтів). Утім струм у розетці змінний (цю тему ми розглянемо в наступному розділі). Одиницю сили струму — ампер (А) — названо на честь французького математика й фізика Андре-Марі Ампера. Якщо сила струму дорівнює 1 ампер, це означає, що через поперечний переріз провідника щосекунди проходить заряд в 1 кулон.

То що з іскрами? Як усе це допоможе їх пояснити? Якщо ви довго човгали туфлями об килим, між вами й Землею може утворитися різниця потенціалів аж до 30 000 вольтів. Або між вами й ручкою металевих дверей за 6 метрів від вас. Це 30 000 вольтів на відстань 6 метрів, або 5000 вольтів на метр. Коли ви підійдете до ручки, різниця потенціалів між вами не зміниться, але відстань скоротиться, тому сила електричного поля зросте. Незабаром, коли ви от-от візьметесь за ручку, напруга вже буде 30 000 вольтів на відстань близько сантиметра. Це майже 3 мільйони вольтів на метр.

За такої високої напруженості поля (в умовах сухого повітря й нормального атмосферного тиску) станеться так званий пробій. Електрони спонтанно «стрибнуть» у цей сантиметровий проміжок, іонізуючи при цьому повітря. До процесу долучається більша кількість електронів, що призводить до лавинного пробію, і — ова! — іскровий розряд. Ви ще не встигли взятися за ручку, а вас через повітря вже б'є струмом. Упевнений, ви зараз трохи зіщулились, пригадавши, коли з вами востаннє траплявся такий «сюрприз». Вам боляче від іскри, тому що електричний струм змушує ваші нерви скорочуватися, швидко й неприємно.

Звідки береться потріскування, коли вас б'є струмом? Відповідь проста. Електричний струм надзвичайно стрімко нагріває повітря, від чого виникає невелика хвиля тиску — звукова хвиля, яку ми чуємо. Але під час іскрового розряду з'являється також світло, яке вдень не завжди помітне, хоча інколи його все ж таки видно. Процес появи світла трохи складніший. Воно виникає, коли йони, що утворилися в

повітрі, знову возз'єднуються з електронами та випромінюють частину наявної енергії у вигляді світла. Навіть якщо ви не бачите світла від іскор (бо не стоїте перед дзеркалом у темній кімнаті), розчісуючи волосся в дуже суху погоду, утім потріскування таки можете почути.

Тільки-но подумайте: не докладаючи особливих зусиль — просто розчісуючись або знімаючи синтетичну сорочку, ви створили на кінчиках волосся чи на поверхні сорочки електричне поле з напруженістю майже *3 мільйони вольтів на метр*. Отже, якщо ви відчуваєте розряд, скажімо, за 3 міліметри від дверної ручки, то різниця потенціалів між вами й ручкою становить приблизно 10 000 вольтів.

Ця цифра здається страхітливою, але лєвова частка статичної електрики не становить небезпеки, головним чином тому, що хоч напруга й дуже висока, сила струму (кількість заряду, що проходить крізь вас за певний проміжок часу) мізерна. Якщо ви не проти, щоб вас трохи трусонуло, можете поекспериментувати — це цікаво і водночас наочно демонструє закони фізики. Проте ніколи не встромляйте жодних металевих предметів в електричні розетки. Це небезпечно для життя!

Краще спробуйте наелектризувати себе, потерши шкіру поліестером (робіть це в туфлях із гумовою підшвою або у в'єтнамках, щоб заряд не «витікав» у підлогу). Вимкніть світло й поступово підносьте палець дедалі ближче до металевої лампи або дверної ручки. Ще до того, як ви торкнетесь до них, у повітрі між металом і вашим пальцем має проскочити іскра. Що сильніше ви себе наелектризуєте, то більшою буде різниця потенціалів між вами і дверною ручкою, а отже, іскра буде потужнішою, а потріскування — гучнішим.

Один мій студент увесь час мимоволі електризувався. Він розповів, що в нього є халат з поліестеру, який він одягає тільки взимку. Як з'ясувалося, це був невдалий вибір, бо щоразу, знімаючи халат, хлопець електризувався, а потім, коли вимикав нічник біля ліжка, його било струмом. Виявляється, людська шкіра — один з найбільш позитивних матеріалів у трибоелектричному ряді, а поліестер — один з найбільш негативних. Тому краще одягати поліестерову сорочку, якщо ви хочете побачити іскри перед дзеркалом у темній кімнаті, але не варто взимку перед сном вбиратися в халат із цієї тканини.

Щоб досить наочно (і дуже комічно) продемонструвати те, як людина може наелектризуватися, я запрошую студента в поліестеровій куртці сісти перед усіма на пластмасовий стілець (пластик — чудовий ізолятор). Потім, стоячи на скляній пластині, щоб ізолювати себе від підлоги, я починаю бити студента хутром. «Побиття» триває приблизно півхвилини під голосний регіт однокурсників. Унаслідок закону збереження заряду ми зі студентом отримуємо заряди з протилежними знаками, і між нами виникне різниця електричних потенціалів. Я показую всім неонову імпульсну лампу, яку тримаю в руці. Тоді ми вимикаємо в аудиторії світло, у цілковитій темряві я торкаюся студента другим кінцем трубки, — і спалахує світло (а ми обоє відчуваємо невеличкий удар струмом)! Різниця потенціалів між студентом і мною має бути, напевно, щонайменше 30 000 вольтів. Від струму, який пройшов крізь газорозрядну трубку й нас, ми обоє розрядилися. Цей дослід дуже кумедний і наочний.

Частина лекції, присвячену «побиттю», можна переглянути в ролик [Professor Beats Student](https://www.youtube.com/watch?v=P4XZ-hMHNuc) на YouTube: [youtube.com/watch?v=P4XZ-hMHNuc](https://www.youtube.com/watch?v=P4XZ-hMHNuc).

Глибше дослідити загадки електричного потенціалу мені допомагає надзвичайний пристрій, відомий як електростатичний генератор Ван де Граафа. На вигляд це проста металева сфера, встановлена на циліндричній підставці. Але насправді це оригінальний пристрій, що створює величезні електричні потенціали. Середній максимум генератора в моїй аудиторії — приблизно 300 000 вольтів, але існують і такі, що дають і більше. У перших шести лекціях мого курсу 8.02 «Електрика й магнетизм», які доступні онлайн, можна побачити деякі дуже кумедні досліди з генератором Ван де Граафа. Ви побачите, як я створюю пробій електричного поля — велетенські іскри між великим куполом генератора і меншою заземленою (з'єднаною із Землею) кулею. Як від сили невидимого електричного поля засвічується флуоресцентна трубка і як вона «вимикається», коли повертається перпендикулярно полю. Ви навіть побачите, як я в цілковитій п'тьмі (ненадовго) торкаюся одного з кінців трубки, замикаючи коло із землею, і світло стає ще яскравішим. Я скрикую, тому що удар струмом досить відчутний, хоч і абсолютно безпечний. І якщо ви хочете посправжньому здивуватися (разом з моїми студентами), подивіться, що

станеться в кінці 6-ї лекції, де я демонструю приголомшливий метод перевірки на болотний газ, яким користувався Наполеон. Посилання на лекції: videlectures.net/mit802s02_electricity_magnetism/.

На щастя, висока напруга сама по собі вас не вб'є й навіть не зашкодить здоров'ю. Значення має сила струму, що проходить крізь тіло. Сила струму — це кількість заряду за одиницю часу, і, як уже було сказано, її вимірюють в амперах. Саме струм може спричинити серйозні ураження і смерть, особливо якщо його дія не припиняється. Чому струм небезпечний? Якщо максимально просто — тому, що заряди, рухаючись крізь тіло, змушують м'язи скорочуватися. Завдяки надзвичайно слабким електричним імпульсам наші м'язи скорочуються, або «заводяться», що відіграє дуже важливу роль у нашому житті. Але від сильнішого струму м'язи та нерви скорочуються так інтенсивно, що це перетворюється на болісні неконтрольовані судоми. Від ще сильнішого струму зупиняється серце.

Із цим пов'язаний один з найпохмуріших аспектів історії електрики та людського тіла — використання струму для тортур (він може завдати нестерпного болю) і для страти на електричному стільці. Якщо ви бачили фільм «Мільйонер з нетрів», то, мабуть, пам'ятаєте жахливі сцени катування в поліцейському відділку, в яких поліцейські-нелюди доторкалися до Джамала електродами, і він несамовито корчився від болю.

Слабкий струм може бути корисним для здоров'я. Якщо вам призначали фізіопроцедури на спину або плече, то, можливо, робили те, що фізіотерапевти називають електростимуляцією. До ураженого м'яза прикладають електроди, під'єднані до джерела електричної енергії, та поступово збільшують струм. Ви відчуваєте, як м'язи скорочуються та розслабляються наче самі собою, і вам видається це досить дивним.

Електрику використовують для надання медичної допомоги і в складніших ситуаціях. Ви всі бачили серіали, де хтось за допомогою схожих на праски пластин, які називають дефібрилятором, намагається відновити регулярність серцебиття пацієнта. Торік, коли мені робили операцію на серці, лікарям у якийсь момент довелося застосувати дефібрилятор, щоб моє серце знову почало битися

нормально, — і це допомогло! Якби не існувало дефібриляторів, ця книжка не побачила б світ.

Щодо летальної сили струму думки розходяться, і на те є очевидна причина — з небезпечними для життя рівнями струму експериментують не так часто. Крім того, є велика різниця, як пройде струм — крізь одну руку чи крізь мозок або серце. На руці може просто лишитися опік. Але майже всі одностайні в думці: струм, більший за одну десяту ампера, може стати смертельним, якщо пройде крізь серце, нехай це і триватиме менше секунди. В електричних стільцях, очевидно, використовували різний струм: близько 2000 вольтів і від 5 до 12 амперів.

Пам'ятаєте, як вам у дитинстві казали не встромляти виделку або ніж у тостер, щоб дістати звідти хліб, бо може вдарити струмом? Таке можливо? Що ж, я щойно переглянув технічні дані трьох побутових приладів у себе вдома: радіо (0,5 А), тостера (7 А) і еспресо-машини (7 А). Ці дані виробники наводять на етикетці більшості приладів. Часом силу струму не вказують, але її доволі просто обчислити, поділивши потужність приладу у ватах на напругу у вольтях (у Штатах це зазвичай 120 вольтів). Більшість автоматичних вимикачів у мене вдома спрацьовують за 15-20 амперів. Насправді неважливо, який струм проходить крізь ваш 120-вольтний прилад — 1 ампер чи 10 амперів. Головне — це уникати ситуацій, коли ви ненавмисно можете викликати коротке замикання або випадково торкнутися до металевого предмета під напругою 120 вольтів. Якщо ви зробите це невдовзі по тому, як приймете душ, вас може вбити. То який із цього всього можна зробити висновок? Тільки такий: коли ваша мама казала не вставляти ножа в тостер, поки він увімкнений у розетку, *вона мала рацію*. Якщо вам захочеться відремонтувати якийсь електроприлад, спершу обов'язково витягніть його з розетки. Ніколи не забувайте, що струм може бути дуже *небезпечним*.

Божественні іскри

Звісно, один з найнебезпечніших видів струму — це блискавка, одне з найдивовижніших електричних явищ. Вона могутня, не завжди передбачувана, загадкова і не всім зрозуміла — усе разом. У

міфології народів світу, від греків до майя, блискавка символізувала або саме божество, або його зброю. І це не дивно. У середньому на Землі щороку відбувається приблизно 16 мільйонів гроз, тобто понад 43 000 на день, майже 1800 щогодини, під час яких утворюється 100 блискавок щосекунди, або понад 8 мільйонів спалахів щодня по всій нашій планеті.

Блискавка виникає через електризацію грозових хмар. Зазвичай верх хмари стає позитивно зарядженим, а низ — негативно. Поки що не зовсім зрозуміло, чому так стається. Хоч вірте, хоч ні, але багато питань у фізиці атмосфери все ще потребують відповідей. Для спрощення поки що уявімо хмару, в якій найближчий до Землі бік заряджений негативно. Унаслідок індукції поверхня Землі, найближча до хмари, стане позитивно зарядженою, і між ними виникне електричне поле.

Фізичний механізм удару блискавки досить складний, але по суті спалах (електричний пробій) виникає, коли різниця потенціалів між хмарою і Землею сягає десятків мегавольтів. І хоча ми вважаємо, що блискавка б'є із хмари в Землю, насправді струм тече в обох напрямках: із хмари у ґрунт і з ґрунту знову у хмару. У середньому сила струму блискавки становить приблизно 50 000 амперів (хоча вона може сягати навіть кількох сотень тисяч амперів). Максимальна потужність типового удару блискавки — майже трильйон (10^{12}) ватів. Утім триває він лише кілька десятих мікросекунди. Тому загалом за один раз вивільняється не більше ніж кілька сотень мегаджоулів енергії. Стільки споживає за місяць лампочка потужністю 100 ватів. Тому отримувати енергію від блискавок не тільки технічно складно, а й не надто доцільно.

Майже всі знають, що визначити, як далеко від нас блискавка, можна за часом, який минає між моментами, коли ми бачимо спалах і чуємо грім. Але пояснення цієї закономірності дає нам змогу уявити, які потужні сили задіяні в цьому процесі. Воно не має нічого спільного з поясненням, яке я почув якось від одного студента: блискавка створює щось на зразок зони низького тиску, а грім виникає, коли в цей пролом несеться повітря і зіштовхується з повітрям з іншого боку. Насправді все майже точнісінько навпаки. Енергія блискавки розжарює повітря до 20 000 градусів за Цельсієм — що більш ніж утричі гарячіше, ніж на

поверхні Сонця. Це розжарене повітря створює потужну хвилю тиску, яка вривається в прохолодніше повітря, що її оточує, і в результаті виникають звукові хвилі. У повітрі звук за три секунди проходить приблизно кілометр, тому, відраховуючи секунди, можна досить легко визначити відстань до блискавки.

Таке різке нагрівання повітря пояснює ще одне явище, яке ви, мабуть, спостерігали під час грози. Ви помічали, як по-особливому пахне в повітрі після грози за містом: якоюсь свіжістю, наче гроза начисто вимила повітря? Цей запах у місті відчутний слабко, бо в атмосфері повно вихлопних газів від автівок. Але навіть якщо вам знайомий цей дивовижний аромат (якщо ні, раджу згадати про це, коли ви наступного разу вийдете надвір одразу після грози), я впевнений, ви не знали, що це запах озону — різновиду кисню, молекула якого складається із трьох атомів. Молекули звичайного кисню, що не має запаху, складаються із двох атомів і називаються O_2 . Утім страшний жар від розряду блискавки розриває молекули звичайного кисню — не всі, але значну кількість. А ці окремі атоми кисню нестабільні, тому приєднуються до молекул O_2 , утворюючи O_3 — озон.

У невеликих концентраціях озон пахне чарівно, а от у більших він уже не такий приємний. Його часто можна знайти під високовольтними лініями передач. Якщо лінії гудять, це найімовірніше означає, що десь щось іскрить (це явище називають коронним розрядом), і тому утворюється невелика кількість озону. У безвітряну погоду ви маєте відчутти його запах.

А тепер повернімося до твердження, що кросівки начебто можуть вас захистити, коли ударить блискавка. Від розряду силою 50 000–100 000 амперів, здатного розжарити повітря до температури, втричі вищої за температуру на поверхні Сонця, ви майже напевне згоріли б ущент, билися б у конвульсіях від ураження струмом або вибухнули б від того, що вся вода у вашому тілі миттєво перетворилася б на розжарену пару, — незалежно від того, у що ви взуті. Саме це стається із деревами: сік у ньому вибухає, розриваючи його кору. Сто мільйонів джоулів енергії — еквівалент приблизно 25 кілограмів динаміту — це вам не абищо.

А як щодо гумових покриттів? Чи захистять вони вас, якщо ви будете в машині, в яку вдарить блискавка? Шанси, що ви не постраждаєте, існують — я цього не гарантую! — утім зовсім з іншої причини. Електричний струм проходить через поверхневий шар провідника — це явище має назву скін-ефект, а в машині ви наче сидите в металевому ящику, а метал, як ми вже знаємо, добре проводить струм. Ви можете навіть торкнутися вентиляційної решітки на приладовій панелі й нічого не відчути. Проте я закликаю вас не випробовувати долю: більшість сучасних машин обладнані деталями зі склопластику, в якому скін-ефект не спостерігається. Інакше кажучи, якщо у вашу машину вдарить блискавка, на вас — і вашу автівку — чекає надзвичайна неприємність. Можливо, ви захочете переглянути коротеньке відео, як блискавка влучає в машину (cutt.ly/PwrxxTn), і фотографії фургона після удару блискавкою (prazen.com/cori/van.html). Із такими речами точно не варто жартувати!

На щастя для всіх нас, із пасажирськими літаками ситуація зовсім інакша. Блискавка влучає в них у середньому раз на рік, але завдяки скін-ефекту вони залишаються неушкодженими. Подивіться це відео: youtube.com/watch?v=036hpBvjoQw.

Ще один цікавий експеримент, пов'язаний із блискавкою (утім я не раджу вам повторювати його!), дуже часто приписують Бенджаміну Франкліну: запускання в грозу повітряного змія із підвішеним до нього металевим ключем. Вважається, начебто Франклін хотів перевірити гіпотезу про те, що грозові хмари породжують електричний вогонь. Він міркував так: якщо блискавка і справді є джерелом електрики, тоді мотузка повітряного змія, намокнувши під дощем, стане хорошим провідником для цієї електрики (хоч він і не вживав цього слова), і заряд потрапить на ключ, прикріплений ближче до кінця мотузки. Доторкнувшись кулаком до ключа, він викликав іскровий розряд. Проте, як і у випадку з Ньютоном, який в останні роки життя стверджував, що його надихнуло падіння яблука з дерева, немає жодних свідчень сучасників про те, чи проводив Франклін цей експеримент узагалі. Є лише звіт про експеримент у його листі, надісланому в Лондонське королівське товариство, та ще один письмовий документ, який склав п'ятнадцять років по тому його друг Джозеф Прістлі, першовідкривач кисню.

Невідомо, чи проводив Франклін цей дослід, що було б у край небезпечно й цілком могло закінчитися смертю винахідника. Але він опублікував опис іншого експерименту, метою якого було спустити на землю блискавку за допомогою залізного стрижня, встановленого на верхівці вежі або дзвіниці. Через кілька років француз Тома-Франсуа Д'Алібар, який був знайомий із Франкліном ще раніше і переклав його ідеї французькою, здійснив цей експеримент у дещо інший спосіб, і вижив, щоб переповісти його. Він установив націлену в небо 12-метрову сталеву жердину і спостерігав біля її незаземленої нижньої частини іскри.

Професор Георг Вільгельм Ріхман, визначний учений, який народився в Естонії, а потім жив у Санкт-Петербурзі, член Петербурзької академії наук, багато років вивчав електричні явища, очевидно надихнувшись експериментом Д'Алібара, також вирішив спробувати здійснити його. Як розповідає Майкл Браян Шиффер у захопливій книжці «Знешкодьте блискавку: Бенджамін Франклін і електротехніка доби Просвітництва» (*Draw the Lightning Down: Benjamin Franklin and Electrical Technology in the Age of Enlightenment*), Ріхман установив на даху свого будинку залізний прут і за допомогою латунного ланцюга з'єднав його з електровимірювальним пристроєм у лабораторії на першому поверсі.

Як навмисне — або ж це знак долі — під час засідання Академії наук у серпні 1753 року зібралось на грозу. Ріхман помчав додому, покликавши із собою художника, який мав ілюструвати його нову книжку. Поки учений спостерігав за обладнанням, ударила блискавка, пройшла вниз металевим стрижнем і ланцюгом, вистрибнула десь у сантиметрах тридцяти від голови Ріхмана і вбила його, відкинувши через усю кімнату, разом оглушивши художника, який від удару знепритомнів. В інтернеті можна знайти кілька ілюстрацій, на яких зображено цю жахливу сцену, хоча достеменно не відомо, чи був їхнім автором згаданий вище художник.

Франклін винайшов схожий пристрій, але вже заземлений. Зараз він відомий під назвою громовідвід. Він ефективно заземляє розряди блискавки, хоч і діє за іншим принципом, ніж припускав Франклін. Він вважав, що через металевий стрижень між наелектризованою хмарою і будівлею відбудуватиметься постійний розряд, тому різниця потенціалів

залишатиметься низькою і блискавка не становитиме загрози. Він був так переконаний у своїй правоті, що порадив королю Георгу II установити громовідводи на даху королівського палацу та складах із боєприпасами. Опоненти Франкліна заявляли, що громовідвід лише притягне блискавку, а ефект від розряду, який зменшуватиме різницю потенціалів між спорудою і грозовими хмарами, буде незначним. Король, як каже історія, повірив Франкліну і встановив громовідводи.

Незабаром після цього блискавка влучила в один зі складів, але він майже не зазнав ушкоджень. Отже, громовідвід подіяв, але з дещо інших причин. Критики Франкліна мали рацію: громовідводи таки притягують блискавку, а розряд стрижнів справді незначний порівняно з колосальним зарядом грозової хмари. Утім громовідвід виконує-таки завдання, бо якщо стрижень достатньо товстий, щоб витримати 10 000–100 000 амперів, то струм не виходитиме за його межі й заряд передаватиметься ґрунту. Франклін був не тільки талановитим винахідником — йому ще й надзвичайно щастило!

Хіба не дивовижно, що, зрозумівши природу потріскування поліестерового светра, яке виникає, коли ми знімаємо його взимку, ми можемо якоюсь мірою збагнути силу потужних гроз, що часом освітлюють блискавками все нічне небо, а також походження одного з найгучніших і найстрашніших у природі звуків?

Можна сказати, ми є сучасними версіями Бенджаміна Франкліна, бо так само намагаємося осягнути те, що лежить за межами нашого розуміння. У кінці 1980-х учені вперше сфотографували блискавки, що виникають дуже-дуже високо над хмарами. Один з різновидів таких блискавок має назву спрайт і складається з червонувато-оранжевих електричних розрядів, що відбуваються на висоті 50–90 кілометрів над землею. А існують ще так звані блакитні джети, які значно більші, завдовжки іноді до 70 кілометрів, і вистрілюють у верхні шари атмосфери. Ці дивовижні явища відомі нам лише трохи більше ніж двадцять років, тому ми ще так мало знаємо про причини їхньої появи. Попри всі наші знання про електрику, за кожною грозою, приблизно 45 000 разів на день, прихована справжня таємниця.

¹³ Більше про цю величну особистість ви можете прочитати у книжці Волтера Айзексона «Бенджамін Франклін», що вийшла друком у видавництві «Наш формат» 2019 року. — Прим.

ред.

14 Сам Франклін називав цю грубу «пенсильванським каміном». — *Прим. ред.*

Розділ 8

Загадки магнетизму

Магніти для багатьох людей — лише розвага, частково тому, що ми можемо відчувати силу, з якою вони діють на предмети, і погратися з нею, хоч вона зовсім невидима. Коли ми наближаємо один до одного два магніти, вони або взаємно притягуються, або відштовхуються — як і наелектризовані тіла. Більшість із нас відчуває, що магнетизм глибоко пов'язаний з електрикою — наприклад, ледь не кожен, хто цікавиться наукою, знає слово *електромагнітний*, — але водночас ми не можемо остаточно пояснити, чому і як вони пов'язані. Це величезна тема, і я присвятив їй цілий вступний курс, тому тут ми оглянемо її побіжно. Але навіть у такому разі фізика магнетизму досить швидко продемонструє нам приголомшливі ефекти і допоможе глибше зрозуміти багато явищ.

Дива магнітних полів

Якщо взяти магніт і покласти його перед екраном увімкненого старого телевізора ще з доплазмових часів, ви побачите на екрані дуже цікаві кольорові візерунки.

Коли ще не існувало рідкокристалічних дисплеїв і плазмових екранів, пучки електронів, що летіли із задньої частини телевізора в бік екрана, активували на ньому кольори, фактично малюючи різні зображення.

Якщо піднести до такого екрана магніт, як роблю я на лекції, виникають майже психоделічні візерунки. Вони такі привабливі, що від них у захваті навіть дітлахи чотирьох-п'яти років. (Фотографії цих візерунків легко знайти в інтернеті).

Правду кажучи, діти, здається, постійно самі виявляють такий ефект. Інтернет так і рясніє благаннями стривожених батьків допомогти їм урятувати телевізор після того, як чада приклали до екрана магніти з холодильника. На щастя, більшість телевізорів оснащено спеціальним пристроєм, який розмагнічує екран, і зазвичай за кілька днів або тижнів проблема зникає сама собою. Але якщо ні, вам доведеться викликати майстра. Тому не раджу близько підносити магніти до

екрана вашого телевізора (або монітора комп'ютера), хіба що це допотопний телевізор або монітор, якого вам не шкода. Тоді ви можете трохи розважитися. Усесвітньо відомий корейський художник Нам Джун Пайк створив безліч відеоінсталяцій, з викривленими в такий спосіб зображеннями. На лекції я вмикаю телевізор і обираю найжахливішу передачу — рекламний ролик якнайкраще згодиться для цього — і всі із захватом спостерігають за тим, як магніт викривлює зображення.

Магнетизм, як і електрика, має давню історію. Ще понад 2000 років тому греки, індуси та китайці, судячи з усього, знали, що деякі камінці — які називали морським залізом — притягують дрібні частинки заліза (так само, як давні греки помітили, що бурштин, коли його потерти, збирає шматочки листя). Сучасна назва цієї речовини — магнетит, або магнітний залізняк. Це природний магнітний мінерал, який, власне, має найсильніші магнітні властивості серед усіх природних речовин на Землі. Магнетит складається із заліза й кисню (Fe_3O_4) і також відомий як оксид заліза.

Але крім магнетиту, існує ще багато інших магнітів. Залізо відіграло велику роль в історії магнетизму і досі залишається важливим складником багатьох чутливих до магнітного поля матеріалів, тому ці матеріали, які притягуються до магнітів найбільше, називають феромагнетиками (префікс «феро-» вказує на наявність заліза). До них належать здебільшого метали та їхні сполуки: звісно, саме залізо, а також кобальт, нікель і діоксид хрому (раніше його часто використовували для покриття магнітної стрічки). Деякі з них можна перетворити на постійні магніти, помістивши їх у магнітне поле. Інші речовини, які називають парамагнетиками, набувають у магнітному полі слабких магнітних властивостей і втрачають їх знову, коли поле зникає. До них належать алюміній, вольфрам, магній і, хто б подумав, кисень. Ще існують речовини під назвою діамагнетики, які в присутності магнітного поля створюють досить слабе власне магнітне поле, *напрявлене протилежно до зовнішнього*. До них належать вісмут, мідь, золото, ртуть, водень і кухонна сіль, а також дерево, пластмаси, алкоголь, повітря і вода. (Феромагнітні, парамагнітні або діамагнітні

властивості пов'язані з розподілом електронів навколо ядра — це аж *занадто* складна тема, щоб у неї заглиблюватися).

Існують навіть рідкі магніти — не зовсім феромагнітні рідини, а радше розчини феромагнітних речовин, які дуже красиво й незвично реагують на магніти. Такі рідкі магніти досить легко виготовити самостійно; ось посилання на інструкцію: cutt.ly/ZtLr7R. Якщо крапнути такий досить густий розчин на шматочок скла й покласти під нього магніт, результат буде дивовижний — значно цікавіше, ніж дивитися, як залізні ошурки збираються вздовж ліній магнітного поля під час досліду на уроці фізики.

Вважається, що в XI столітті китайці намагнічували голки об магнетит, а потім підвішували їх на шовковій нитці. Голки вирівнювалися в напрямку північ-південь, тобто вздовж силових ліній магнітного поля Землі. До початку наступного століття компаси вже використовували для навігації як у Китаї, так і на далекому Ла-Манші. Це була намагнічена голка, що плавала в чаші з водою. Винахідливо, правда? Незалежно від того, куди поверне корабель, а разом з ним — і чаша, голка завжди вказуватиме на північ і південь.

Природа ще винахідливіша. Зараз нам відомо, що в тілі перелітних птахів є крихітні частинки магнетиту, які, мабуть, виконують роль внутрішнього компаса, допомагаючи птахам не збитися зі шляху. Деякі біологи навіть вважають, що магнітне поле Землі стимулює оптичні центри в мозку деяких птахів та інших тварин, наприклад саламандр. Тобто вчені припускають, що в певному розумінні ці тварини «бачать» магнітне поле Землі. Хіба це не вражає?

У 1600 році визначний медик і вчений Вільям Гільберт — не просто собі лікар, а особистий лікар Єлизавети I — опублікував працю «Про магніт, магнітні тіла і про великий магніт Землі» (*De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*), в якій заявив, що сама Земля є магнітом. Цього висновку він дійшов після експериментів з невеликою сферою з магнетиту, що мала служити моделлю Землі. Сфера була, може, трохи більша за грейпфрут, і розташовані на ній маленькі компаси поводитися так само, як на поверхні Землі. Гільберт стверджував, що компаси вказують на північ тому, що Земля є магнітом, а не через те, що на Північному й

Південному полюсах, як дехто вважав, лежать магнітні острови. І не тому, що компаси вказують на Полярну зорю.

Гільберт не помилявся не тільки щодо того, що Земля має магнітне поле, — вона має навіть магнітні полюси (так само, як магніт на холодильнику), які не зовсім збігаються з географічними полюсами. І це ще не все — магнітні полюси Землі поступово зміщуються, десь на 15 кілометрів за рік. Отже, у чомусь Земля справді поводить себе як простий штабовий магніт — звичайний намагнічений металевий брусок, який можна придбати в магазині «Усе для хобі». Але в іншому вона повністю від нього відрізняється. Науковці дуже довго не могли запропонувати життєздатної теорії, яка б пояснювала, чому Земля має магнітне поле. Того факту, що земне ядро містить багато заліза, недостатньо, тому що при нагріванні до певної температури (вона називається температурою Кюрі) матеріали втрачають феромагнітні властивості, й залізо не виняток. Температура Кюрі для заліза становить приблизно 770 градусів за Цельсієм, а ми знаємо, що земне ядро значно гарячіше!

Теорія досить заплутана і пов'язана з потоками електричного струму, які циркулюють у земному ядрі, а також із тою реальністю, що Земля обертається, — фізики називають це магнітним динамо. (Астрофізики, до речі, за допомогою цієї теорії пояснюють магнітні поля зір, зокрема Сонця, магнітне поле якого *повністю змінює напрям*ок приблизно кожні одинадцять років). Можливо, ви будете вражені, але науковці досі працюють над створенням повної математичної моделі Землі та її магнітного поля — така вона непроста. Завдання ще більше ускладнене тим, що існують геологічні докази, що магнітне поле Землі протягом тисячоліть суттєво змінилося: полюси змістилися на значно більшу відстань, ніж зазвичай за рік, і, здається, магнітне поле також повертало в протилежному напрямку — більше ніж 150 разів лише за останні 70 мільйонів років. Дивно, є ж?

Зараз завдяки супутникам (зокрема, данському супутнику «Ерстед»), обладнаним чутливими магнітометрами, ми можемо скласти більш-менш точну карту магнітного поля Землі. Нам відомо, що воно простягається в космічний простір більше ніж на мільйон кілометрів. Також ми знаємо, що ближче до Землі магнітне поле створює одне з найкрасивіших атмосферних явищ.

Сонце, як ви, мабуть, пам'ятаєте, випромінює потужний потік заряджених частинок, що складається в основному із протонів і електронів і має назву сонячний вітер. Магнітне поле Землі спрямовує деякі із цих частинок у нашу атмосферу біля магнітних полюсів. Коли ці частинки, що летять зі швидкістю приблизно 400 кілометрів за секунду, зіштовхуються в атмосфері з молекулами кисню й азоту, частина їхньої кінетичної енергії (енергії руху) перетворюється на електромагнітну енергію у вигляді світла. Кисень вивільняє зелені або червоні промені, а азот — сині або червоні. Ви, певно, здогадуєтеся, про що я. Правильно, так створюється ефектне світлове шоу, яке в Північній півкулі називають північним полярним сяйвом, а в Південній — південним полярним сяйвом. Чому це сяйво можна побачити тільки дуже далеко на півночі або на півдні? Тому що сонячний вітер потрапляє в земну атмосферу переважно біля магнітних полюсів, де магнітне поле найсильніше. Те, що в деякі ночі вияви цього ефекту яскравіші, пов'язано із сонячними спалахами, які дають більше частинок для світлового шоу. Потужні зблиски на Сонці можуть мати серйозний вплив на магнітне поле Землі, викликаючи так звані магнітні бурі та полярне сяйво далеко за межами звичних районів, часом негативно впливаючи на радіозв'язок, роботу комп'ютерів, керування супутниками і навіть призводячи до відключень електроенергії.

Якщо ви не живете поблизу Північного (або Південного) полярного кола, то не дуже часто спостерігатимете полярне сяйво. Тому якщо вам доведеться ввечері летіти в Європу з північного сходу Сполучених Штатів (а більшість рейсів вечірні), раджу вам узяти місце в лівій частині літака. Можливо, на висоті 11 кілометрів ви зможете трохи роздивитися з вікна полярне сяйво, особливо якщо Сонце останнім часом було надто активним, про що можна дізнатися з інтернету. Саме завдяки цьому я багато разів бачив полярне сяйво, тому, якщо є така змога, я завжди сідаю в лівій частині літака. Я вважаю, що фільми можна подивитися вдома будь-коли. У літаку я вночі шукаю полярне сяйво, а вдень — глорії.

Ми у величезному боргу перед магнітним полем Землі, бо якби його не було, постійний потік заряджених частинок, що бомбардують нашу атмосферу, призвів би до серйозних наслідків. Сонячний вітер знищив

би нашу атмосферу й воду ще мільйони років тому, і життя в таких умовах було б набагато складніше розвиватися, якщо взагалі можливо. Учені припускають, що тонка атмосфера Марса та порівняно незначні запаси води пояснюються саме такими постійними ударами сонячного вітру, від яких потерпає Червона планета через своє слабе магнітне поле. У такому середовищі людські істоти можуть існувати тільки за допомогою потужних систем життєзабезпечення.

Таємниця електромагнетизму

У XVIII столітті деякі вчені почали підозрювати, що електричні й магнітні явища якось пов'язані, хоча інші вчені, наприклад англієць Томас Юнг і француз Андре-Марі Ампер, вважали, що вони не мають нічого спільного. Вільям Гільберт вважав електрику й магнетизм абсолютно незалежними явищами, але все-таки досліджував їх одночасно, описавши електрику у своїй праці, присвяченій магнетизму. Він називав здатність бурштину притягувати до себе інші тіла «електричною силою» (пригадуєте, давні греки називали бурштин *електроном*?). Він навіть винайшов щось на зразок електроскопа, за допомогою якого можна було виміряти статичну електрику і продемонструвати її наявність. (В електроскопі на кінці металевого стрижня закріплено пучок фольгових смужок. Щойно він наелектризується, смужки настовбурчуються — такий собі лабораторний відповідник волосся з-під шапки).

У 1776-1777 роках Баварська академія наук просила дослідників надсилати есе про зв'язок між електрикою та магнетизмом. Уже якийсь час було відомо, що від розрядів блискавки могли виходити з ладу компаси, і не хто інший, як сам Бенджамін Франклін намагнічував голки, якими розряджав лейденську банку. (Винайдена в середині XVIII століття в Нідерландах лейденська банка могла «зберігати» електричні заряди. Це була найперша версія пристрою, який ми називаємо конденсатором). Але попри бурхливі темпи дослідження вченими електричних явищ на початку XIX століття, жоден з них прямо не пов'язував електричний струм з магнетизмом аж до вирішального відкриття данського фізика Ганса Крістіана Ерстеда (народився 1777 року), яке звело разом електрику й магнетизм. За

словами історика Фредеріка Грегорі, це чи не єдиний випадок в історії сучасної фізики, коли таке колосальне відкриття було здійснено під час лекції на очах у студентів.

У 1820 році Ерстед звернув увагу, що коли через провідник, під'єднаний до батареї, проходить струм, стрілка розташованого поблизу компаса відхиляється від напрямку північ-південь і встановлюється перпендикулярно до провідника. Щойно він роз'єднав провідник і струм припинився, стрілка повернулася у звичайне положення. Не відомо, чи Ерстед навмисно проводив такий експеримент на лекції, чи компас випадково опинився в його руках, і вчений просто помітив цей неймовірний ефект. Його власні звіти різняться — ми вже не раз спостерігали подібне в історії фізики.

Випадковість це чи ні, не має значення, але це чи не найважливіший експеримент (назвімо так) за всю історію фізичних досліджень. Завдяки йому Ерстед зробив логічний висновок, що електричний струм у провіднику створив магнітне поле, і магнітна стрілка компаса рухалася під його дією. Таке вражаюче відкриття викликало справжній бум досліджень у сфері електрики й магнетизму, зокрема Андре-Марі Ампера, Майкла Фарадея, Карла Фрідріха Гауса, й нарешті зумовило появу визначних теоретичних праць Джеймса Клерка Максвелла.

Струм — це потік заряджених частинок, а отже, Ерстед продемонстрував, що рухомий електричний заряд створює магнітне поле. У 1831 році Майкл Фарадей з'ясував, що коли рухати магніт крізь дротяну котушку, в ній виникає струм. Він фактично показав, що закономірність, яку відкрив Ерстед, можна поставити з ніг на голову: рухоме магнітне поле створює електричний струм. Утім результати експериментів обох цих учених не здаються логічними, чи не так? Якщо провести магнітом поруч із дротяною котушкою — найкраще згодиться мідь, бо це дуже хороший провідник, — з якого дива в ній повинен виникати струм? Важливість цього відкриття зрозуміли не одразу. Кажуть, що якийсь один політик, засумнівавшись, запитав у Фарадея, чи має його відкриття якусь практичну цінність, і вчений начебто відповів: «Сер, я не знаю, яка із цього може бути користь. Проте в одному я цілком упевнений: колись ви обкладете це податком».

Можливо, це просте фізичне явище, яке легко відтворити вдома, здається позбавленим сенсу, але воно без перебільшення є рушієм усієї нашої економіки і всього, що створила людина. Без цього явища ми б досі жили приблизно як наші предки в XVII й XVIII століттях. Не було б ні електричного освітлення, ні радіо, ні телебачення, ні телефонів, ні комп'ютерів.

Звідки ми отримуємо всю ту електрику, якою сьогодні користуємося? Загалом — від електростанцій, де вона виробляється за допомогою генераторів, які переміщують мідні котушки в магнітному полі. Ми вже не переміщуємо магніти. Перший генератор Фарадея — це мідний диск, який за допомогою ручки обертася між двома кінцями підковоподібного магніту. Щітка на зовнішньому краю диска з'єднувалася з одним провідником, а щітка на центральному валу обертального диска — із другим провідником. Якщо під'єднати ці два провідники до амперметра, він виміряє згенерований струм. Фарадей прикладав до системи енергію (м'язову силу), яку пристрій перетворював на електрику. Але через низку причин, зокрема, що мідний диск доводилося крутити вручну, генератор Фарадея був не надто ефективним. У певному сенсі генератори слід було б називати перетворювачами енергії. Адже вони тільки перетворюють енергію певного виду, в цьому випадку кінетичну, на енергію електричну. Інакше кажучи, безкоштовної енергії не існує. (Перетворення енергії ми розглянемо детальніше в наступному розділі).

Електрика надає руху

Ми дізналися, як перетворити рух на електрику, а тепер подумаймо, як зробити навпаки й перетворити електрику на рух. Урешті-решт, саме для цього автовиробники витрачають мільярди доларів на розробку електромобілів. Усі вони намагаються винайти ефективні й потужні електродвигуни для цих автівок. А що таке двигун? Двигун — це пристрій, що перетворює електричну енергію в рух. В основі їхньої роботи лежить на перший погляд простий, але насправді досить складний принцип: якщо в магнітне поле помістити дротяну котушку, крізь яку проходить струм, вона обертатиметься. Швидкість її обертання залежить від багатьох чинників: сили струму, сили

магнітного поля, форми котушки тощо. Фізики кажуть, що магнітне поле надає котушці крутний момент. «Крутний момент» — це термін на позначення сили, що змушує речі обертатися.

Якщо вам хоч раз доводилося змінювати покришку, то ви, звісно, чудово уявляєте, що таке крутний момент. Ви знаєте, що один з найскладніших етапів цієї процедури — послабити гайки, які утримують колесо на осі. Зазвичай їх дуже туго закручують, а часом здається, що вони зрослися, і ви змушені докладати титанічних зусиль до гайкового ключа. Що довший держак ключа, то більший крутний момент. З дуже довгим держакром ви, можливо, відбудетеся зовсім незначними зусиллями, і відкрутите гайки. Замінивши покришку, щоб підтягнути гайки, ви прикладаєте крутний момент у протилежному напрямку.

Звісно, іноді буває так, що хоч ви й натискаєте чи тягнете щосили, гайка все одно не рухається. У такому разі або нанесіть на неї трохи аерозолу WD-40 (я раджу завжди тримати в багажнику WD-40, для цього й багато чого іншого) і почекавши трохи, відкрутіть її, або спробуйте вдарити по держаку ключа молотком (ще одна річ, яку завжди треба возити із собою!).

Нам не обов'язково заглиблюватися у складні тонкощі, пов'язані з крутним моментом. Достатньо знати лише те, що якщо пропустити через котушку струм (наприклад, за допомогою батарейки) і помістити її в магнітне поле, на неї діятиме крутний момент, що змусить її обертатися. Що сильніший струм, то сильніше магнітне поле і то більший крутний момент. Цей принцип лежить в основі роботи двигуна постійного струму, просту версію якого досить легко зробити.

Яка різниця між постійним і змінним струмом? Полюси батарейки не змінюються (плюс залишається плюсом, а мінус — мінусом). Тому якщо під'єднати батарейку до провідника, струм завжди проходитиме в одному напрямку, і такий струм називають постійним. Проте у Сполучених Штатах різниця потенціалів між двома отворами електричної розетки змінюється із частотою 60 герців, а в Нідерландах і в більшості країн Європи — із частотою 50 герців. Якщо ви в себе вдома під'єднаєте до розетки провідник, наприклад лампу розжарювання або обігрівач, струм коливатиметься (заряди рухатимуться то в один бік, то в другий) із частотою 60 герців (тобто

змінюючи напрямок 120 разів за секунду). Такий струм називають змінним.

Щороку під час курсу з електрики й магнетизму ми влаштовуємо конкурс двигунів. (Уперше його провели за кілька років до мене мої колеги та друзі професори Віт Буса та Віктор Вайскопф). Кожен студент отримує конверт із простими матеріалами: два метри ізолюваного мідного дроту, дві скріпки, дві канцелярські кнопки, два магніти й маленький дерев'яний брусок. Студенти ще мають узяти батарейку типу АА на 1,5 вольт. Вони можуть користуватися будь-якими інструментами, пиляти дерево й свердлити отвори, але двигун дозволено збирати лише з матеріалів, що у конверті (клей чи клейка стрічка заборонені). Завдання студентів — побудувати із цих простих складників якомога швидший двигун (з якомога більшою кількістю обертів за хвилину). Скріпки мають бути опорами для котушки, що обертається; дріт потрібен для виготовлення котушки; а магніти слід розташувати так, щоб забезпечити в котушці крутний момент, коли крізь неї проходить струм від батарейки.

Припустімо, ви хочете взяти участь у змаганні. Ви під'єднуєте акумулятор до котушки, і вона починає обертатися за годинниковою стрілкою. Поки що все добре. Але, на ваш великий подив, котушка згодом зупиняється. Річ у тому, що після кожного півоберта крутний момент змінює напрямок. Ця зміна напрямку перешкоджатиме обертанню за годинниковою стрілкою; котушка може крутнутися навіть проти годинникової стрілки. Безперечно, це не те, чого ми очікуємо від двигуна. Нам потрібно, щоб він постійно обертася тільки в одному напрямку (за годинниковою стрілкою чи проти — не має значення). Цього можна досягти, якщо після кожного півоберта змінювати напрямок струму, що проходить крізь котушку. Тоді крутний момент постійно діятиме на котушку в тому самому напрямку, і вона обертатиметься.

Щоб побудувати двигун, студентам слід вирішити неминучу проблему зі зміною напрямку крутного моменту, і деяким вдається сконструювати так званий комутатор — пристрій, що після кожного півоберта змінює напрямок струму. Але це складно. На щастя, існує простий і дуже розумний спосіб розв'язати цю проблему, не змінюючи напрямку струму. Якщо зробити так, щоб струм (а отже, й крутний

момент) прямував до нуля після кожного півоберта, тоді крутний момент узагалі не впливатиме на котушку протягом одного півоберта, а протягом другого буде спрямований в один і той самий бік. У підсумку котушка обертатиметься.

Я даю очко за кожні 100 обертів за хвилину, які здійснює двигун, максимум — це 20 очок. Студентам дуже подобається це завдання, і оскільки це студенти МТІ, вони часом створюють дивовижні пристрої. Можливо, ви теж захочете спробувати. Щоб отримати інструкції, перейдіть за посиланням на додаткові матеріали до 11-ї лекції: ocw.mit.edu/courses/physics/8-02-electricity-and-magnetism-spring-2002/lecture-notes/.

Майже всім студентам вдається без зайвих клопотів зібрати двигун, що обертається із частотою приблизно 400 обертів за хвилину. Як вони змушують котушку крутитися в одному напрямку? По-перше, їм потрібно зішкрябати ізоляцію з одного кінця дротяної обмотки, щоб контакт між обмоткою і одним з полюсів батареї був постійно замкненим, — звісно, неважливо, який кінець вони оберуть. Із другим кінцем обмотки все значно складніше. Студенти хочуть, щоб струм проходив крізь котушку тільки протягом половини її оберту — інакше кажучи, їм треба розірвати коло на півшляху. Тому із другого кінця обмотки вони знімають ізоляцію *наполовину*. Це означає, що дріт оголений лише на половині окружності. Щоразу, коли струм припиняється (кожні півоберта), котушка й далі обертається навіть без крутного моменту (немає достатнього тертя, щоб зупинити її на половині оберту). Щоб визначити, скільки саме ізоляції треба зчищати і яку саме половину дроту оголити, доведеться трохи поекспериментувати. Але, як я казав, майже всім конкурсантам удається отримати 400 обертів за хвилину. Це і мій результат — але я ніяк не міг змусити двигун обертатися швидше.

Потім кілька студентів пояснили мені, у чому проблема. Тільки-но котушка робить більше кількох сотень обертів за хвилину, вона починає вібрувати на підставках (скріпках), часто розриваючи коло й тим самим припиняючи крутний момент. Тому кмітливіші студенти здогадалися, як за допомогою двох шматків дроту втримати обидва кінці котушки на скріпках так, щоб вона водночас могла вільно

обертатися. І з цим незначним удосконаленням вони змогли, хоч як неймовірно це звучить, досягти 4000 обертів за хвилину!

Ці студенти такі винахідливі! Майже в усіх двигунах котушка обертається навколо горизонтальної осі. Але один студент зробив двигун, у якому котушка оберталася навколо вертикальної осі. Найкращий результат за всі роки був аж 5200 обертів за хвилину — і це, не забувайте, від однієї малесенької батарейки на 1,5 вольт! Я пам'ятаю студента-переможця. Він був першокурсником. Коли після лекції ми стояли біля дошки в аудиторії, він сказав: «О професоре Левін, це легко. Я можу зібрати вам двигун на 4000 обертів хвилин за десять». І він одразу перейшов до справи, просто на моїх очах.

Але вам не обов'язково робити щось подібне. Існує навіть простіший двигун, який можна зібрати за кілька хвилин зі ще меншої кількості деталей: лужної батарейки, невеликого шматка мідного дроту, саморіза (або цвяха) й маленького дискового магніту. Його називають уніполярним. Тут ви можете знайти покрокову інструкцію, як його виготовити, й побачите такий двигун у дії (напишіть мені, якщо ваш розганятиметься більше ніж на 5000 обертів за хвилину): evilmadscientist.com/article.php/НомопolarMotor.

Не менш цікавий за конкурс двигунів, хоч і дуже від нього відрізняється, ще один дослід, який я демонструю на своїх лекціях. Для нього потрібна електрична котушка діаметром 30 сантиметрів і пластина-провідник. Як ви знаєте, електричний струм, проходячи крізь котушку, створить магнітне поле. Змінний струм у котушці згенерує змінне магнітне поле. (Пригадуєте, що батарейка — джерело постійного струму). Оскільки в моїй аудиторії, як і всюди у Сполучених Штатах, частота змінного електричного струму становить 60 герців, струм у котушці змінює напрямок 120 разів за секунду. Якщо розташувати її над металевією пластиною, змінне магнітне поле (далі я називатиму його зовнішнім магнітним полем) пронизуватиме пластину. Згідно із законом Фарадея, під дією цього поля в металевій пластині виникнуть потоки електричного струму — так звані вихрові струми. Вони, своєю чергою, створять власні змінні магнітні поля. Таким чином, виникне два магнітних поля: зовнішнє магнітне поле й поле від вихрових струмів.

Приблизно половину часу в циклі, що триває $\frac{1}{60}$ секунди, ці два поля матимуть протилежний напрямок, і котушка відштовхуватиметься пластиною. В іншу половину часу магнітні поля матимуть однаковий напрямок, і котушка притягуватиметься до пластини. Я не вдаватимусь у подробиці, через безліч нюансів і складну технічну термінологію, але на котушку діє рівнодійна сила відштовхування, якої може бути достатньо, щоб вона піднялася в повітря. Це можна побачити на відео 19-ї лекції з курсу «8.02. Електрика й магнетизм»: cutt.ly/FwrxbMY. Експеримент починається приблизно на 44-й хвилині.

Якось я подумав, що було б непогано за допомогою цієї сили підняти в повітря людину, і вирішив, що на лекції зйому вгору жінку, як це роблять спритні фокусники-ілюзійністи: змайструю велетенську котушку, жіночка ляже зверху і злетить. Тож ми з Маркосом Ханкіном і Білом Сенфордом, моїми друзями із групи фізичних експериментів, довго працювали над тим, щоб отримати в котушці достатньо сильний струм, але в підсумку щоразу вибивало автомати. Тому ми зателефонували в технічний відділ МТІ і сказали, що нам потрібно, — струм на кілька тисяч амперів. Там розсміялися й відповіли: «Щоб забезпечити вам такий струм, нам доведеться перебудувати МТІ!». Дуже прикро, тому що мені вже написало багато жіночок, які хотіли б злетіти. Довелося надсилати їм листи із вибаченнями. Але нас це не зупинило, у чому ви можете переконатися, подивившись лекцію з приблизно 47-ї хвилини. Я дотримав обіцянку: просто жінка виявилася значно легшою, ніж я спершу планував.

Електромагнетизм поспішає на підмогу

Жінка, яка літає в повітрі, — це дуже непоганий (і веселий) демонстраційний експеримент, але магнітну левітацію можна застосувати в безліч іще дивовижніших і значно корисніших способів. Вона лежить в основі новітніх технологій, завдяки яким з'явилися деякі з найкрутіших, найшвидкісніших і найекологічніших транспортних засобів у світі.

Ви, мабуть, чули про швидкісні поїзди під назвою маглев. Чимало людей у незмірному захваті від них, бо вони поєднують магію невидимих магнітних сил із привабливим футуристичним дизайном,

та ще й рухаються надзвичайно швидко. Можливо, ви не знали, що слово «маглев» — це скорочення від «магнітна левітація». Але ви знаєте, що близько розташовані полюси магнітів або взаємно притягуються, або відштовхуються. Якщо придумати, як керувати цими силами притягання чи відштовхування, можна підняти потяг над дорожнім полотном, а потім тягнути або штовхати його на шаленій швидкості. Саме цей чудовий здогад покладено в основу маглева. В одному з його різновидів, поїзді на електромагнітній підвісці (ця технологія відома як EMS), електромагніти піднімають його за рахунок сили магнітного притягання. Від поїзда вниз тягнеться С-подібна опора, верхня частина якої прикріплена до поїзда, а на нижній частині, нижче дорожнього полотна, на поверхні розташовані магніти, які піднімають поїзд до рейок, виготовлених із феромагнітного матеріалу.

Щоб поїзд не «чіплявся» за рейки, а також щоб керувати непостійною за своєю природою силою притягання, потрібна складна система датчиків, яка дозволяє утримувати поїзд на потрібній висоті від рейок — а це менше двох сантиметрів! Рухається потяг завдяки окремій системі електромагнітів, які синхронізовано вмикаються й вимикаються, «тягнути» його вперед.

Інший основний тип магнітної підвіски, відомий як електродинамічна підвіска (або EDS), працює за рахунок сили відштовхування; у ньому використовуються так звані надпровідні магніти. Надпровідник — це матеріал, який за дуже низьких температур не має електричного опору. У результаті сильно охолоджена котушка, виготовлена з надпровідника, створює потужне магнітне поле, споживаючи при цьому дуже мало електричної енергії. Ще більше вражає те, що надпровідний магніт може діяти як магнітна пастка. Якщо до нього наблизити інший магніт, взаємодія сили тяжіння і провідника утримуватиме його на певній відстані. У результаті поїзди, у яких використовують надпровідники, працюють значно стабільніше, ніж системи EMS. Якщо ви спробуєте притиснути надпровідник до магніту або розташувати їх подалі, то побачите, що це досить важко зробити. Вони прагнуть зберегти відстань між собою. (Тут можна переглянути чудове коротеньке відео, що демонструє взаємодію між магнітом і надпровідником: cutt.ly/StLtXE).

Якщо потяг, до днища якого прикріплено магніти, занадто наблизиться до оснащеної надпровідниками колії, сила відштовхування зростає й він підніметься. Якщо поїзд надто віддаляється, сила тяжіння повертає його назад до колії. У результаті вагони зависають у положенні рівноваги. Рух поїзда вперед, який відбувається переважно за рахунок сили відштовхування, простіший, ніж у системах EMS.

Ці технології мають переваги й недоліки, але обидві майже усувають проблему із тертям звичайних залізничних коліс об колію, — основна складова зношування — водночас обидві системи забезпечують значно плавніший, безшумніший і найголовніше *швидший* рух. (Утім усе ще залишається проблема опору повітря, який стрімко зростає разом зі швидкістю потяга. Саме тому вони мають таку аеродинамічну обтічну форму). Шанхайський маглев, який працює на електромагнітній підвісці та почав курсувати у 2004 році, приблизно за вісім хвилин долає 30 кілометрів від міста до аеропорту на середній швидкості (станом на 2008 рік) 223–251 кілометр за годину, хоча його максимальна швидкість — 431 кілометр за годину, більше, ніж будь-якого іншого швидкісного потяга у світі. Тут ви можете переглянути коротеньке відео про Шанхайський маглев, створене його виробниками: cutt.ly/TtLt0X. А рекорд швидкості для поїзда на магнітній подушці було зафіксовано на випробній трасі в Японії, де поїзд JR-Maglev розігнався до 580 кілометрів за годину. На японський поїзд можна подивитися тут: cutt.ly/MtLt4f.

На YouTube викладено безліч смішних та інформативних відео, присвячених магнітній левітації. На одному з них хлопчик підвішує в повітрі олівець, що крутиться, за допомогою шести магнітів і шматочків пластиліну, і цей експеримент легко повторити вдома: cutt.ly/MtLyiJ. Також перегляньте відео, в якому відтворено конструкцію з надпровідниками: по круговій колії носить вагон іграшкового потяга, а в кінці навіть є коротка анімована частина з поясненнями: cutt.ly/atLygL.

Проте найбільше мені подобається демонструвати магнітну левітацію за допомогою чудової маленької дзиги, відомої як левітрон. Різні її версії можна побачити на сайті levitron.com. У мене в кабінеті є одна з перших моделей, яка вже принесла радість сотням відвідувачів.

Поїзди на магнітній подушці мають незаперечну екологічну перевагу — вони відносно ефективно використовують електрику й не виділяють парникових газів. Але їх використання потребує величезних коштів. Оскільки більшість колій для маглевів не сумісні зі звичайними залізничними полотнами, будівництво цих систем вимагає значних первинних капіталовкладень, і це поки що є перешкодою для їхнього повсюдного комерційного використання. Попри це нам конче потрібно створити нові системи громадського транспорту, ефективніші й екологічно чистіші за нинішні, якщо ми не хочемо, щоб наша планета зварилася.

Визначне досягнення Максвелла

Багато фізиків вважають Джеймса Клерка Максвелла одним з найславетніших фізиків в історії, який, можливо, поступається лише Ньютону й Ейнштейну. Він зробив внесок у цілу низку галузей фізики: від аналізу кілець Сатурна до вивчення поведінки газів, термодинаміки й теорії кольору. Але найблисучіше його досягнення — чотири рівняння, сьогодні відомі як рівняння Максвелла, що описують і пов'язують електричні й магнітні явища. Хоча ці рівняння здаються простими на вигляд, за ними стоїть досить складна математика. Якщо ви впевнено почуваетесь з інтегралами й диференціальними рівняннями, будь ласка, перегляньте мої лекції або почитайте про рівняння Максвелла в інтернеті. А я в цій книжці поясню простішими словами, що зробив Максвелл.

Перш за все, Максвелл об'єднав теорію електричного й магнітного полів, показавши, що вони є різними виявами єдиного поля — електромагнітного. За винятком одного дуже важливого моменту рівняння Максвелла не є його «законами» або відкриттями; у тій чи іншій формі вони існували до того. Проте заслуга Максвелла полягає в тому, що він звів їх разом, створивши так звану теорію електромагнітного поля.

Перше рівняння — це закон Гауса для електричного поля, який пояснює зв'язок між електричними зарядами і силою та поширенням електричного поля, яке вони створюють. Друге рівняння, закон Гауса для магнітного поля, найпростіше із чотирьох, і з нього випливає

одразу кілька речей. Згідно із цим законом, не існує магнітних монополів. У магнітів завжди є північний і південний полюси (ми називаємо їх диполями), на відміну від електричних явищ, де можливі монополі (монополь — це позитивно або негативно заряджена частинка). Якщо ви розламаєте один зі своїх магнітів (у мене їх чимало на холодильнику) на два шматки, кожний матиме північний і південний полюси, і якщо ви переламаєте магніт на 10 000 шматочків, кожен з них так само матиме два полюси. Не існує жодного способу, щоб в одній руці був північний полюс магніту, а в другій — південний. Утім якщо у вас є наелектризоване тіло (наприклад, позитивно заряджене) й ви розділите його на дві частини, то обидві можуть бути заряджені позитивно.

Потім стає ще цікавіше. Третє рівняння — це закон Фарадея, що описує, як змінне магнітне поле створює електричне поле. Як ви бачите, це рівняння є теоретичним підґрунтям для електричних генераторів, про які я розповідав раніше. Четверте рівняння — це закон Ампера, в який Максвелл додав важливе уточнення. У початковій версії закон Ампера стверджував, що електричний струм створює магнітне поле. Опрацювавши його, Максвелл доповнив: змінне електричне поле створює магнітне поле.

Граючись із цими рівняннями, Максвелл передбачив існування електромагнітних хвиль, що поширюються в порожнечі. Крім того, йому навіть вдалося обчислити швидкість цих хвиль. Результат був приголомшливим — їхня швидкість дорівнювала швидкості світла. І він дійшов висновку, що світло, напевно, і є електромагнітними хвилями.

Ампер, Фарадей і Максвелл знали, що перебувають на межі величезного перевороту в науці. Уже століття тривали серйозні дослідження й спроби зрозуміти електричні явища, а ці хлопці постійно робили одне відкриття за іншим. Мені часом цікаво, чи спали вони ночами?

Рівняння Максвелла, що в 1861 році об'єднали такі важливі явища, без перебільшень стали найвеличнішим досягненням фізики XIX століття, і, безумовно, всієї фізики між Ньютоном і Ейнштейном. І як і всі глибокі відкриття, вони вказали шлях для подальших спроб об'єднати фундаментальні наукові теорії.

Від часів Максвелла фізики докладали титанічних зусиль, намагаючись створити теорію, яка б поєднала чотири типи фундаментальних взаємодій: електромагнітну, сильну, слабку та гравітаційну. Альберт Ейнштейн останні тридцять років свого життя присвятив спробам об'єднати електромагнетизм і гравітацію в так званій єдиній теорії поля, що йому так і не вдалося.

Намагання створити єдину теорію не припиняються. У 1979 році Абдус Салам, Шелдон Глешоу та Стівен Вайнберг отримали Нобелівську премію із фізики за об'єднання електромагнітної й слабкої взаємодії в електрослабку взаємодію. Зараз багато фізиків намагаються об'єднати електрослабку й сильну взаємодію в межах так званої теорії великого об'єднання, або скорочено ТВО. Об'єднання на такому рівні стало б приголомшливим досягненням, нарівні з досягненням Максвелла. І якщо хтось десь колись зможе об'єднати гравітаційну взаємодію з ТВО і створити те, що більшість називає теорією всього, — це буде найсвятіший зі Святих Граалів у фізиці. Єдина теорія — це мрія, що захоплює багатьох.

Саме тому, коли під час курсу «Електрика й магнетизм» ми нарешті бачимо рівняння Максвелла в усій їхній красі й простоті, я відображаю їх по всій аудиторії за допомогою проектора і дарую квіти студентам, щоб відсвяткувати цей важливий етап. Якщо ви зможете витримати інтригу, то більше дізнаєтеся про це в розділі 15.

Розділ 9

Збереження енергії — нічого не змінюється

В одному зі своїх найпопулярніших експериментів, який я демонстрував студентам упродовж багатьох років, я ризикував життям, підставляючи голову під кулю-молот¹⁵ — щоправда, зменшену версію, але запевняю, що вона легко могла б мене вбити. Ці кулі можуть важити приблизно тонну, тоді як моя важить 15 кілограмів. Стоячи в одному кінці аудиторії, притуливши голову до стіни, я тримаю в руках кулю близько до підборіддя. Я маю бути надзвичайно обережним, щоб не надати ані найменшого поштовху, не доклавши навіть крихти зусилля. Будь-який поштовх може призвести до мого травмування — або, як я казав, навіть убити. Я прошу студентів не відволікати мене, не галасувати й навіть на деякий час затамувати подих. Інакше, кажу я, ця лекція може бути останньою в моєму житті.

Мушу визнати, що під час цього експерименту я щоразу відчуваю потужний приплив адреналіну, коли куля, повертаючись, летить на мене. Хоч я цілком упевнений, що фізика мене врятує, але завжди дуже нервуюся, коли стою на шляху кулі, що мчить за кілька міліметрів від мого підборіддя. Я мимоволі зціплюю зуби. І якщо чесно, я завжди заплющую очі. Ви можете спитати: що змушує мене раз у раз проводити такі досліди? Моя цілковита віра в одне з найважливіших понять у всій фізиці — закон збереження енергії.

Наш світ має таку дивовижну особливість, що один вид енергії може перетворюватися в інший, а потім ще і ще в інакший, і навіть повертатися до початкового стану. Енергія може трансформуватися, але ніколи нікуди не зникає й не з'являється нізвідки. Насправді таке перетворення відбувається постійно. Усі цивілізації, не тільки наша, а й найменш технологічно розвинені, залежать від цього процесу в найрізноманітніших виявах. Найочевидніший приклад — наше харчування. Хімічна енергія їжі, яка міститься насамперед у вуглеці, перетворюється на сполуку під назвою аденозинтрифосфат (АТФ), що запасає енергію, яку наші клітини можуть використовувати в різних процесах. Те саме ми спостерігаємо, коли розпалюємо багаття,

перетворюючи хімічну енергію, що зберігається в дереві або деревному вугіллі (вуглець з'єднується із киснем), на тепло й вуглекислий газ.

Саме це змушує випущену з лука стрілу летіти в повітрі, перетворюючи потенціальну енергію, яка зростає, коли ви напинаєте тятиву, на кінетичну енергію, що рухає стрілу вперед. У вогнепальній зброї хімічна енергія пороху перетворюється в кінетичну енергію швидко розширюваного газу, який виштовхує кулю зі ствола. А коли ви їдете на велосипеді, енергія, що змушує крутитися педалі, зароджується як хімічна енергія вашого сніданку або обіду, яку ваше тіло перетворює на іншу форму хімічної енергії (АТФ). Потім ваші м'язи використовують її, перетворюючи частину її на механічну енергію, щоб скорочуватися й розслаблятися, і завдяки цьому ви крутите педалі. Коли ви повертаєте в машині ключ запалювання, хімічна енергія, що міститься в акумуляторі, перетворюється на електричну. Частина її потрапляє в циліндри, де запалює суміш бензину, і внаслідок його згоряння вивільняється хімічна енергія, яка потім перетворюється на тепло, що збільшує тиск газу в циліндрі, який, своєю чергою, виштовхує поршні. Вони обертають колінчастий вал, і трансмісія передає енергію колесам, змушуючи їх крутитися. Завдяки цьому цікавому процесу хімічна енергія бензину дозволяє нам пересуватися в автомобілях.

У гібридних автомобілях частково цей процес відбувається в протилежному напрямку. Коли ви тиснете на гальма, частина кінетичної енергії машини трансформується в електричну, що зберігається в акумуляторі й може жити електродвигун. У печі на рідкому паливі хімічна енергія нафти перетворюється на тепло, що нагріває в опалювальній системі воду, яка за допомогою насосів надходить у радіатори. У неонових лампах кінетична енергія електричних зарядів, що рухаються через наповнену газом трубку, перетворюється на видиме світло.

Здається, цьому переліку немає кінця. В атомних реакторах ядерна енергія, що міститься в ядрах урану чи плутонію, переходить у тепло; воно перетворює воду на пару, яка обертає турбіни, що виробляють електроенергію. Хімічна енергія, що наявна у викопному паливі — не лише в нафті й бензині, а й у вугіллі і природному газі, —

перетворюється на тепло і, якщо говорити про електростанцію, врешті-решт на електроенергію.

Ви можете на власні очі спостерігати дива перетворення енергії, виготовивши акумулятор. Їх існує сила-силенна: від тих, що встановлені у вашому традиційному або гібридному авто, до тих, які живлять вашу бездротову мишку або мобільний телефон. Неймовірно, але батарейку можна зробити із картоплини, мідної монети, оцинкованого цвяха і двох шматків мідного дроту (кожен завдовжки приблизно 15 сантиметрів, з обох кінців потрібно зняти ізоляцію десь на сантиметр). З одного боку картоплини встроміть цвях майже до кінця, а з другого боку зробіть надріз і вставте монету. Притулите кінець одного дроту до цвяха (чи обмотайте навколо його головки), а кінець другого дроту — до монети або заведіть його в розріз так, щоб він дотикався до неї. Потім торкніться вільними кінцями дротів до виводів контакту ялинкової гірлянди. Вона має заблискати. Мої вітання! На YouTube можна побачити демонстрації десятків таких пристроїв — чом би не спробувати?

Безперечно, процеси перетворення енергії відбуваються навколо нас постійно, але деякі з них очевидні, а деякі — ні. Найнеочевиднішим є перетворення гравітаційної потенціальної енергії. Ми зазвичай вважаємо, що нерухомі тіла не мають енергії, але насправді це не так. У деяких випадках ця енергія є досить значною. Сила тяжіння постійно діє на тіла, притягуючи їх до центра Землі, тому будь-яке тіло, яке ви кинете з певної висоти, летітиме із прискоренням. У процесі воно втрачатиме гравітаційну потенціальну енергію, але набуватиме кінетичної — енергія нікуди не зникає й не з'являється нізвідки; це гра з нульовою сумою! Якщо тіло масою m падає вертикально вниз із висоти h , його потенціальна енергія зменшується на величину mgh (g — це прискорення вільного падіння, що приблизно дорівнює 9,8 метра на секунду у квадраті), але на стільки само зростає його кінетична енергія. Якщо ви піднімете тіло вгору по вертикалі на висоту h , його потенціальна енергія зросте на величину mgh , і цю енергію доведеться створити вам (інакше кажучи, виконати роботу).

Скажімо, на висоті 2 метри від підлоги на полиці стоїть книжка масою 1 кілограм. Коли вона впаде, її потенціальна енергія зменшиться

на $1 \cdot 9,8 \cdot 2 = 19,6$ джоуля, але її кінетична енергія буде 19,6 джоуля на момент приземлення.

Мені дуже подобається термін *гравітаційна потенціальна енергія*. Погляньмо на це так. Якщо я підніму книжку з підлоги й поставлю на полицю, то витрачу на це 19,6 джоуля своєї енергії. Чи втрачається ця енергія? *Ні!* Тепер, коли книжка знову на висоті 2 метри над підлогою, вона має «потенціал» для повернення цієї енергії мені у вигляді кінетичної енергії в будь-який момент, коли я знову скину її на підлогу, чи то завтра, чи наступного року! Що вище над рівнем підлоги перебуватиме книжка, то більший у неї «потенціал» енергії, але, звісно, щоб покласти книжку вище, мені доведеться внести додаткову енергію.

Аналогічно, щоб вистрілити з лука, потрібно натягнути тятиву. Ця енергія міститься в луку й «потенційно» може бути використана в будь-який момент, коли ми вирішимо перетворити потенціальну енергію на кінетичну, яка і надасть стрілі швидкості.

А тепер погляньте на простеньке рівняння, за допомогою якого я продемонструю вам одну дивовижну річ. Якщо вам вистачить снаги здійснити кілька обчислень, то ви побачите, чому був вдалим найвідоміший (не)експеримент Галілея. Як ви пам'ятаєте, він начебто скидав із Пізанської вежі кулі різної маси (а отже, різної ваги), щоб показати, що швидкість їхнього падіння не залежить від маси. Із законів Ньютона випливає, що кінетична енергія (E_k) рухомого тіла пропорційна його масі та квадрату швидкості. Це можна записати так: $E_k = \frac{1}{2}mv^2$. І оскільки ми знаємо, що гравітаційна потенціальна енергія тіла перетворюється на кінетичну, то можемо сказати, що mgh дорівнює $\frac{1}{2}mv^2$, і ми отримуємо таке рівняння: $mgh = \frac{1}{2}mv^2$. Якщо поділити обидві частини рівняння на m , то ця змінна зникне з рівняння, і в нас залишиться $gh = \frac{1}{2}v^2$. Потім, щоб позбутися дроби, помножимо обидві частини рівняння на 2, й отримаємо $2gh = v^2$. Це означає, що швидкість v , яка й цікавила Галілея, дорівнює квадратному кореню з $2gh$ ¹⁶. Зверніть увагу, маса взагалі зникла із формули! Отже, швидкість не залежить від маси. Наведу конкретний приклад. Якщо кинути камінь (будь-якої маси) з висоти 100 метрів, за відсутності опору повітря його швидкість на момент приземлення становитиме приблизно 45 метрів за секунду, або 160 кілометрів за годину.

Уявіть камінь (будь-якої маси), що падає на Землю з висоти кілька сотень тисяч кілометрів. На якій швидкості він увійде в земну атмосферу? На жаль, ми не можемо в цьому випадку скористатися нашим простеньким рівнянням, за яким швидкість становить квадратний корінь з $2gh$, тому що прискорення вільного падіння сильно залежить від відстані до Землі. На відстані як до Місяця (приблизно 384 400 кілометрів) прискорення вільного падіння, спричинене впливом Землі, приблизно в 3600 разів менше, ніж біля земної поверхні. Я не наводитиму тут складних розрахунків, просто повірте на слово, що швидкість каменя буде приблизно 40 000 кілометрів за годину!

Тепер ви, можливо, зрозуміли, яке значення в астрономії має гравітаційна потенціальна енергія. Як я розповідатиму в розділі 13, матерія, що падає з великої відстані на нейтронну зорю, врізається в неї на швидкості орієнтовно 160 000 кілометрів за секунду, так, за секунду! Кінетична енергія каменя масою лише 1 кілограм становила б приблизно 13 квадрильйонів ($13 \cdot 10^{15}$) джоулів, що відповідає енергії, яку велика електростанція (1000 МВт) виробляє за півроку.

Уже сам факт, що різні види енергії можуть переходити один в одного, а потім знову повертатися до початкового стану, викликає подив. Але ще більше захоплює те, що загалом енергія ніколи не втрачається. Ніколи. Дивовижно! Саме тому важка куля ще досі мене не вбила.

Підтягуючи 15-кілограмову кулю до підборіддя вертикально на висоту h , я збільшую її потенціальну енергію на mgh . Коли я відпускаю її, вона під дією сили тяжіння починає розгойдуватися, і mgh перетворюється на кінетичну енергію. Тут h — відстань по вертикалі між моїм підборіддям і найнижчим положенням кулі на кінці мотузки. Коли вона доходить до найнижчої точки, її кінетична енергія становить mgh . Коли куля сягає кінця дуги й опиняється в найвищій її точці, кінетична енергія знову перетворюється в потенціальну — саме тому на вершечку своєї траєкторії куля на мить зупиняється. Без кінетичної енергії немає руху. Але це лише на мить, тому що потім куля знову рухається вниз, розгойдуючись у протилежному напрямку, й потенціальна енергія знову перетворюється на кінетичну. Суму кінетичної та потенціальної енергії називають повною механічною

енергією, і за відсутності тертя (в нашому випадку — опору повітря) повна механічна енергія не змінюється, тобто зберігається.

Це означає, що куля не зможе долетіти вище конкретної точки, з якої її відпустили, — за умови, якщо їй на шляху не надали додаткової енергії. Отже, опір повітря — це моя подушка безпеки. Він забирає *дуже* незначну кількість механічної енергії маятника, що перетворюється на тепло. У результаті куля зупиняється лише за кілька міліметрів від мого підборіддя, як ви можете побачити на відео 11-ї лекції курсу 8.01 «Класична механіка». С'юзан тричі спостерігала за цим експериментом — і щоразу тремтіла. Якось мене запитали, чи багато я тренувався, і я завжди кажу чесно: мені не потрібна практика, бо я стовідсотково довіряю закону збереження енергії.

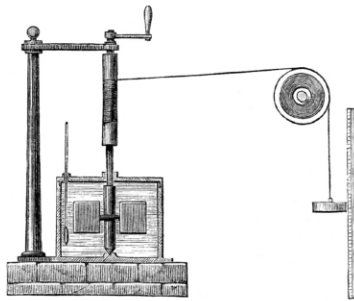
Але якби я легесенько підштовхнув кулю, відпускаючи її, — наприклад, ненароком кашлянув саме в той момент, — вона повернулася б не туди, де я її відпустив, а трохи вище і врзалася б у моє підборіддя.

Закон збереження енергії був відкритий завдяки сину англійського броваря, який жив у XIX столітті, Джеймсу Джоулю. Дослідження цього вченого були такими важливими для розуміння природи енергії, що на його честь названо міжнародну одиницю вимірювання енергії. Батько віддав його із братом у навчання до ушавленого вченого-експериментатора Джона Дальтона. Джоуль добре навчався в Дальтона. У підвалі успадкованої батькової броварні він здійснив безліч новаторських експериментів, оригінально вивчаючи електрику, тепло й механічну енергію. Одне з його відкриттів — нагрівання провідника від електричного струму. Він виявив це, коли занурив у банки з водою котушки з різних видів металу, через які проходив струм, і виміряв зміну її температури.

Джоуль зрозумів дуже важливу річ: тепло — це форма енергії, і це суперечило вже давно й повсюдно поширеним поглядам. До цього вважали, що тепло — це різновид флюїду (невагомої речовини), який називали *теплецем*¹⁷, і що воно перетікає з місць з високою концентрацією в місця з низькою концентрацією і його не можна ні створити, ні знищити. Проте Джоуль помітив, що в більшості випадків тепло виділяється, і він припустив, що воно має іншу природу. Наприклад, досліджуючи водоспади, він установив, що вода внизу

тепліша, ніж у верхній частині, і дійшов висновку, що різниця гравітаційної потенціальної енергії між верхньою і нижньою частиною водоспаду перетворюється на тепло. Також він помітив, що коли гребне колесо б'є по воді (дуже відомий його дослід), її температура зростає; у 1881 році він отримав надзвичайно точні показники перетворення кінетичної енергії гребного колеса на тепло.

Для цього досліду Джоуль помістив у ємність із водою крильчатку, яка з'єднувалася із блоком за допомогою шківів і мотузки, на якій було підвішено тягарець. Коли він опускався, мотузка обертала вал лопатей, які перемішували воду в ємності. Якщо вжити наукову термінологію, Джоуль опускав масу m на відстань h . Потенціальна енергія зменшувалася на величину mgh , і пристрій перетворював її на обертальну (кінетичну) енергію лопатей, що, своєю чергою, нагрівала воду. Ось зображення цього пристрою:



Цінність досліду в тому, що Джоуль зміг точно обчислити кількість енергії, що передається воді, і вона дорівнювала mgh . Тягарець опускався повільно, оскільки вода не дозволяла лопатям обертатися швидко. Тому він падав на підлогу з дуже незначною кількістю кінетичної енергії. А отже, уся гравітаційна потенціальна енергія передавалася воді.

Що таке джоуль? Якщо скинути тіло масою 1 кілограм з висоти 0,1 метра, його кінетична енергія збільшиться на mgh , що приблизно становить 1 джоуль. Здається, що це небагато, але кількість джоулів може досить швидко накопичуватися. Щоб бейсбольний м'яч летів зі швидкістю трохи меншою за 160 кілометрів за годину, пітчеру Вищої бейсбольної ліги потрібно витратити приблизно 140 джоулів енергії — десь стільки само, як і для того, щоб підняти на один метр мішок зі 140 стограмовими яблуками¹⁸.

Сто сорок джоулів кінетичної енергії достатньо для того, щоб убити людину, якщо вона вивільняється швидко й спрямована концентровано. Якщо розподілити її на годину чи дві, ніхто нічого навіть не помітить. І якщо ці джоулі вивільнялися, поки вас гамселили подушкою, вас би не вбили. А якщо цю енергію сконцентрувати, наприклад, у кулі, камені чи бейсбольному м'ячі, і втиснути в крихітну частку секунди? Погодьтеся, це зовсім інша річ.

Що знову повертає нас до кулі-молота. Припустімо, у вас є куля масою 1000 кілограмів, яку ви відпускаєте вертикально з висоти 5 метрів. Під час цього 50 000 джоулів потенціальної енергії ($mgh = 1000 \cdot 10 \cdot 5$) перетворюється на кінетичну. Це чималий удар, особливо якщо ця енергія вивільняється за дуже короткий відтинок часу. За допомогою рівняння для кінетичної енергії ми також можемо визначити швидкість. У нижній частині траєкторії куля рухатиметься зі швидкістю 10 метрів за секунду (приблизно 36 кілометрів за годину), що доволі швидко для однотонної кулі. Щоб побачити цю енергію в дії, ви можете переглянути одне неймовірне відео в інтернеті. Ядро влучає в мінівен, що випадково заїхав на будівельний майданчик на Мангеттені, і відкидає його, наче іграшку: lionsdenu.com/wrecking-ball-vs-dodge-mini-van.

Скільки калорій нам потрібно?

Щоб краще оцінити дивовижні перетворення енергії, завдяки яким існує наша цивілізація, розгляньмо, скільки енергії виробляється під час найосновніших процесів нашої життєдіяльності. Подумайте, наприклад, над тим, що за один день людське тіло виробляє приблизно 10 мільйонів джоулів теплоти. Якщо у вас немає жару, ваше тіло підтримує температуру приблизно 37 градусів за Цельсієм та виділяє тепло у вигляді інфрачервоного випромінювання, майже 100 джоулів щосекунди, тобто якщо грубо округлити, орієнтовно 10 мільйонів джоулів за день. Проте ця енергія залежить від температури повітря й антропометричних даних людини. Що більша людина, то більше енергії вона виділяє. Цей потік можна порівняти з енергією, яку випромінює лампочка. Один джоуль, спожитий за секунду, відповідає одному ваті, отже, 100 джоулів за секунду дорівнює 100 ватам, тобто в

середньому людина випромінює енергію приблизно на такому само рівні, як лампочка потужністю 100 ват. Ви не розжарюєтесь, як лампочка, тому що ваше тепло розподіляється на значно більшу площу. До речі, потужність електричної ковдри лише 50 ват, тож ви, мабуть, зрозуміли, чому взимку замість того, щоб укриватися нею, краще, аби поряд з вами спала інша людина.

Існують десятки одиниць для вимірювання енергії: для кондиціонерів — британська теплова одиниця, для електроенергії — кіловат-година, в атомній фізиці — електрон-вольт, в астрономії — ерг. Британська теплова одиниця приблизно дорівнює 1055 джоулів, кіловат-година відповідає $3,6 \cdot 10^6$ джоулям, електрон-вольт — це $1,6 \cdot 10^{-19}$ джоулів, 1 ерг дорівнює 10^{-7} джоулів. І всі ми знайомі з такою важливою одиницею енергії, як калорія. Вона дорівнює приблизно 4,2 джоуля. Таким чином, якщо наше тіло щодня виробляє орієнтовно 10 мільйонів джоулів енергії, ми витрачаємо трохи більше 2 мільйонів калорій. Але як таке можливо? Нам потрібно споживати приблизно 2000 калорій у день. Утім коли виробники зазначають на упаковці харчових продуктів *калорія*, насправді мають на увазі *кілокалорію*, тобто тисячу калорій. Калорія — дуже малюсінька одиниця: це кількість енергії, що необхідна для нагрівання 1 грама води на 1 градус за Цельсієм. Таким чином, щоб випромінювати 10 мільйонів джоулів енергії, потрібно отримувати з їжею приблизно 2400 кілокалорій на день. А якщо ви споживаєте значно більше — рано чи пізно за це доведеться поплатитися фігурою. Математика невблаганна, і більшість з нас, знаючи це, намагається ігнорувати цей факт.

А як щодо нашої фізичної активності впродовж дня? Для цього нам теж потрібна додаткова енергія? Наприклад, ходити по сходах або займатися хатніми справами? Хатня робота може бути виснажливою, і ми, напевно, витрачаємо на неї чимало енергії? Що ж, боюсь, я вас неприємно здивую. На повсякденні справи потрібна така сміховинна кількість енергії, що ви можете не зважати на неї, коли рахуєте витрачені калорії, хіба що ви дуже інтенсивно тренуєтесь у спортзалі.

Припустімо, замість поїхати у ліфті, ви піднімаєтесь у свій офіс, що на четвертому поверсі, сходами. Дуже багато моїх знайомих пишаються собою, коли ходять пішки сходами, але рахуйте самі. Скажімо, висота цих трьох поверхів приблизно 10 метрів, і ви

піднімаєтеся сходами тричі на день. Я вас не знаю, тому нехай ваша маса буде 70 кілограмів. Скільки енергії потрібно, щоб тричі піднятися цими сходами? Щоб мати привід ще більше сповнитися гордоців — як щодо п'яти разів на день? Припустімо, ви дуже стараєтеся. П'ять разів у день піднятися пішки на третій поверх. Вам доведеться витратити енергію, що дорівнює mgh , де h — різниця у висоті між першим і четвертим поверхами. Помножимо 70 кілограмів (m) на 10 метрів за секунду у квадраті (g), на 10 метрів (h) і на 5, тому що ви робите це п'ять разів на день, і ось що ми отримуємо — 35 000 джоулів. Порівняйте це з *10 мільйонами* джоулів теплоти, які щодня випромінює ваше тіло. Думаєте, вам треба їсти трохи більше заради якихось 35 000 джоулів? Забудьте. Це ніщо — лише третина відсотка від загальної кількості вашої енергії. Але цей факт аніскілечки не заважає маркетологам розповідати абсурдні речі про нові гаджети для спалювання калорій. Сьогодні вранці я, відкривши каталог товарів, що надсилаються поштою, де пропонують дорогі пристрої, побачив рекламу «обтяженого одягу», який дає змогу «спалювати більше калорій, роблячи повсякденні справи». Можливо, вам сподобається відчувати додаткову важкість ваших рук і ніг (хоча мені не зрозуміло чому), і ви таким чином зможете наростити м'язи, але не розраховуйте суттєво скинути вагу, завдаючи собі таких мук!

Спостережливий читач, звісно, зауважить, що неможливо п'ять разів на день піднятися сходами, не спускаючись ними. Коли ви сходите вниз, ці 35 000 джоулів вивільняться у вигляді тепла у ваші м'язи, взуття й підлогу. Якби ви зістрибнули, уся гравітаційна потенціальна енергія, яку ви накопичили, поки піднімалися сходами, перетворилася б на кінетичну енергію вашого тіла — і ви, можливо, щось собі зламали б. Отже, хоч вам і довелося витратити 35 000 джоулів, щоб піднятися нагору, спускаючись униз, ви не зможете повернути їх у придатному для використання вигляді. Хіба що ви вдягнете на себе якийсь дуже хитрий пристрій, що забиратиме вашу кінетичну енергію й перетворюватиме її, скажімо, на електроенергію — точнісінько як у гібридних автомобілях.

Погляньмо на це інакше. Скажімо, ви розподілите ходіння сходами на 10 годин: можливо, раз чи двічі вранці, двічі після обіду й останній раз увечері. За ці 10 годин, тобто 36 000 секунд, ви виробите

приблизно 35 000 джоулів енергії. Це, по правді, до абсурду мало — приблизно 1 ват. Порівняйте цей результат із теплом, яке виділяє ваше тіло, — у середньому 100 джоулів за секунду, або 100 ватів. Отже, як ви бачите, піднімаючись сходами, ви спалюєте мізерно малу кількість енергії. Це аж ніяк не вплине на вашу талію.

А що, як ви підніметесь на гору заввишки півтора кілометра? Тоді вам доведеться додатково виробити й використати мільйон джоулів енергії. А мільйон порівняно з 10 мільйонами — не такий уже й жалюгідний. Після сходження ви, звичайно, зголоднієте, і тепер вам справді потрібно більше їжі. Якщо сходження тривало чотири години, ви розвивали значну потужність (потужність — це кількість джоулів за секунду), у середньому 70 ватів — упродовж цих чотирьох годин, звісно. І тепер ваше тіло надсилає в мозок виразний сигнал: «Мені потрібно більше їжі».

Можливо, ви подумаєте, що, витративши на 10 відсотків більше енергії порівняно зі своїми звичайними 10 мільйонами джоулів, вам доведеться з'їсти на 10 відсотків (тобто 240 кілокалорій) більше, ніж зазвичай, оскільки мільйон — це лише 10 відсотків від 10 мільйонів. Але це не зовсім так, як ви, мабуть, уже здогадалися. Вам доведеться з'їсти значно більше, ніж зазвичай, тому що система перетворення їжі на енергію в тілі, якщо висловлюватися фізичною термінологією, має не надто високий ККД. Максимальна ефективність — у середньому 40 відсотків. Саме так, максимум 40 відсотків від спожитих калорій перетворюється на енергію, яку ви можете використати. Решта розсіюється у вигляді тепла. Енергія залишається незмінною, тому її треба на щось витратити. Отже, щоб виробити додатково мільйон джоулів і підживити пристрасть до гірських походів, вам доведеться збільшити свій раціон приблизно на 600 кілокалорій, що рівноцінно додатковому прийому їжі.

Де взяти те, що нам потрібно?

Мене вражає, яку кількість енергії ми використовуємо у повсякденному житті. Припустімо, я вирішив прийняти ванну й хочу підрахувати, скільки енергії потрібно, щоб нагріти воду. Формула дуже проста: кількість енергії в кілокалоріях дорівнює добутку маси води в

кілограмах і різниці температури в градусах Цельсія. Ванна вміщує приблизно 100 кілограмів води, і якщо вважати, що температура зростає приблизно на 50 градусів за Цельсієм, то для гарячої ванни потрібно десь 5000 кілокалорій, або 20 мільйонів джоулів. Ванна — це чудово, але досить енерговитратно. Дивовижно, але в Сполучених Штатах ця енергія така дешева, що ванна коштуватиме вам лише півтора долара. Двісті років тому воду для ванни гріли дровами. У кілограмі дров міститься приблизно 15 мільйонів джоулів енергії, тому, щоб нагріти одну ванну, цієї кількості було б достатньо. Сучасні дров'яні котли мають ККД до 70 відсотків, тоді як на відкритому вогні або в пічках двохсотрічної давнини тепло перетворювалось менш ефективно, і це потребувало більше часу: щоб нагріти ті самі 100 літрів води, потрібно було десь 5–10 кілограмів дров. Не дивно, що наші предки приймали ванну значно рідше, ніж ми, і частенько в одній і тій самій воді милася вся родина.

Ось наведу ще трохи цифр, щоб ви відчули, скільки енергії використовують у побуті. Кімнатний обігрівач споживає орієнтовно 1000 ватів, тобто за годину ви витрачаєте приблизно 3,6 мільйона джоулів, або, якщо в звичних одиницях споживання електроенергії, 1 кіловат-годину. У холодному кліматі електрообігрівач може споживати до 2500 ватів. Віконний кондиціонер зазвичай споживає 1500 ватів, тоді як система централізованого кондиціонування — приблизно 5–20 кіловатів. За температури 180 градусів за Цельсієм електрична духовка використовує 2 кіловати, а посудомийна машина — приблизно 3,5 кіловата. Ще одне цікаве порівняння. Стаціонарний комп'ютер із 17-дюймовим монітором на електронно-променевій трубці споживає від 150 до 350 ватів, а у «сплячому» режимі — не більше 20 ватів. Найнижчі цифри — у радіогодинника, який споживає лише 4 вати. У лужній батарейці на 9 вольтів міститься приблизно 18 000 джоулів, або 5 ват-годин; від неї ваше радіо пропрацює трохи більше години.

Землю населяє понад 6,5 мільярда людей, і за рік ми використовуємо приблизно $5 \cdot 10^{20}$ джоулів енергії. Навіть через сорок років після нафтового ембарго ОПЕК 85 відсотків енергії ми отримуємо з викопного палива: вугілля, нафти й природного газу. На Сполучені Штати з населенням лише трохи більше ніж 300 мільйонів, що становить двадцятку частину населення планети, припадає п'ята

частина світового споживання енергії. Цієї проблеми уникнути неможливо: ми справжнісінькі енергетичні марнотратці. До речі, саме тому я невимовно зрадив, коли президент Обама призначив міністром енергетики нобелівського лауреата з фізики Стівена Чу. Якщо ми хочемо розв'язати енергетичні проблеми, потрібно враховувати фізику енергії.

Наприклад, зараз багато надій покладають на можливості сонячної енергетики, і я тільки за те, щоб активно її розвивати. Але тут ми стикаємося з обмеженнями, на які маємо зважати. Не викликає сумніву, що Сонце — чудове джерело енергії. Воно виробляє $4 \cdot 10^{26}$ ватів енергії (це $4 \cdot 10^{26}$ джоулів за секунду), здебільшого у вигляді видимого світла й інфрачервоного випромінювання. Знаючи відстань між Землею й Сонцем (150 мільйонів кілометрів), можна обчислити, яка частка цієї енергії досягає нашої планети. Це приблизно $1,7 \cdot 10^{17}$ ватів, або майже $5 \cdot 10^{24}$ джоулів за рік. Якщо спрямувати панель площею один квадратний метр точно на Сонце (за безхмарної погоди!), вона поглине приблизно 1200 ватів (я припустив, що 15 відсотків енергії, яка потраплятиме на панель, відіб'ється й розсіється в атмосфері). Для простоти можемо округлити це число до 1000 ватів (1 кіловата) на квадратний метр за умови спрямованості панелі *точно на Сонце* й за відсутності хмар.

Здавалось би, сонячна енергетика має колосальний потенціал. Щоб задовольнити світові потреби в енергії, вистачило б сонячних панелей площею приблизно $2 \cdot 10^{10}$ квадратних метрів. Це десь у п'ять разів більше за площу моєї батьківщини — Голландії, аж ніяк не найбільшої країни.

Утім усе не так просто. Є день і ніч, чого ми досі не враховували. Ми просто виходили з того, що Сонце світить постійно. І хмари коли-неколи насувають. І якщо ваші сонячні панелі зафіксовані жорстко, вони не можуть весь час бути спрямованими на Сонце. Також має значення, де саме на планеті їх розміщено. Країни біля екватора отримують більше енергії (усе-таки там спекотніше), ніж країни, розташовані північніше (у Північній півкулі) або південніше (у Південній півкулі).

Потрібно враховувати й ефективність установок, які поглинають сонячну енергію. Існує безліч різних технологій, і їхня кількість постійно зростає, але максимальний ККД силіцієвих сонячних

елементів (раціональніших порівняно з елементами, виготовленими з дорогих матеріалів) приблизно 18 відсотків. Якщо за допомогою сонячної енергії одразу нагрівати воду (не перетворюючи її спершу на електроенергію), ефективність буде значно вища. Для порівняння: котел на рідкому паливі, навіть не дуже сучасний, легко досягає ККД 75-80 відсотків. Таким чином, якщо брати до уваги ці обмежувальні чинники, нам радше знадобляться сонячні панелі площею трильйон квадратних метрів, що приблизно втричі більше за площу Німеччини. І це ми ще не враховували вартості побудови електростанцій, які поглинатимуть сонячну енергію та перетворюватимуть її на електроенергію. На цей момент отримувати електрику від Сонця приблизно вдвічі дорожче, ніж із викопного палива. Перехід на сонячну енергію не тільки коштуватиме неймовірних грошей — такий проект просто понад наші технологічні можливості чи політичну волю. Тому поки що сонячна енергетика відіграватиме дедалі більшу, але все-таки відносно незначну роль у світовій економіці.

З іншого боку, якщо почати просто зараз, то за наступні чотири десятиліття ми могли б досягти колосальних успіхів. За оцінками Грінпіс та Міжнародної енергетичної агенції (станом на 2009 рік), за значного державного фінансування сонячна енергетика могла б покрити «до 7 відсотків світових енергетичних потреб до 2030 року та їхню чверть до 2050 року». Кілька років тому в журналі *Scientific American* стверджували, що впровадження прискореної програми в цій галузі та субсидювання на понад 400 мільярдів доларів протягом наступних сорока років може привести до того, що сонячна енергія забезпечуватиме 69 відсотків потреб Сполучених Штатів в електроенергії та 35 відсотків загальних потреб в енергії.

А як щодо енергії вітру? Усе-таки людство використовує цю енергію ще від часів винайдення паруса. Вітряки з'явилися задовго до електрогенераторів, можливо, навіть за тисячу років до них. І принцип отримання енергії від природи й перетворення її в інший вид, яким людина могла скористатися, був усюди однаковим — чи то в Китаї в XIII столітті, чи ще раніше в Ірані, чи у XII столітті в Європі. Скрізь вітряки полегшували людям важку роботу: піднімали воду для пиття або поливу полів чи перемелювали між величезними каменями зерно

на борошно. Вітряк працює від енергії вітру, незалежно від того, виробляє він електрику чи ні.

Як джерело електроенергії енергія вітру легкодоступна, повністю відновлювана і не спричиняє викидів парникового газу. У 2009 році вітроелектростанції по всьому світу виробили 340 терават-годин (одна терават-година — це мільярд кіловат-годин), що становить приблизно 2 відсотки світового споживання електроенергії. І ця галузь швидко зростає: за останні три роки кількість електроенергії, отриманої від вітру, подвоїлася.

А що з атомною енергією? Вона значно поширеніша, ніж більшість із нас уявляє. Насправді вона оточує нас усюди. Віконні шибки містять радіоактивний калій-40, період піврозпаду якого 1,2 мільярда років, і енергія, що вивільняється при цьому, нагріває ядро Землі. Весь гелій в атмосфері — результат радіоактивного розпаду природних ізотопів. Те, що ми називаємо альфа-розпадом, насправді є випромінюванням ядра гелію з більшого нестабільного ядра.

Я зібрав величезну колекцію дуже особливого столового посуду — тарілки, миски, блюдця, чашки — американської марки Fiesta, який почали випускати ще в 1930-ті. Я люблю приносити кілька із цих тарілок на лекції та показувати студентам. Зокрема, оранжеві тарілки під назвою Fiesta red містять оксид урану, який раніше часто був складником керамічної глазурі. Я підношу до тарілки лічильник Гейгера, і він починає швидко пікати. Отже, уран, що міститься в тарілці, радіоактивний і випромінює гамма-промені. Після цієї демонстрації я завжди запрошую студентів до себе на вечерю, але, хоч як дивно, охочих не було ще жодного разу.

Під час розщеплення важких ядер вивільняється велика кількість енергії — як в атомному реакторі, де відбуваються керовані ланцюгові реакції перетворення ядер урану-235, так і в атомній бомбі, де реакції некеровані і призводять до колосальних руйнувань. Атомна електростанція, що за секунду виробляє мільярд джоулів енергії (10^9 ватів, або 1000 мегаватів), використовує за рік приблизно 10^{27} ядер урану-235, тобто лише 400 кілограмів цієї радіоактивної речовини.

Проте у природному урані вміст урану-235 становить 0,7 відсотка (решта — це уран-238). Тому на атомних електростанціях використовують *збагачений* уран. Ступінь збагачення різниться, але

зазвичай становить 5 відсотків. Це означає, що вміст урану-235 у паливних стрижнях уже не 0,7 відсотка, а 5 відсотків. Таким чином, ядерний реактор потужністю 1000 мегаватів за рік споживатиме приблизно 8 тонн урану, з яких 400 кілограмів припадає на уран-235. Для порівняння — аналогічна електростанція, що працює на викопному паливі, спалює приблизно 5 мільйонів тонн вугілля за рік.

Збагачувати уран надзвичайно дорого. Роблять це за допомогою тисяч центрифуг. Уран, з якого виготовляють ядерну зброю, має містити мінімум 85 відсотків урану-235. Можливо, тепер ви розумієте, чому світ дуже непокоїться через країни, що збагачують уран до невизначеного ступеня, який ніхто не може проконтролювати.

На атомних електростанціях тепло, що виділяється під час керованої ядерної реакції, випаровує воду, пара обертає турбіну й виробляється електроенергія. Таким чином на електроенергію перетворюється приблизно 35 відсотків атомної енергії. Коли ви читаєте, що атомна електростанція виробляє 1000 мегаватів, то не зрозуміло, чи це 1000 мегаватів загальної потужності (третина якої перетворюється на електроенергію, а дві третини втрачаються у вигляді тепла), чи це вся електроенергія, і тоді загальна потужність електростанції становить приблизно 3000 мегаватів. Це суттєва різниця! Вчора я прочитав у газеті, що Іран найближчим часом планує запустити атомну електростанцію, яка вироблятиме 1000 мегаватів електроенергії (оце зрозуміло!).

Останніми роками світ неабияк переймається із приводу глобального потепління і знову зайшла мода на атомну енергетику, бо на відміну від електростанцій, що працюють на викопному паливі, атомні електростанції викидають незначну кількість парникових газів. У Сполучених Штатах уже працює більше ста атомних електростанцій, що виробляють приблизно 20 відсотків енергії, яку ми споживаємо. У Франції ця цифра становить приблизно 75 відсотків. Частка атомної енергетики у світовому споживанні електроенергії — майже 15 відсотків. У кожній країні своя політика щодо ядерної енергетики, але щоб побудувати більше електростанцій, політичні діячі мають докласти неабияких зусиль, щоб розвіяти страхи суспільства, викликані сумнозвісними аваріями на Трі-Майл-Айленд, у Чорнобилі й на Фукусімі. Також це потребує дуже значних коштів: за різними

оцінками, вартість будівництва атомної електростанції коливається в межах від 5-10 мільярдів доларів у США до приблизно 2 мільярдів доларів у Китаї. Нарешті, дуже серйозною технологічною й політичною проблемою було і залишається зберігання радіоактивних відходів атомних електростанцій.

Земля все ще має величезні запаси викопного палива, але ми використовуємо його значно швидше, ніж природа здатна його відтворити. Населення світу й далі зростає, зокрема в таких країнах, як Китай та Індія, тим часом стрімко розвиваються і енергоємні технології. І справді уникнути цього неможливо. Ми стоїмо перед загрозою дуже серйозної енергетичної кризи. Як нам її подолати?

По-перше, важливо усвідомити, яку величезну кількість електроенергії ми споживаємо щодня, й намагатися використовувати її менше. Як на мене, я досить скромний енергоспоживач, але оскільки я мешкаю в Сполучених Штатах, упевнений, що все одно споживаю в чотири-п'ять разів більше, ніж у середньому у світі. Я користуюся електрикою. Для опалення, нагрівання води та приготування їжі використовую газ. Я їжджу на машині — не дуже часто, але все-таки спалюю якусь кількість бензину. Якщо все це додати, думаю, я у 2009 році споживав у середньому приблизно 100 мільйонів джоулів (30 кіловат-годин) енергії на день, з яких приблизно половина припадає на електроенергію. В енергетичному еквіваленті це наче експлуатувати дві сотні рабів, які гарували б на мене як прокляті по дванадцять годин на день. Подумайте про це! Колись дозволити собі таке могли тільки найзаможніші монархи. У які неймовірно розкішні часи ми живемо! Кожного божого дня на мене працюють двісті рабів по дванадцять годин без перерви — і все для того, щоб я міг жити так, як хочу. За 1 кіловат-годину електроенергії, тобто 3,6 мільйона джоулів, я сплачую лише 25 центів. Тому мій сумарний рахунок за місяць (я порахував сюди газ і бензин, бо їхня вартість на одиницю енергії не дуже відрізняється) за цих двохсот рабів становить у середньому 225 доларів. Це більше долара за раба на місяць! Таким чином, зміна ставлення конче потрібна. Але цього недостатньо.

Серйозно вплинути на ситуацію можна, перейшовши на використання енергоощадних пристроїв, наприклад замінити лампи розжарювання на люмінесцентні. Я сам спостерігав досить різкі зміни.

У моєму будинку в Кембриджі за 2005 рік було спожито електроенергії на 8860 кіловат-годин, а за 2006-й — 8317 кіловат-годин. Сюди враховано освітлення, кондиціонер, пральну машину й сушарку (для нагрівання води, приготування їжі й опалення я використовую газ). У середині грудня 2006 року мій син Чак (засновник організації New Generation Energy) зробив мені пречудовий подарунок: замінив усі лампи розжарювання в моєму будинку (їх було 75) на люмінесцентні. Споживання електроенергії зменшилося до 5251 кіловат-години у 2007 році, 5184 кіловат-годин у 2008-му та 5226 кіловат-годин у 2009 році. Завдяки цьому *скороченню* мого електроспоживання на *40 відсотків* мій щорічний рахунок зменшився приблизно на 850 доларів. Оскільки в США на освітлення припадає приблизно 12 відсотків побутового споживання електроенергії і 25 відсотків для комерційного, то це безперечно правильний шлях!

Ідучи подібним шляхом, влада Австралії у 2007 році запланувала замінити по всій країні лампи розжарювання на люмінесцентні. Це не тільки дозволило значно скоротити викиди парникового газу, але й допомогло кожній сім'ї заощадити на електроенергії (як це зробив я). Проте зупинятися на цьому не можна.

На мою думку, якщо ми хочемо вижити, зберігши при цьому нинішню якість життя, то в нас є один спосіб — розвивати ядерний синтез як надійне й ефективне джерело енергії. Не розщеплення, під час якого ядра урану й плутонію розпадаються, виділяючи енергію для роботи ядерного реактора, а синтезу — коли атоми водню зливаються, утворюючи гелій, і при цьому вивільняється енергія. Ядерний синтез є джерелом енергії для зір і термоядерних бомб. З усіх відомих нам процесів саме під час ядерного синтезу виділяється найбільше енергії на одиницю маси — якщо не враховувати зіткнення матерії з антиматерією, яке неможливо використати як джерело енергії.

З досить складних причин для термоядерних реакторів придатні тільки певні різновиди водню — дейтерій і тритій. Дейтерій (ядро якого містить один протон і один нейтрон) досить поширений. Приблизно один з кожних 6000 атомів водню на Землі — це дейтерій. У Світовому океані приблизно мільярд кубічних кілометрів води, тому можна сказати, що запаси дейтерію практично необмежені. Природного тритію на Землі немає (він радіоактивний, з періодом

піврозпаду близько дванадцяти років), але його легко отримати в ядерних реакторах.

Справжня проблема полягає в тому, щоб створити функціональний, практичний термоядерний реактор, яким можна керувати. Зараз ми аж ніяк не можемо бути впевненими, що нам це взагалі вдасться. Щоб ядра водню почали зливатися, потрібно створити тут, на Землі, температури в діапазоні сотень мільйонів градусів, наближені до температури в ядрі зір.

Науковці вже багато років інтенсивно працюють над реакціями ядерного синтезу — і я вважаю, що останнім часом значно активніше, — тому що, здається, дедалі більше країн усвідомлюють реальність енергетичної кризи. Звісно, це серйозна проблема. Але я не втрачаю надії. Урешті-решт за свою наукову кар'єру я не раз був свідком просто приголомшливих змін у своїй галузі, коли наші уявлення про Всесвіт ставали з ніг на голову. Наприклад, космологія, що раніше базувалася здебільшого на припущеннях і зовсім трохи на наукових фактах, тепер стала-таки експериментальною наукою, і ми надзвичайно багато дізналися про походження Всесвіту. Більшість навіть вважає, що ми живемо в золоту добу космології.

Коли я тільки починав дослідження в галузі рентгенівської астрономії, нам був відомий з десятків джерел рентгенівського випромінювання у глибокому космосі. Зараз ми відкрили десятки тисяч. П'ятдесят років тому, щоб умістити обчислювальні потужності вашого двокілограмового ноутбука, знадобилась би майже вся площа корпусу МТІ, у якому є мій кабінет. П'ятдесят років тому астрономи залежали від наземних оптичних і радіотелескопів — от і все, що було! Зараз у нас є не лише космічний телескоп «Габбл», а й низка рентгенівських супутникових обсерваторій, гамма-обсерваторій, а також ми використовуємо й будуємо нові нейтринні обсерваторії. П'ятдесят років тому навіть вірогідність Великого вибуху була відкритим питанням. Тепер ми не тільки вважаємо, що знаємо, яким був Всесвіт у першу мільйонну частку секунди після Великого вибуху. Ми впевнено досліджуємо астрономічні об'єкти віком понад 13 мільярдів років — ті, що сформувалися за перші 500 мільйонів років після вибуху, з якого виник наш Всесвіт. Зважаючи на ці колосальні відкриття й перетворення, як я можу не бути впевненим у тому, що

науковцям вдасться розв'язати проблему керованого ядерного синтезу? Не хочу одразу применшувати труднощі чи нагальність цієї справи, але я вважаю, що це лише питання часу.

15 Куля-молот — призначена для руйнування будинків сталевих куля, яку підвішують на тросі до стріли крана або екскаватора. — *Прим. ред.*

16 Якщо ви хочете використати це рівняння, як значення g візьміть 9,8, а висоту h виразіть у метрах. Тоді ви отримаєте v у метрах за секунду. Якщо h дорівнює 1,5 метра (над підлогою), тіло впаде на підлогу на швидкості приблизно 5,4 метра за секунду, або 19,4 кілометра за годину.

17 Французька назва теплецю (*calorique*) збереглася в назві одиниці кількості тепла — калорії. — *Прим. наук. ред.*

18 Для простоти я округлив g до 10 метрів за секунду у квадраті — так часто роблять у фізиці.

Рентгенівські промені з космосу

Небо завжди і вдень, і вночі викликало багато запитань у людей, які ще здавна прагнули зрозуміти світ навколо, і це одна із причин, чому фізиків так причаровувала астрономія. «Що таке Сонце? — розмірковуємо ми. — Чому воно рухається?» І що таке Місяць, планети й зорі? Подумайте, скільки часу й знань знадобилося нашим предкам, щоб усвідомити, що планети відрізняються від зір, що вони обертаються навколо Сонця і за їхніми орбітами можна спостерігати, їх можна позначити на карті, пояснити й передбачити. Багато з найвизначніших учених XVI–XVII століть, зокрема Миколай Коперник, Галілео Галілей, Тихо Браге, Йоганн Кеплер, Ісаак Ньютон, звертали погляд до неба, намагаючись викрити ці нічні таємниці. Уявіть захват Галілея, коли він, спрямувавши телескоп на Юпітер, який здавався просто світловою цяткою, побачив навколо його орбіти чотири маленькі супутники. І водночас учені, напевно, дуже засмучувалися, що вони так мало знають про зорі, які щонаочі з'являються на небі. Цікаво, що і давньогрецький учений Демокрит, і астроном XVI століття Джордано Бруно припускали, що зорі схожі на наше Сонце, але в них не було доказів, які підтвердили б цю гіпотезу. Що ж таке зорі? Як вони тримаються на небі? Яка до них відстань? Чому деякі з них яскравіші? Чому вони різних кольорів? І що це за широка смуга світла простягається через усе небо, яку видно в ясну ніч?

Історія астрономії та астрофізики стала пошуком відповідей на ці ті інші запитання, які виникали, щойно ми отримували деякі відповіді. Протягом останніх чотирьох століть можливості астрономів залежали, звісно, від потужності й чутливості їхніх телескопів. Винятком був лише Тихо Браге, який здійснив дуже детальні спостереження неозброєним оком, за допомогою найпростішого обладнання, що врешті привели Кеплера до трьох великих відкриттів, відомих як закони Кеплера.

Більшість цього часу в нас не було жодних телескопів, окрім оптичних. Розумію, що для неастронома це звучить вельми дивно.

Коли ви чуєте про телескоп, то одразу уявляєте «трубку з лінзами й дзеркалами, через яку ви дивитеся», правильно? Хіба можуть бути якісь інакші телескопи? Коли в жовтні 2009 року президент Обама влаштував ніч астрономії, на галявині біля Білого дому встановили багато телескопів, і геть усі були оптичними.

Але ще від 1930-х, коли Карл Янський відкрив радіохвилі з галактики Чумацький Шлях, астрономи прагнули розширити діапазон електромагнітного випромінювання, у якому вони спостерігають Всесвіт. Вони довго шукали (і знайшли) мікрохвильове випромінювання (короткі радіохвилі), інфрачервоне й ультрафіолетове випромінювання (частоти, вищі й нижчі за частоти видимого світла), рентгенівські та гамма-промені. Щоб виявити це випромінювання, ми створили безліч спеціальних телескопів — наприклад, рентгенівські й гамма-телескопи, — що дають змогу людству глибше й ширше побачити Всесвіт. Існують навіть підземні *нейтринні* телескопи, зокрема один такий, із цілком слушною назвою «Крижаний куб» (IceCube), зараз будують на Південному полюсі.

Останні сорок п'ять років, відколи я в астрофізиці, я працював у галузі рентгенівської астрономії: відкривав нові джерела рентгенівського випромінювання та досліджував різноманітні спостережувані явища. Як я вже казав, початок моєї кар'єри припав на п'янке та захопливі перші роки існування цього напрямку, і наступні сорок років я був у гущі подій. Рентгенівська астрономія змінила моє життя і, що важливіше, саму астрономію. У цьому й наступних чотирьох розділах ви познайомитеся зі всесвітом рентгенівської астрономії з точки зору людини, яка жила й працювала в ньому всю свою наукову кар'єру. Почнімо з рентгенівських променів.

Що таке рентгенівські промені?

Англійською рентгенівські промені називають X-променями, тому що спершу вони були «невідомі» (подібно до x у рівнянні), але це звичайнісінькі фотони — електромагнітне випромінювання, — що є частиною невидимого електромагнітного спектра і розташовані між ультрафіолетовим світлом і гамма-променями. Голландці та німці називають X-промені рентгенівськими, на честь німецького фізика

Вільгельма Рентгена, який відкрив їх у 1895 році. Ми розрізняємо їх, як і решту мешканців цього спектра, за трьома різними, але пов'язаними характеристиками: частотою (кількість циклів за секунду, вимірюється в герцах), довжиною хвилі (довжина окремої хвилі, вимірюється в метрах, у нашому випадку — у нанометрах) або рівнем енергії (вимірюється в електрон-вольтах, еВ, або кілоелектрон-вольтах, кеВ).

Ось кілька цифр для порівняння. Зелене світло має довжину хвилі приблизно 0,0000005 метра, або 500 нанометрів, і енергію приблизно 2,5 електрон-вольта. Фотон найслабкішого рентгенівського випромінювання має енергію близько 100 еВ, тобто в 40 разів більше, ніж у зеленого світла, а довжина хвилі приблизно 12 нанометрів. Максимальна енергія рентгенівських променів — орієнтовно 100 кеВ за довжини хвилі 0,012 нанометра. (У стоматологічних кабінетах використовують промені з енергією до 50 кеВ). На іншому кінці спектра електромагнітних хвиль — радіохвилі. У Сполучених Штатах радіопередачі транслюються в АМ-діапазоні, від 520 кілогерців (довжина хвилі — 577 метрів) до 1710 кілогерців (довжина хвилі — 175 метрів, приблизно як дві довжини футбольного поля). Їхня енергія в мільярд разів менша, ніж у зеленого світла, і в трильйон разів менше, ніж у рентгенівських променів.

У природі рентгенівські промені можуть виникати по-різному. Атоми більшості радіоактивних елементів випромінюють їх під час ядерного розпаду. При цьому електрони перестрибують з вищого енергетичного рівня на нижчий. Різниця в енергії може випромінюватися як рентгенівський фотон. Такі фотони мають дискретні величини енергії, тому що енергетичні рівні електронів квантовані. Іноді електрони, пролітаючи на великій швидкості повз ядро, змінюють напрямок і випускають частину своєї енергії у вигляді рентгенівських променів. Такий тип рентгенівського випромінювання, дуже поширений в астрономії та медичних рентгенівських апаратах, називають гальмівним випромінюванням. Краще зрозуміти виникнення гальмівного випромінювання допоможе це анімоване відео: cutt.ly/7tLyIr. Деякі медичні апарати можуть створювати й рентгенівське випромінювання дискретних енергій, але загалом переважає гальмівне випромінювання, яке дає неперервний рентгенівський спектр. Коли високоенергетичні електрони рухаються

по спіралі навколо ліній магнітного поля, напрямом їхньої швидкості постійно змінюється, і тому вони також випромінюватимуть частину своєї енергії у вигляді рентгенівських променів. Це називають синхротронним, або магнітогальмівним, випромінюванням (те, що відбувається у Крабоподібній туманності, — про це трохи згодом).

Рентгенівські промені також виникають, коли щільна речовина нагрівається до дуже високих температур — мільйонів кельвінів. Це так зване випромінювання чорного тіла (див. розділ 14). Матерія розжарюється так сильно тільки в досить екстремальних випадках, таких як спалах наднової — потужний вибух, пов'язаний із загибеллю масивної зорі, — або коли газ із величезною швидкістю падає на чорну діру або нейтронну зорю (докладніше про це в розділі 13, обіцяю). Наприклад, Сонце, поверхня якого має температуру приблизно 6000 кельвінів, випромінює майже половину своєї енергії (46 відсотків) у вигляді видимого світла. Решта — це переважно інфрачервоне (49 відсотків) та ультрафіолетове (5 відсотків) випромінювання. Сонце й близько не таке гаряче, щоб випромінювати в рентгенівському діапазоні. Насправді воно випромінює певну кількість рентгенівських променів, природа яких не цілком зрозуміла, але їхня енергія становить лише одну мільйонну частку загальної енергії. Ваше тіло — джерело інфрачервоного випромінювання (див. розділ 9); його температура не достатньо висока для видимого світла.

Рентгенівські промені мають дуже цікаву (і корисну) особливість — деякі речовини (наприклад, кістки) поглинають їх більше, ніж інші (скажімо, м'які тканини), що пояснює світлі й темні ділянки на рентгенівському знімку ваших зубів або руки. Якщо ви колись робили рентген, то на вас одягали свинцевий фартух для захисту решти тіла, тому що вплив рентгенівського випромінювання може збільшити ризик онкологічних захворювань. Загалом пречудово, що наша атмосфера ефективно поглинає рентгенівське випромінювання. На рівні моря приблизно 99 відсотків м'якого (з енергією 1 кеВ) рентгенівського випромінювання поглинається лише одним сантиметром повітря. Щоб поглинути 99 відсотків променів з енергією 5 кеВ, потрібно приблизно 80 сантиметрів повітря. Жорстке рентгенівське випромінювання, 25 кеВ, майже повністю поглинається шаром повітря у 80 метрів.

Народження рентгенівської астрономії

Тепер ви розумієте, чому тоді, у 1959 році, коли Бруно Россі вирішив пошукати рентгенівські промені з відкритого космосу, він запропонував запуснути ракету, що зможе вийти за межі атмосфери. Але сама ідея пошуку рентгенівських променів була схожа на якусь божевілья. Тоді не було жодних обґрунтованих причин вважати, що в космосі є рентгенівське випромінювання поза межами Сонячної системи. Але це не був би Россі, якби він не зумів переконати свого колишнього студента Мартіна Енніса, який працював у компанії American Science and Engineering (AS&E), і дослідника зі своєї групи Ріккардо Джакконі, що за це варто взятися.

Джакконі зі своїм колишнім колегою Френком Паоліні розробили спеціальні трубки Гейгера-Мюллера, що виявляли рентгенівське випромінювання й кріпилися в носовій частині ракети. Власне, вони встановили три такі трубки в одну ракету. Вони назвали їх детекторами великої площі, але «великий» тоді означало завбільшки із кредитну картку. Згодом хлопці з AS&E взяли за пошуки фінансування цього експерименту, але NASA їм відмовило.

Тоді Джакконі змінив проект, додавши в нього як об'єкт дослідження Місяць, і цього разу подав його на розгляд Дослідницькій лабораторії Військово-повітряних сил у Кембриджі. Головний аргумент, який висувався: рентгенівські промені від Сонця мають викликати так зване флуоресцентне випромінювання з поверхні Місяця і це може полегшити її хімічний аналіз. Також вони очікували виявити гальмівне випромінювання з поверхні Місяця, викликане впливом електронів, наявних у сонячному вітрі. Оскільки Місяць перебуває близько, можливо, вдасться виявити рентгенівські промені. Варто зазначити, це був дуже розумний крок, адже AS&E вже заручилася підтримкою Військово-повітряних сил стосовно кількох інших проектів (деякі з них засекречені), і, можливо, вона знала, що Дослідницьку лабораторію зацікавить дослідження Місяця. Хай там як, а цього разу проект схвалили.

І нарешті, після двох невдалих спроб у 1960 і 1961 роках, за хвилину до півночі 18 червня 1962 року відбувся запуск, що мав на меті зафіксувати рентгенівські промені від Місяця і знайти джерела такого

випромінювання за межами Сонячної системи. Ракета провела лише шість хвилин на позначці 80 кілометрів, де трубки Гейгера-Мюллера без атмосферних перешкод зафіксували рентгенівське випромінювання в діапазоні 1,5–6 кеВ. Так учені за допомогою ракет здійснювали в ті часи спостереження в космосі. Вони відправляли ракети за межі атмосфери, де вони за п'ять-шість хвилин оглядали небо, а потім поверталися назад.

Найбільше дивує те, що дослідники одразу виявили рентгенівське випромінювання, щоправда, воно йшло не від Місяця, а звідкілясь за межами Сонячної системи.

Рентгенівські промені з відкритого космосу? Звідки? Ніхто не міг пояснити це відкриття. До цього польоту ми знали лише про одну зорю, яка випромінює рентгенівські промені, — Сонце. І якби воно було розташоване, скажімо, за 10 світлових років від нас, що за астрономічними мірками майже поруч, то обладнання на ракеті з того історичного запуску мало б бути в *мільйон* разів чутливішим, щоб виявити його випромінювання. Про це знали всі. Тому хоч би де було це джерело, воно мало випускати принаймні в мільйон разів більше рентгенівських променів, ніж Сонце, — а це можливо, тільки якщо воно дуже близько. Тоді ще не чули про астрономічні об'єкти, які генерують (принаймні) в мільйон чи мільярд разів більше рентгенівських променів, ніж Сонце. І не існувало науки, щоб описати подібний об'єкт. Інакше кажучи, це мало бути абсолютно нове небесне явище.

У ніч з 18 на 19 червня 1962 року народилася нова наука — рентгенівська астрономія.

Астрофізики почали запускати в космос багато оснащених датчиками ракет, щоб визначити, де розташоване джерело і чи є крім нього щось ще. Оскільки виміряти точно розташування небесних об'єктів неможливо, в астрономії існує таке поняття, як «квадрат похибки». Це уявний квадрат, приклеєний до небесного склепіння, сторони якого вимірюються в градусах, кутових мінутах або кутових секундах. Квадрат роблять досить великим, щоб об'єкт потрапив усередину з імовірністю 90 відсотків. Астрономи неабияк переймаються «квадратами похибки», і зрозуміло чому: що менший квадрат, то точніша позиція об'єкта. Особливо це важливо для

рентгенівської астрономії, бо менший квадрат означає вищу ймовірність знайти видимий відповідник джерела випромінювання. Тому квадрат дуже малого розміру — це величезний успіх.

Професор Енді Лоуренс з Единбурзького університету веде астрономічний блог під назвою The e-Astronomer, де він пригадав, як писав дисертацію та вдивлявся в сотні нанесених координат джерел рентгенівського випромінювання. «Якось мені наснилося, що я квадрат похибки й не можу знайти джерела рентгенівських променів, яке має бути в мені. Я прокинувся пройнятий холодним потом». Ви зрозуміли чому.

Квадрат похибки для джерела рентгенівських променів, яке відкрили Ріккардо Джакконі, Герб Гурскі, Франк Паоліні та Бруно Россі, був приблизно 10 градусів \cdot 10 градусів, або 100 квадратних градусів. Майте на увазі, діаметр Сонця — півградуса. Джерело було розташоване десь у межах квадрата, площа якого в 500 разів більша за Сонце! У цей квадрат входили частини сузір'їв Скорпіона і Косинця, а ще він торкався межі сузір'я Жертовника. Тому астрономи не змогли визначити, в якому із сузір'їв розташоване джерело.

У квітні 1963 року група Герберта Фрідмана в Науково-дослідницькій лабораторії Військово-морських сил у Вашингтоні суттєво уточнила розташування джерела. Вони з'ясували, що воно перебуває в сузір'ї Скорпіона. Саме тому джерело отримало назву Скорпіон X-1: літера «X» означає «X-промені», а цифра 1 указує на те, що це перше джерело рентгенівського випромінювання, відкрите в сузір'ї Скорпіона. До речі, про один цікавий факт ніколи не згадують: Скорпіон X-1 лежить приблизно за 25 градусів від центра квадрата похибки, вказаного у звіті Джакконі й колег, який ознаменував народження рентгенівської астрономії. Коли астрономи відкрили нові джерела в сузір'ї Лебедя, вони отримали назви Лебідь X-1, Лебідь X-2 тощо. Першим джерелом, відкритим у сузір'ї Геркулеса, став Геркулес X-1, у сузір'ї Центавра — Центавр X-1. Протягом наступних трьох років за допомогою ракет було виявлено з десятків нових джерел, але ніхто не мав жодного уявлення, що це за джерела і чому вони утворюють рентгенівські промені в такій кількості, що їх змогли виявити за тисячі світлових років. Єдиним важливим винятком було джерело Телець X-1, розташоване в сузір'ї Тельця.

Ідеться про один із найнезвичайніших об'єктів на небі — Крабоподібну туманність. Якщо ви не чули про неї, раджу подивитися її знімок у вклейці — підозрюю, ви одразу її впізнаєте. В інтернеті також можна знайти багато її знімків. Це дивовижний об'єкт, що перебуває на відстані 6000 світлових років від нас, — залишки після спалаху наднової зорі 1054 року, який зафіксували китайські астрономи (цілком можливо, що про це йдеться і в піктограмах корінних американців — зайдіть сюди: cutt.ly/DwrxEsi). Вони розповідають про надзвичайно яскраву зорю, що зненацька з'явилася в сузір'ї Тельця майже нізвідки. (Щодо точної дати єдиної думки немає, хоча багато хто стверджує, що це сталося 4 липня). Тоді це було найяскравіше після Місяця небесне світило. Кілька тижнів його було видно навіть удень і ще два роки можна було спостерігати вночі.

Потім зоря потьмяніла, і вчені, схоже, забули про неї аж до XVIII століття, коли її незалежно один від одного виявили одразу два астрономи, Джон Бевіс і Шарль Мессьє. На той час залишки від спалаху наднової перетворилися на туманність. Мессьє склав важливий астрономічний каталог, у якому були комети, туманності й зоряні скупчення, і Крабоподібна туманність стала першим об'єктом у ньому — М-1. У 1939 році Ніколас Мейолл з Лікської обсерваторії (у Північній Каліфорнії) визначив, що М-1 — це залишки від спалаху наднової 1054 року. Хоч після спалаху минула вже тисяча років, а в Крабоподібній туманності досі відбуваються такі дивовижні речі, що деякі астрономи присвячують їй дослідженню всю свою кар'єру.

Група Герберта Фрідмана з'ясувала, що 7 липня 1964 року Місяць проходить просто перед Крабоподібною туманністю і затулить її. Астрономи називають це явище «покриттям»: Місяць перекрив Крабоподібну туманність. Фрідман не тільки хотів підтвердити, що Крабоподібна туманність є джерелом рентгенівського випромінювання, а й сподівався продемонструвати дещо навіть важливіше.

У ті часи астрономи знову зацікавилися одним типом зоряних об'єктів, чиє існування вперше припустили в 1930-ті, але які досі ніхто не виявив, — нейтронними зорями. Існувала гіпотеза, що ці дивні об'єкти, про які я розповім докладніше в розділі 12, є одним з кінцевих етапів життя зорі. Можливо, вони народжуються під час спалаху

наднової і складаються здебільшого з нейтронів. Якщо вони існують, то їхня густина така щільна, що нейтронна зоря з масою Сонця матиме радіус 10 кілометрів — можете собі таке уявити? У 1934 році (через два роки після відкриття нейтронів) Вальтер Бааде і Фріц Цвіккі вигадали термін «наднова» та висловили припущення, що нейтронні зорі утворюються внаслідок спалаху наднової. Фрідман припустив, що саме така нейтронна зоря може бути джерелом рентгенівського випромінювання в Крабоподібній туманності. Якщо це так, рентгенівське випромінювання, яке він спостерігав, має раптово зникнути, коли перед ним проходить Місяць.

Він вирішив запустити кілька ракет одну за одною саме в той момент, коли Місяць перекриватиме Крабоподібну туманність. Знаючи точну траєкторію Місяця, астрономи могли відправити лічильники в конкретно визначеному напрямку і «побачити» послаблення рентгенівського випромінювання, коли Крабоподібна туманність зникне. Їхні детектори й справді зафіксували затухання, і це спостереження стало першим випадком остаточної оптичної ідентифікації джерела рентгенівського випромінювання. Це був надзвичайно важливий результат, тому що, знайшовши видимий відповідник одного із цих загадкових і потужних джерел випромінювання, ми сподівалися незабаром відкрити, які процеси за ними стоять.

Проте Фрідман був розчарований. Рентгенівські промені не різко вимикалися, а зникали поступово, і це вказувало на те, що їхнім джерелом була вся туманність, а не окремий невеликий об'єкт. Тобто він не знайшов нейтронної зорі. Утім у Крабоподібній туманності таки є дуже особлива нейтронна зоря, і вона *випромінює* рентгенівські промені. Ця зоря обертається навколо своєї осі приблизно 30 разів за секунду! Якщо хочете потішитися, зайдіть на сайт Космічної рентгенівської обсерваторії «Чандра» (chandra.harvard.edu) й відкрийте зображення Крабоподібної туманності. Гарантую, вони приголомшливі. Але сорок п'ять років тому ми не мали орбітальних рентгенівських телескопів, що передають зображення із космосу, тому нам доводилося бути набагато винахідливішими. (Після того як у 1967 році Джоселін Белл відкрила радіопульсари, у 1968 році група Фрідмана нарешті виявила пульсацію рентгенівських променів — із

частотою приблизно 30 разів за секунду — нейтронної зорі у Крабоподібній туманності).

Поки Фрідман спостерігав за покриттям Крабоподібної туманності, мій (майбутній) друг із МТІ Джордж Кларк готувався в Техасі до нічного запуску висотних повітряних куль, щоб знайти високоенергетичне рентгенівське випромінювання від джерела Скорпіон Х-1. Але почувши про результати Фрідмана — новини поширювалися доволі швидко навіть без інтернету, — він цілком змінив плани й переніс запуск на день, щоб пошукати промені від Крабоподібної туманності з енергією понад 15 кеВ. І він також їх знайшов!

Важко передати словами, наскільки захопливою була ця робота. Розпочиналася нова ера наукових досліджень. Було відчуття, наче ми піднімаємо завісу, що приховувала від нас дивовижні таємниці Всесвіту. Насправді, піднявши детектори на таку висоту, вийшовши в космос, у найвищі шари атмосфери, куди проникають рентгенівські промені, бо їх не поглинає повітря, ми скинули з наших очей фільтри, які заважали нам бачити всю нашу історію. Ми працювали в цілком новому діапазоні спектра.

В історії астрономії таке ставалося часто. Щоразу, коли ми дізнавалися про нові або інші типи променів, які випускають небесні об'єкти, нам доводилося переглядати свої уявлення про зорі, їхній життєвий цикл (як вони народжуються, як живуть і чому помирають), про утворення й еволюцію зоряних скупчень, галактики й навіть скупчення галактик. Наприклад, радіоастрономія розповіла, що центри галактик можуть викидати струмені завдовжки сотні й тисячі світлових років. Радіоастрономи відкрили пульсари, квазари й радіогалактики. Також ми завдячуємо їм відкриттям реліктового космічного випромінювання, що кардинально змінило наше уявлення про ранній Всесвіт. Гамма-астрономія виявила кілька надзвичайно потужних і (на щастя) віддалених вибухів, відомих як гамма-спалахи, які випромінюють післясвітіння у вигляді рентгенівських променів і видимого світла аж до радіохвиль.

Ми знали, що відкриття рентгенівських променів у космосі змінить наше розуміння Всесвіту. Ми тільки не здогадувалися, як саме. З нашим новим обладнанням ми всюди знаходили щось нове. Мабуть,

це не дивно. Коли оптичні астрономи почали отримувати дані з космічного телескопа «Габбл», вони були схвильовані, сповнені шанобливого страху і — можливо, це не так очевидно — прагнули отримати більше. Але вони, по суті, просто розширили межі використання кількасотрічного інструмента у сфері, що існує вже тисячоліття. Працюючи в рентгенівській астрономії, ми брали участь у зародженні цілого наукового напрямку. Хто знав, куди це нас приведе і що нам вдасться відкрити? Ми точно не відали.

Мені дуже пощастило, що Бруно Россі в січні 1966 року запросив мене в МТІ, саме в часи перших успіхів рентгенівської астрономії, і що я одразу долучився до групи Джорджа Кларка. Джордж був надзвичайно розумним фізиком, справляв дуже сильне враження як людина, і ми з ним стали друзями на все життя. Навіть зараз мені важко в це повірити — чудовий друг і нова робота, і все це я отримав за один місяць.

Повітряні кулі й рентгенівські промені — перші кроки

Коли я почав працювати в МТІ, у світі було п'ять активних груп, що здійснювали дослідження за допомогою аеростатів: група Джорджа Кларка в МТІ, група Кена Маккракена в Університеті Аделаїди в Австралії, група Джима Овербека в МТІ, група Леррі Пітерсона в Каліфорнійському університеті в Сан-Дієго та група Боба Гаймса з Університету Райса. У цьому розділі йтиметься здебільшого про мій власний досвід використання повітряних куль для вивчення рентгенівського випромінювання, що посідало центральне місце в моїх дослідженнях від 1966 до 1976 року. За це десятиліття я здійснив спостереження з Палестіна (штат Техас), Пейджа (штат Аризона), Калгарі (Канада) й Австралії.

Повітряні кулі піднімали детектори рентгенівського випромінювання на висоту приблизно 45 кілометрів, де атмосферний тиск становить лише 0,3 відсотка від тиску на рівні моря. Така розріджена атмосфера пропускає значну частку рентгенівських променів з енергією вище за 15 кеВ.

Наші спостереження за допомогою аеростатів доповнювали спостереження за допомогою ракет. Детектори, якими устатковувалися ракети, зазвичай відстежували випромінювання лише в діапазоні 1–10 кеВ і лише протягом майже п'яти хвилин за весь політ. Спостереження за допомогою аеростатів могли тривати годинами (мій найдовший політ продовжувався 26 годин), і мої детектори фіксували рентгенівські промені з енергією більше ніж 15 кеВ.

Детектори на аеростатах не помічали деяких джерел, виявлених під час ракетних спостережень, тому що часто ці джерела випускали переважно низькоенергетичне випромінювання. З іншого боку, ми змогли виявити невидимі для ракет джерела, що випромінювали здебільшого рентгенівські промені високої енергії. Таким чином, ми не тільки відкрили нові джерела й розширили спектри вже відомих

джерел до високих енергій, але також нам вдалося виявити змінність світності випромінювання в часових проміжках від хвилин до годин, що було неможливо зробити, спостерігаючи за допомогою ракет. Це був один з перших успіхів у моїх астрофізичних дослідженнях.

У 1967 році ми виявили спалах рентгенівського випромінювання від Скорпіон X-1 — це був справжнісінький шок. Я розповім про це далі в цьому розділі. Також моя група відкрила три джерела: GX 301-2, GX 304-1 і GX 1+4, які до того не виявляли під час ракетних спостережень, і всі три демонстрували змінність інтенсивності випромінювання в межах хвилин. Періодична змінність джерела GX 1+4 узагалі виявилася приблизно 2,3 хвилини. Тоді ми не мали жодного уявлення, що могло бути причиною такої стрімкої зміни інтенсивності випромінювання, не кажучи вже про повторюваність кожні 2,3 хвилини, але ми знали, що відкриваємо нову сторінку — віднаходимо нові горизонти.

Утім навіть у кінці 1960-х ще не всі усвідомлювали значення рентгенівської астрономії. У 1968 році в гостях у Бруно Россі я познайомився з Яном Оортом, одним з найвідоміших астрономів. Він був надзвичайно прозорливий: одразу після Другої світової війни запустив у Нідерландах окрему програму з радіоастрономії. Того року він приїхав у МТІ, і я показав йому дані наших спостережень з повітряних куль за 1966 і 1967 роки. Але він відповів — і я це пам'ятатиму завжди: «Рентгенівська астрономія не дуже важлива». Уявляєте? «Не дуже важлива». Він помилявся. Один з найвизначніших астрономів в історії зовсім не надавав їй значення. Можливо, тому, що я був молодшим і завзятішим (заради справедливості скажу, що Оорту тоді вже було 68), але для мене було очевидно, що ми відшукали справжнісінький скарб, і це був лише початок.

Пам'ятаю, в 1960–1970-ті я перечитував усі дослідження, що стосувалися рентгенівської астрономії. У 1974 році я прочитав п'ять лекцій у Лейдені (Оорт був серед слухачів), розповівши *все* про рентгенівську астрономію. Зараз щороку на цю тему виходять тисячі досліджень різних напрямів, утім жодне з них не може охопити всієї галузі. Багато дослідників присвячують усю наукову кар'єру вивченню однієї з десятків окремих тем: поодиноких зір, акреційних дисків, подвійних рентгенівських зір, кулястих скупчень, білих карликів,

нейтронних зір, залишків наднової, чорних дір, спалахів рентгенівського випромінювання, рентгенівських струменів, галактичних ядер і скупчень галактик. Перші роки були для мене найфантастичнішими, хоча вони вимагали величезних зусиль: інтелектуальних, фізичних і навіть логістичних. Запуск повітряних куль був таким складним і недешевим, вимагав стільки часу й нервів, що мені важко передати це словами. Однак я спробую.

Вище за хмари: повітряні кулі, рентгенівські детектори й запуск

Перш ніж фізик почне працювати (якщо це не фізик-теоретик, якому достатньо лише аркуша паперу чи екрана комп'ютера), йому потрібно знайти кошти на обладнання, платню аспірантам, а часом і дуже далеку подорож. Щоб отримати фінансову підтримку для своїх досліджень, науковці подають заявки на гранти, які розподіляються в умовах гострої конкуренції. Розумію, що це виглядає не надто привабливо й романтично, але повірте — без цього в науці не відбувається нічого. Нічогісінько.

Ви можете мати чудову ідею експерименту або спостереження, але якщо ви не знаєте, як перетворити її на переможну заявку, то тупцюватимете на місці. Ми завжди змагалися з найкращими у світі, тому й конкуренція була нещадна. Вона досі така чи не для кожного дослідника в будь-якій галузі. Коли ви дивитесь на успішного вченого-експериментатора (у біології, хімії, фізиці, інформаційних технологіях, економіці, астрономії — не має значення), ви бачите людину, котра зрозуміла, як знову і знову обходити конкурентів. У більшості випадків таких людей не назвеш милими й приятими. Саме тому моя дружина С'юзан, що десять років пропрацювала в МТІ, любить повторювати: «У МТІ немає скромників».

Припустімо, ми одержали фінансування, що нам зазвичай вдавалося (мене щедро підтримували Національний науковий фонд і NASA). Підняти на висоту 50 кілометрів повітряну кулю з 900-кілограмовим рентгенівським телескопом (до якого прикріплений парашут), який потрібно повернути неушкодженим, — надзвичайно складно. Для запуску потрібна тиха погода, бо кулі такі чутливі, що найменший

подув вітру міг усе зіпсувати. Щоб підняти аеростат високо в атмосферу і потім його відстежити, потрібна інфраструктура: пускові майданчики, засоби для підняття тощо. Оскільки я хотів здійснити спостереження приблизно в напрямку центра Чумацького Шляху (або галактичного центра), де розташовано багато джерел рентгенівського випромінювання, то мав спостерігати з Південної півкулі. Я обрав для запуску Мілд'юру та Еліс-Спрінгс в Австралії. Мені доводилося їхати дуже далеко від дому й сім'ї (у мене вже було четверо дітей), зазвичай на кілька місяців.

Усе, що пов'язано із запуском повітряних куль, коштує дорого. Самі кулі велетенські. Найбільша з тих, які я запускав (на той час вона була найбільшою в історії і, можливо, досі такою залишається), мала об'єм півтора мільйона кубічних метрів. Коли вона наповнювалася газом і летіла на висоті 45 кілометрів, її діаметр приблизно становив 72 метри. Аеростати було виготовлено з дуже легкого поліетилену завтовшки 0,01 міліметра, делікатнішого за харчову плівку і цигарковий папір. Якби під час запуску куля торкнулася землі, то порвалася б. Ці гігантські та прекрасні кулі важили приблизно 300 кілограмів. Зазвичай ми брали із собою одну про запас, і вартість кожної сягала 100 000 доларів — а сорок років тому це були чималенькі гроші.

Виготовлялися аеростати на величезних фабриках. Спершу робили окремі клини — деталі кулі, схожі на мандаринові часточки, — які потім з'єднували за допомогою термострою. Виробники довіряли склеювання тільки жінкам, бо, за їхніми словами, чоловіки надто нетерплячі й постійно припускаються помилок. Потім нам потрібно було доставити в Австралію гелій для куль, щоб пізніше їх наповнити. А коштував він приблизно 80 000 доларів для однієї кулі. На сучасні гроші це більше ніж 700 000 доларів лише за одну кулю з гелієм, і це не враховуючи запасної кулі, витрат на проїзд, проживання та харчування. Саме так — тут, посеред австралійської пустелі, цілком залежні від погоди, ми намагалися дізнатися таємниці глибокого космосу. І я ще навіть не розповів про Джека. Незабаром я і до цього дійду.

Але повітряні кулі дешевші порівняно з телескопами. На будівництво одного телескопа, надзвичайно складного апарата вагою приблизно тонну, потребувалося орієнтовно два роки, а коштував він мільйон

доларів, тобто 4 мільйони на сучасні гроші. Нам ніколи не вистачало грошей одразу на два телескопи. Тому якщо ми втрачали телескоп — а в нас подібне ставалося двічі, — доводилося чекати мінімум два роки. Ми не могли навіть розпочати виготовлення нового телескопа, не отримавши фінансування. Тому втрата цього приладу була справжнісінькою катастрофою.

І не тільки для мене, аж ніяк. Проблеми виникли б і в моїх аспірантів, які брали активну участь у будівництві телескопів, бо на основі наших спостережень, а отже, й цих апаратів, писали свої дисертації. Їхні наукові ступені зависали в повітрі разом з аеростатами.

Також ми потребували сприяння погоди. У стратосфері вирують шалені вітри, швидкість яких становить приблизно 160 кілометрів за годину, які півроку дмуть зі сходу на захід, а півроку — із заходу на схід. Двічі на рік ці вітри змінюють напрямок (ми називаємо це явище розворотом), і тоді їхня швидкість на висоті 45 кілометрів зменшується, що давало нам змогу здійснювати багатогодинні спостереження. Тому ми мали бути в місці, де могли б визначити напрямок і швидкість вітру для запуску кулі під час розвороту. Ми через день перевіряли атмосферу за допомогою метеозондів, які відстежувалися радаром. Зазвичай вони лопалися, щойно піднімалися на висоту приблизно 39 кілометрів. Але передбачати поведінку атмосфери — це не те саме, що пускати металеві кульки по жолобу під час лабораторної демонстрації. Атмосфера значно складніша й менш передбачувана, а наша справа залежала від надійності прогнозів.

І це ще не все. На висоті 9-18 кілометрів у шарі атмосфери, яку називають тропопаузою, дуже-дуже холодно (-50 градусів за Цельсієм), тому наші кулі ставали надто крихкими. Там також були потужні повітряні течії, які, вдаряючись об кулю, могли пошкодити її. Могло виникнути безліч перепон. Якось мою кулю віднесло в море — кінець телескопу. Уламки обладнання знайшли за дев'ять місяців на пляжі в Новій Зеландії. За допомогою фахівців компанії Kodak нам дивом вдалося відновити дані, що були записані на плівку.

Ми готувалися до запуску знову й знову, а я все одно казав, що хоч би як ми готувалися, нам не бракувало б ще і крихти везіння. А подеколи й багато везіння. Ми привозили обладнання на нашу станцію, що була далеко в пустелі. Потім перевіряли телескоп і

калібрували устаткування, щоб переконатися, що все працює. Тоді кріпили до телескопа парашут і нарешті з'єднували все з аеростатом. Уся перевірка на місці і підготовка до польоту займала десь три тижні, а за цей час могли зіпсуватися погодні умови. І нам не залишалось нічого іншого, як сидіти й чекати, підзаряджаючи акумулятори. На щастя, в Еліс-Спрінгс надзвичайно гарно. Це неймовірне місто, що стоїть у пустелі в самому серці Австралії. Ми почувалися наче на краю світу. Погода була ясна, а світанки, коли ми намагалися запустити кулю, — фантастично видовищні: Сонце розфарбовувало нічне темно-синє небо і пустелю в яскраві відтінки рожевого й оранжевого кольорів.

Коли все було готово, ми мали дочекатися вітру, який би дув у постійному напрямку зі швидкістю, меншою ніж 5 кілометрів за годину, упродовж трьох-чотирьох годин. Саме стільки часу потрібно для того, щоб ми змогли підняти аеростат у повітря (лише на те, щоб його надути, потрібно витратити 2 години). Тому зазвичай ми запускали кулі на світанку, коли вітер найслабший. Але часом наші прогнози не справджувалися, і тоді ми просто чекали, чекали й знову чекали сприятливої погоди.

Якось під час запуску в Мілд'юрі — ми ще навіть не почали наповнювати кулю — усупереч прогнозу синоптиків несподівано здійнявся вітер. Повітряну кулю було пошкоджено, але телескоп, на наше щастя, не постраждав. Уся підготовка і 200 000 доларів пішли за вітром за кілька секунд. Болісні спогади. Усе, що нам лишалось, — чекати кращої погоди, щоб спробувати ще раз із запасним аеростатом.

Невдачі не забуваються. У моїй останній експедиції в Еліс-Спрінгс просто під час запуску ми втратили одну за одною обидві повітряні кулі через прикрі помилки техніків, відповідальних за запуск. Хоча експедиція закінчилася повним фіаско, телескоп уцілів. Йому так і не судилося піднятися в повітря. У 1980 році, під час моєї останньої експедиції в Палестін (штат Техас), ми успішно провели восьмигодинний політ, а коли за допомогою радіокоманди завершували його, то втратили телескоп, бо не відкрився парашут.

Запуск повітряної кулі навіть сьогодні далеко не завжди закінчується вдало. У квітні 2010 року в Еліс-Спрінгс під час запуску, здійснюваного NASA, повітряна куля луснула, намагаючись злетіти, й обладнання

вартістю в кілька мільйонів доларів було втрачено. Ще трохи — і постраждали б глядачі. Ви можете прочитати про це тут: cutt.ly/cwrxEKw.

За всі роки я, напевно, запустив близько двадцяти повітряних куль. Із них тільки п'ять не змогли злетіти або піднятися на потрібну висоту (можливо, це сталося через витік гелію). Така частка успішних спроб (75 відсотків) вважається непоганою. У вклейці ви можете побачити фотографію, на якій кулю наповнюють гелієм, а також момент запуску.

За кілька місяців до поїздки на місце запуску ми зазвичай тестували експериментальне обладнання на фірмі у Вілмінгтоні (штат Массачусетс). Ми встановлювали телескоп у вакуумну камеру та зменшували тиск до такого самого рівня, як високо в небі — приблизно три тисячних від одної атмосфери. Потім ми знижували температуру до -50 градусів за Цельсієм і запускали телескоп — умикали всі детектори й протягом доби кожні двадцять хвилин по десять секунд відстежували рентгенівське випромінювання від радіоактивного джерела. Телескопи деяких наших конкурентів (ми сприймали інші команди, які займалися подібними дослідженнями, як конкурентів) часом підводили, тому що за низької температури в них розряджалися акумулятори, або вони взагалі виходили з ладу. Оскільки ми дуже ретельно перевіряли своє устаткування, з нами такого ніколи не ставалося. Якщо під час тестування ми бачили, що акумулятори втрачають потужність, знаходили спосіб підзарядити їх, аби живлення не припинилося.

Або візьмімо проблему коронного розряду — іскріння від високовольтних провідників. Частина нашого обладнання працювала на дуже високій напрузі, а розріджене повітря, тиск якого низький, створює ідеальні умови для іскріння провідника. Пам'ятаєте, як у розділі 7 я згадував про гудіння високовольтних ліній електропередач? Це і є коронний розряд. Будь-який фізик, котрий має справу з високою напругою, знає, що можна отримати коронний розряд. На лекціях я показую, як виникають такі іскри. Там коронний розряд — це веселе видовище. На висоті 45 кілометрів — це справжня катастрофа.

Якщо висловлюватися мовою не науковців, обладнання почне тріщати й за електронним шумом ви не зможете вловити рентгенівські фотони. Чим це загрожує? Цілковитим провалом — ви не отримаєте

жодних корисних даних. Щоб цього не сталося, ми ізолюємо всі високовольтні провідники силіконовим каучуком. Щоправда, інші робили так само, але все одно отримували коронні розряди. Наша ретельна підготовка й тестування виправдали себе. У нас *ніколи* не було коронних розрядів. І це лише одна з десятків складних технічних проблем, пов'язаних із виготовленням телескопів. Саме тому їх так довго збирають і саме тому вони коштують чималих грошей.

Отже, ми підняли телескоп високо в атмосферу. Як ми виявляли рентгенівські промені? Відповідь на це запитання не проста, тому, будь ласка, озбройтеся терпінням. По-перше, ми використовували не пропорційні лічильники (наповнені газом), як на ракетах, а особливі детектори (кристали йодистого натрію), що могли виявляти промені з енергією понад 15 кеВ. Коли в такий кристал потрапляє рентгенівський фотон, він вибиває з орбіти електрон і віддає йому свою енергію (це явище називають фотоелектричним поглинанням). Цей електрон, своєю чергою, створює у кристалі низку йонів, а потім зупиняється. Коли йони нейтралізуються, то вивільняють енергію, здебільшого у вигляді видимого світла. Унаслідок цього з'являється світловий спалах — у нього перетворюється енергія рентгенівського фотона. Що вища енергія рентгенівських променів, то сильніші світлові спалахи. Ми фіксували ці спалахи за допомогою фотоелектричного помножувача й перетворювали їх на електричні імпульси: яскравішим спалахам відповідали імпульси вищої напруги.

Потім ми посилювали імпульси й скеровували їх на дискримінатор, який визначав напругу електроімпульсів і сортував їх за величиною, що вказувала на енергетичний рівень рентгенівського випромінювання. У перші роки ми фіксували рентгенівське випромінювання лише на п'яти енергетичних рівнях.

Щоб записати дані випромінювання, які ми отримували після польоту аеростата, в перші роки ми реєстрували їх на борту, вказуючи енергетичний рівень і час виявлення. Із дискримінатора відсортовані імпульси потрапляли на світлодіоди, які створювали послідовність світлових спалахів на згаданих п'яти окремих енергетичних рівнях. Потім ці спалахи фіксував фотоапарат, який працював безперервно.

Якщо світло було, воно залишало на плівці доріжку. Загалом запис спостережень був схожий на послідовність рисок і ліній.

Повернувшись у МТІ, ми «читали» плівку за допомогою спеціального пристрою, який сконструював Джордж Кларк. Прилад переносив лінії та риси на перфострічку — паперову стрічку з отворами. Потім ми за допомогою світлочутливих діодів зчитували дані з перфострічки й записували їх на магнітну стрічку. Ми навіть написали комп'ютерну програму мовою Fortran (розумію, це звучить архаїчно) і за її допомогою зчитували інформацію з магнітної стрічки в пам'ять комп'ютера, отримуючи — нарешті! — дані про рентгенівські випромінювання як функцію часу для п'ятох різних енергетичних каналів.

Розумію, це дещо нагадує абсурдно складні пристрої з карикатур Рубена Голдберга. Але подумайте про нашу мету. Ми намагалися виміряти швидкість підрахунку (кількість рентгенівських променів за секунду) й енергетичні рівні рентгенівських фотонів, а також визначити місцезонашування джерела, яке їх випускало. Тисячі років вони зі швидкістю світла розліталися галактикою. Потік фотонів безперервно зменшувався на квадрат відстані, яку вони подолали. І на відміну від стаціонарного оптичного телескопа, система керування якого дозволяє стежити за однією точкою впродовж багатьох годин, а потім щонаочі повертатися до неї, ми могли максимально скористатися з наявного в нас часу (здебільшого раз на рік), який завжди вимірювався годинами, тоді як наш 900-кілограмовий телескоп летів на крихкій повітряній кулі на висоті 45 кілометрів над Землею.

Поки аеростат був у повітрі, я летів за ним на невеликому літаку на висоті 1,5-3 кілометрів, зазвичай тримаючи його в полі зору (це протягом дня). І так годинами — можете уявити? Я людина не низького зросту. Перебувати в цих маленьких чотиримісних літаках по вісім, десять, дванадцять годин поспіль було страх як незручно. Крім того, весь час, поки повітряна куля летіла, я неабияк нервувався. Розслабитися можна було тільки, коли ми тримали дані в руках.

Аеростат був таким велетенським, що коли на нього потрапляло сонце, його було дуже добре видно навіть на висоті майже 45 кілометрів. За допомогою радара ми могли стежити за повітряною кулею на великій відстані від стартового майданчика, доки цьому не перешкоджала кривизна земної поверхні. Саме тому ми оснащували аеростат радіопередавачем, і вночі нам доводилося повністю

переходити на стеження за допомогою радіомаяка. Хоч ми й активно розміщували в місцевих газетах статті про запуск, це не завжди спрацьовувало: повітряну кулю могло віднести за сотню кілометрів, і ми отримували різноманітні повідомлення про НЛО. Це було смішно, але цілком логічно. А що ще могли подумати люди, краєм ока побачивши в небі щось загадкове незрозумілого розміру на величезній відстані? Для них це справді був невизначений об'єкт, який літає. У вклейці ви можете побачити фотографію кулі, зроблену телескопом на висоті 45 кілометрів.

Попри наше ретельне планування і складені прогнози погоди, навіть під час розвороту, вітер на висоті 45 кілометрів міг виявитися доволі непередбачуваним. Якось в Австралії ми розраховували, що повітряна куля полетить на північ від Еліс-Спрінгс, а натомість її понесло просто на південь. До заходу сонця ми тримали її в полі зору, а потім усю ніч підтримували з нею радіозв'язок. На ранок вона занадто наблизилася до Мельбурна, а нам було заборонено заходити в повітряний простір між Сіднеєм і Мельбурном. Аеростат ніхто не збирався збивати, але ми мали вжити якихось заходів. Тож коли наша норавлива повітряна куля мала от-от перетнути заборонену межу, ми неохоче дали радіокоманду скинути вантаж. Коли телескоп відділяється від аеростата, його розриває — він не витримує ударної хвилі від раптового скидання вантажу, і телескоп починає падати. Потім розкривається парашут (крім запуску 1980 року), і телескоп, повільно опускаючись, неушкодженим повертається на Землю. Величезні клапті повітряної кулі також падають, зазвичай їх розкидає в радіусі п'яти кілометрів. Рано чи пізно таке ставалося з кожним аеростатом, і це - завжди було сумно (хоч неминуче), бо нам доводилося припиняти спостереження, зупиняючи надходження даних. Ми, звісно, хотіли, щоб телескоп залишався в повітрі якомога довше. Тоді ми понад усе прагнули отримати більше даних — це була найголовніша мета.

Повертаємо телескоп: Джек, мисливець на кенгуру

Щоб пом'якшити приземлення телескопа, ми прикріплювали до його нижньої поверхні картонні амортизаційні прокладки. Якщо це відбувалося вдень і ми бачили кулю (яка раптом зникала, коли ми

надсилали команду скинути вантаж), то ми незабаром помічали парашут. Ми щосили намагалися простежити за ним аж до приземлення, кружляючи навколо нього на своєму літачку. Коли телескоп приземлявся, ми якомога точніше позначали це місце на дуже докладній карті.

Потім коїлися дивні речі: ось ми, в літаку, ось наше обладнання з усіма нашими даними, кульмінація кількарічної праці, і воно лежить на землі, практично на відстані витягнутої руки, але ми не можемо сісти просто посеред пустелі та забрати його! Натомість ми мали привернути увагу місцевих жителів, що ми здебільшого і робили, низько літаючи над певним будинком. Будинки в пустелі стояли досить далеко один від одного. Місцеві знали, що означає літак, який кружляє на малій висоті, і зазвичай виходили з будинку, махаючи нам рукою у відповідь. Потім ми сідали на найближчій злітно-посадковій смузі (не плутати з аеропортом) у пустелі й чекали, поки хтось приїде.

Якось нам довелося політати над пусткою, щоб хоч когось відшукати. Нарешті ми знайшли такого собі Джека, який жив у пустелі. До будинку його найближчого сусіда було 80 кілометрів. Джек був п'яний і трохи несамовитий. Спочатку, звісно, ми цього не знали. Ми обмінялися з ним знаками, а потім полетіли на злітно-посадкову смугу й чекали на нього. Він з'явився приблизно за 15 годин на побитій старій вантажівці без лобового скла — просто дах над кабіною і відкритий кузов іззаду. Джек любляв ганяти на ній пустелею на швидкості під 100 кілометрів, переслідуючи кенгуру і стріляючи по них із гвинтівки.

Разом з одним з моїх аспірантів ми сіли до Джека у вантажівку, а наш літак показував дорогу до місця, де було обладнання. Ми змушені були переміщатися не позначеною на карті місцевістю, підтримуючи радіозв'язок з літаком. Нам пощастило із Джеком. Завдяки полюванням на кенгуру він добре знав, як дістатися до місця.

Також він вигадав собі жахливу розвагу, яка мені страх як не сподобалась, але оскільки ми були залежні від нього, я мало що міг удіяти. Він показав це лише раз. Він висадив свого собаку на дах вантажівки, розігнався до майже 100 кілометрів за годину, а потім різко натиснув на гальма, і собака звалився на землю. Бідолаха! Джек

довго сміявся, а потім виголосив коронну фразу: «Старого пса не навчиш нових трюків».

Щоб доїхати до вантажу, який охороняла майже двометрова ігуана дуже загрозового вигляду, нам знадобилося майже півдня. Правду кажучи, вона налякала мене до смерті. Але, звісно, я не збирався цього показувати, тому сказав аспіранту: «Нічого страшного. Ігуани — сумирні створіння. Ви йдіть попереду». Він пішов, і, виявляється, вони *справді* сумирні. Упродовж чотирьох годин, поки ми забирали обладнання і вкладали його у вантажівку Джека, тварина так і не поворухнулася.

Професор із повітряною кулею

Потім ми повернулися в Еліс-Спрінгс, і, звісно, потрапили на першу шпальту *Centralian Advocate* разом із чудовою фотографією запуску повітряної кулі. Стаття називалася «Запуск космічного зонда» і розповідала про повернення «професора з повітряною кулею». Я став кимось на зразок місцевої знаменитості й прочитав неформальні лекції в Ротарі-клубі, учням у старшій школі, а якось навіть у стейк-хаусі, отримавши за це вечерю для своєї команди. Насправді ми хотіли якомога швидше відвезти плівку додому, проявити її, проаналізувати дані й побачити, що ми «накопали». Тому за кілька днів ми вирушили в дорогу. Тепер ви зрозуміли, мабуть, якими виснажливими були наші дослідження. Я перебував далеко від дому десь два місяці принаймні що два роки (часом щороку). І безсумнівно, що мій перший шлюб саме через це дуже постраждав.

Разом із тим, попри всі переживання й напругу, усе це було надзвичайно цікаво й дуже весело, і я пишаюся своїми аспірантами, особливо Джеффом Макклінтоком і Джорджем Рікером. Джефф зараз старший астрофізик у Гарвард-Смітсонівському астрофізичному центрі, а в 2009 році отримав премію Бруно Россі (вгадайте, на честь кого названу?) за вимірювання маси чорних дір у рентгенівських подвійних зоряних системах. (Я зупинюся на цьому в розділі 13). Джордж досі працює в МТІ, що мене неабияк тішить. У нього талант розробляти нове інноваційне обладнання. Він відомий передусім як дослідник гамма-спалахів.

Робота з повітряними кулями була по-своєму дуже романтична. Встаєш о четвертій ранку, виїжджаєш в аеропорт, зустрічаєш світанок і бачиш, як аеростат наповнюється газом. Усе це відбувається у прекрасній пустелі під небом, спершу тільки сяють зірки, а потім повільно здіймається Сонце. Згодом повітряна куля підносилася в небо і полискувала сріблом і золотом у променях світанку. І ви знаєте, від скількох дрібниць усе залежить, тому нерви постійно натягнені, як струни. Це ж треба таке. І коли міради дрібниць (кожна з яких може спричинити катастрофу) складаються як було задумано, — це неймовірне відчуття!

У ті часи наші дослідження були останнім словом у науці. Подумати лишень, наш успіх частково залежав від великодушності завжди п'яного австралійського мисливця на кенгуру.

Рентгенівський спалах від Скорпіон X-1

З усіх наших знахідок за ті роки найзахопливішим для мене стало цілком несподіване відкриття, що в деяких рентгенівських джерел трапляються вельми помітні спалахи. Думка про те, що інтенсивність рентгенівського випромінювання якихось джерел змінюється, витала в повітрі ще із середини 1960-х. Філіп Фішер і його група в Lockheed Missiles and Space Company порівняли інтенсивність випромінювання семи джерел, виявлених під час запуску ракети 1 жовтня 1964 року, з результатами, які отримала група Фрідмана 16 червня того самого року. Вони з'ясували, що 1 жовтня інтенсивність променів (так звана густина потоку) джерела Лебідь XR-1 (сучасна назва — Лебідь X-1) була в п'ять разів нижчою, ніж 16 червня. Але було незрозуміло, чи справді це спостереження вказувало на змінність джерела. Група Фішера зауважила, що група Фрідмана використовувала значно чутливіші до низькоенергетичного рентгенівського випромінювання детектори, і припустила, що різницю можна пояснити саме цим.

Питання було розв'язано в 1967 році, коли група Фрідмана порівняла зібрані за попередні два роки дані про густину потоку рентгенівського випромінювання від тридцяти джерел і встановила, що інтенсивність деяких джерел справді змінюється. Особливо яскраво це ілюстрував Лебідь X-1.

У квітні 1967 року група Кена Маккракена з Австралії внаслідок запуску ракети виявила джерело приблизно такої самої яскравості, як Скорпіон Х-1 (найяскравіше з відомих нам джерел рентгенівського випромінювання), яке не було зафіксоване під час обстежень цього самого місця півтора року тому. Через два дні після оголошення цієї «рентгенівської нової» (так назвали джерело) на весняній конференції Американського фізичного товариства у Вашингтоні я розмовляв по телефону з одним з найвизначніших піонерів рентгенівської астрономії, і він запитав: «Ви вірите в цю нісенітницю?».

Інтенсивність випромінювання за наступні кілька тижнів зменшилася втричі, а через п'ять місяців — уже в 50 разів. Сьогодні такі джерела мають прозаїчну назву «рентгенівські тимчасові, або транзїєнти».

Група Маккракена дійшла висновку, що джерело розташоване в сузір'ї Південний Хрест. Це викликало в них неймовірний захват, тому що саме це сузір'я зображене на австралійському прапорі. Коли з'ясувалося, що джерело розташоване якраз за межами Південного Хреста, у сузір'ї Центавра, початкову назву Хрест Х-1 змінили на Центавр Х-2, а австралійські колеги дуже засмутилися. Часом науковці надто приростають до своїх відкриттів.

П'ятнадцятого жовтня 1967 року ми із Джорджем Кларком, спостерігаючи Скорпіон Х-1 під час десятигодинного польоту повітряної кулі, запущеної з Мілд'юри в Австралії, зробили велике відкриття. Воно зовсім не було схоже на те, що можна побачити на фотографіях із Космічного центру NASA в Г'юстоні, де всі аплодують та обіймаються, коли досягають успіху. Вони бачать події в реальному часі. Ми не мали доступу до даних під час спостереження, тому все, що нам лишалося, це сподіватися, що аеростат витримає політ і обладнання працюватиме бездоганно. І, звісно, ми щоразу переймалися, як отримати телескоп з даними назад. Ось чому ми так хвилювалися.

Ми аналізували дані через кілька місяців, коли вже поверталися в МТІ. Якось пізно ввечері я був у комп'ютерному залі, мені допомагав Террі Торсос. Тоді в нас були величезні ЕОМ. Приміщення обладнували кондиціонерами, бо комп'ютери дуже сильно нагрівали повітря. Пам'ятаю, це було приблизно об одинадцятій вечора. Якщо

вам потрібно було щось обчислити на комп'ютері, вечір — ідеальний час для цього. Тоді не можна було запустити потрібні програми самостійно, без оператора ЕОМ. Я зайняв чергу до нього і став терпляче чекати.

І от я передивляюся дані з польоту аеростата й несподівано помічаю різке зростання густини потоку рентгенівського випромінювання від Скорпіон Х-1. Просто там, на роздруківці з комп'ютера, густина потоку зросла в чотири рази за якихось десять хвилин, це тривало десь півгодини, а потім світіння пішло на спад. Ми зафіксували величезний рентгенівський спалах від Скорпіон Х-1. *Раніше ніхто такого не бачив.* Зазвичай ми казали собі: «Може, цей спалах можна пояснити якось інакше? А раптом це через несправний детектор?». У цьому випадку я не мав жодних сумнівів. Я знав обладнання як свої п'ять пальців. Я був упевнений у нашій підготовці й тестуваннях, а під час польоту ми постійно перевіряли детектор і кожні двадцять хвилин робили контрольні вимірювання рентгенівського спектра відомого радіоактивного джерела. Обладнання працювало бездоганно. Я був переконаний у даних стовідсотково. На роздруківці з комп'ютера я бачив, що густина потоку випромінювання зросла, а потім упала. З усіх джерел, за якими ми спостерігали в цей десятигодинний політ, так поводилось лише одне — Скорпіон Х-1. Усе це було насправді!

Уранці я показав результати Джорджу Кларку, і він мало не впав зі стільця. Ми обоє добре розуміли, що це означає, й нетямалися від радості. Ніхто навіть не припускав, не те що спостерігав, зміну густини потоку випромінювання рентгенівського джерела в межах десяти хвилин. Спалах від Центавр Х-2 зменшився втричі протягом кількох тижнів після його виявлення, а в нас було зростання мінливості в чотири рази протягом десяти хвилин — приблизно в 3000 разів швидше.

Ми знали, що Скорпіон Х-1 випромінює 99,9 відсотка своєї енергії в рентгенівському діапазоні, а його рентгенівська світність приблизно в 10 000 разів більша, ніж загальна світність Сонця, і в 10 мільярдів разів більша за його рентгенівську світність. Щоб Скорпіон Х-1 змінював свою світність у чотири рази в межах десяти хвилин — це щось незбагненне з погляду фізики. Якби Сонце за десять хвилин стало в

чотири рази яскравішим, як ви пояснили б таке явище? Я налякався б до смерті.

Відкриття змінності джерела в таких часових межах було чи не найважливішим у рентгенівській астрономії, здійсненим за допомогою спостереження з повітряних куль. Як я вже згадував, крім того ми відкрили джерела випромінювання, непомітні для ракет, і це також було важливо. Але ніщо не мало такого ефекту, як десятихвилинна зміна блиску від Скорпіон X-1.

Відкриття було таким несподіваним, що багато вчених не могли в це повірити. Навіть дослідники мають великі очікування, і часом вони неохоче відмовляються від них. Легендарний редактор журналу *Astrophysical Journal Letters* Субрахманьян Чандрасекар відправив нашу статтю про Скорпіон X-1 рецензенту, і той узагалі не повірив у наше відкриття. Я досі пам'ятаю це, хоч і минуло сорок із чимось років. Він написав: «Це просто нонсенс, адже нам відомо, що потужні джерела рентгенівського випромінювання не можуть змінюватися в межах десяти хвилин».

Нам довелося переконувати редакцію журналу надрукувати статтю. У 1962 році точнісінько те саме був змушений робити Россі. Редактор *Physical Review Letters* Семюел Гудсміт прийняв статтю, що дала початок рентгенівській астрономії, тому що це був Россі, і він був ладен, як писав згодом, узяти на себе «особисту відповідальність» за її зміст.

Зараз, маючи набагато чутливіші телескопи й інші вимірювальні прилади, ми знаємо, що змінність випромінювання притаманна багатьом джерелам, і може відбуватися в *будь-яких* часових межах, тобто якщо постійно, день у день спостерігати за джерелом, густина потоку випромінювання щодня буде різною. Якщо порівнювати значення густини потоку щосекунди, воно також змінюватиметься. Навіть якщо аналізувати дані по мілісекундах, можна виявити зміну потоку в деяких джерелах. Але в ті часи навіть десятихвилинний проміжок був чимось новим і несподіваним.

Я розповідав про це відкриття в МТІ в лютому 1968 року і був схвильований, коли побачив серед слухачів Ріккардо Джакконі та Герба Гурскі. Було таке відчуття, наче я домігся визнання і потрапив в епіцентр досліджень у цій галузі.

У наступних кількох розділах я ознайомлю вас із багатьма таємницями, які розгадала рентгенівська астрономія, а також із тими, на які ми, астрофізики, досі намагаємося знайти відповідь. Ми побачимо нейтронні зорі й зануримося у глибини чорних дір. Тримайтеся міцніше.

Космічні катастрофи, нейтронні зорі та чорні діри

Нейтронні зорі стоять у самому центрі історії рентгенівської астрономії. І вони надзвичайно круті. Чого тільки варта їхня поверхнева температура, яка часто перевищує мільйони кельвінів, а це в 100 разів більше, ніж на поверхні Сонця.

Джеймс Чедвік відкрив нейтрон у 1932 році (за це він отримав Нобелівську премію з фізики в 1935 році). Після цього визначного відкриття, яке, на думку багатьох фізиків, дало нам повну картину структури атома, Вальтер Бааде та Фріц Цвіккі припустили, що в результаті спалаху наднової утворюється нейтронна зоря. Як виявилось, вони цілком мали рацію. Нейтронні зорі виникають унаслідок катастрофічних подій на завершальному етапі існування масивної зорі, однієї з найстрімкіших і найвидовищніших пригод у відомому Всесвіті, — колапсу ядра наднової.

Зоря, з якої потім утвориться нейтронна, не схожа на Сонце, а масивніша за нього принаймні у вісім разів. У нашій Галактиці приблизно мільярд нейтронних зір, але порівняно із загальною кількістю зір усіх можливих видів їх усе одно вважають рідкісними. Подібно до багатьох тіл у світі — та Всесвіті — зорі можуть «жити» тільки завдяки своїй здатності досягати приблизної рівноваги між надзвичайно могутніми силами. У надрах зорі за температур у десятки мільйонів кельвінів відбуваються термоядерні реакції, під час яких виробляється величезна кількість енергії, що створює тиск. Ядро Сонця має температуру приблизно 15 мільйонів кельвінів і щосекунди виробляє енергію, що перевищує потужність мільярда водневих бомб.

Поки зоря перебуває в стабільному стані, цей тиск урівноважується гравітацією, яку створює велика маса зорі. Якщо ці дві сили — спрямований назовні тиск термоядерного реактора і гравітація, що діє в протилежному напрямку, — не збалансовуються, зоря виходить зі стану рівноваги. Наприклад, ми знаємо, що Сонце існує вже приблизно 5 мільярдів років і має проіснувати в такому ж вигляді ще

стільки само. Перш ніж загинути, зоря зазнає видовищних змін. Витративши більшість запасів ядерного палива в ядрі та наблизившись до завершального етапу свого розвитку, багато зір спочатку влаштовують вогняне шоу. Особливо це стосується масивних зір. Наднові певною мірою нагадують трагічних театральних героїв, які часто закінчують своє грандіозне життя вибухом катартичних переживань, пристрасно і голосно благаючи глядачів, за словами Аристотеля, про співчуття і викликаючи в них страх.

Найекстравагантніший з усіх варіантів загибелі зорі — колапс ядра наднової, одне з найенергетичніших явищ у Всесвіті. Спробую віддати їй належне. Коли реакція в ядерному реакторі у надрах масивної зорі починає сходити нанівець — будь-яке паливо колись закінчується — і тиск, який він створює, зменшується, неослабна й вічна сила гравітаційного притягання перемагає.

Те, як зоря використовує паливо, — досить складний, але водночас захопливий процес. Спершу дуже масивні зорі, як і більшість інших зір, спалюють водень, утворюючи гелій. Зорі отримують енергію з ядерних реакцій, тільки не розпаду, а синтезу: чотири ядра водню (протони) за надзвичайно високої температури зливаються, утворюючи ядро гелію, і в результаті виділяється тепло. Коли водень закінчується, ядро зорі стискається (під дією гравітації), від чого температура підвищується і стає достатньою, щоб з гелію почав утворюватися вуглець. Зорі, маса яких приблизно в 10 разів більша за масу Сонця, після вигорання вуглецю послідовно спалюють кисень, неон, силіцій, і зрештою у них формується залізне ядро.

Після кожного циклу горіння ядро стискається, його температура підвищується, і починається новий цикл. Кожен наступний цикл виробляє менше енергії і коротший за попередній. Наприклад, цикл горіння водню може тривати 10 мільйонів років (залежно від точної маси зорі) за температури 35 мільйонів кельвінів, тоді як завершальний цикл горіння силіцію може тривати лише кілька днів, а температура може сягати 3 мільярдів кельвінів. Під час кожного циклу зоря спалює більшість продуктів, утворених у попередньому циклі. Оце так повторна переробка!

Кінець настає, коли в результаті злиття силіцію утворюється залізо, ядро якого найстабільніше з усіх елементів періодичної системи. Під

час злиття заліза у важчі ядра енергія не виділяється, а навпаки — поглинається, тому енергетичний реактор зупиняється. Зоря утворює дедалі більше заліза, і ядро швидко зростає.

Коли маса залізного ядра стає приблизно в 1,4 раза більшою, ніж маса Сонця, воно досягає своєрідної магічної межі, відомої як межа Чандрасекара (її так назвали на честь ушавленого астронома). На цьому етапі тиск у ядрі вже не може протистояти потужній дії гравітації, і ядро стрімко стискається, що призводить до спалаху наднової.

Уявіть, як багатотисячна армія бере в облогу колись величний замок, і його мури починають руйнуватися під її натиском. (Спадають на думку батальні сцени з «Володаря перснів», коли незліченне військо орків проривається крізь мури). Ядро стискається за мілісекунди, і коли на нього падає оболонка зорі — узагалі-то, вона мчить із фантастичною швидкістю, десь у чотири рази меншою за швидкість світла, — температура всередині зростає до немислимих 100 мільярдів кельвінів, що в 10 000 разів більше за температуру ядра Сонця.

Якщо маса поодинокі зорі менша за 25 мас Сонця, але більша за його 10 мас, унаслідок колапсу ядра в її центрі з'явиться зовсім інший астрономічний об'єкт — нейтронна зоря. Поодинокі зорі з масами від восьми до десяти мас Сонця також перетворюються на нейтронні зорі, але їхня еволюція (про яку тут не йшлося) відрізняється від описаного вище сценарію.

Стискуване ядро має велику густину, електрони в ньому зливаються із протонами. Негативний заряд окремого електрона нейтралізує позитивний заряд протона, і вони об'єднуються, утворюючи нейтрон і нейтрино. Поодинокі ядра припиняють існування, зникнувши в масі так званої виродженої нейтронної матерії. (Нарешті якісь пікантні назви!) Мені подобається назва тиску, що врівноважує гравітацію, — тиск виродженого нейтронного газу. Якщо ця потенційна нейтронна зоря стає *масивнішою*, ніж три маси Сонця, що стається, коли маса поодинокі зорі (що називається зорею-попередником) більша за 25 мас Сонця, гравітація переважає навіть тиск виродженого газу. І що тоді, по-вашому, станеться? Спробуйте вгадати.

Правильно. Думаю, ви здогадалися. Це не що інше, як чорна діра, де матерія вже не може існувати в жодній зрозумілій нам формі, а

гравітація така потужна, що звідти не може вирватися ніяке випромінювання: ні світло, ні рентгенівські промені, ні гамма-промені, ні нейтрино, *нічогосінько*. Еволюція зір у подвійних системах (про це говоритимемо в наступному розділі) дуже відрізняється від еволюції поодиноких зір, тому що в такій системі масивна зоря може втратити оболонку ще на ранньому етапі і маса ядра не зросте так, як у поодинокій зорі. Тоді навіть зоря, початкова маса якої в 40 разів перевищує масу Сонця, може залишитися нейтронною зорею.

Варто наголосити: немає чіткої межі, яка відділяє зорі, що утворюють нейтронні зорі, від тих, що утворюють чорні діри. Крім маси зорі-попередника, це залежить від багатьох інших чинників. Наприклад, важливе значення має обертання зорі.

Але чорні діри справді існують — це не вигадка божевільних учених і наукових фантастів — і вони надзвичайно цікаві. Вони глибоко пов'язані з рентгенівським всесвітом, і я ще до них повернуся, обіцяю. Поки що обмежуся таким: вони не тільки існують. Цілком можливо, що вони утворюють ядро будь-якої більш-менш великої галактики у Всесвіті.

Повернімося до колапсу ядра. Після утворення нейтронної зорі — не забувайте, ми говоримо про мілісекунди — зоряна матерія, що все ще мчить у її напрямку, буквально відскакує, утворюючи спрямовану назовні ударну хвилю, яка зрештою затухає, бо енергія витрачається на розпад решти ядер заліза. (Пригадайте, що під час утворення ядер заліза з легших елементів вивільняється енергія, тому розщеплення ядер заліза відбувається із поглинанням енергії). Під час колапсу ядра зорі утворюються не тільки нейтрони, але й нейтрино. Крім того, за температури ядра близько 100 мільярдів кельвінів утворюються так звані теплові нейтрино. Потік нейтрино виносить приблизно 99 відсотків (орієнтовно 10^{46} джоулів) енергії, що вивільняється в результаті колапсу ядра. Ще 1 відсоток (10^{44} джоулів) виділяється здебільшого у вигляді кінетичної енергії матерії, яку викидає зоря.

Практично позбавлені маси й нейтрально заряджені нейтрино зазвичай легко проникають крізь майже будь-яку матерію, і більшість з них залишає ядро зорі. Утім, через надзвичайно високу густину навколишньої матерії, вони передають їй приблизно 1 відсоток своєї енергії, від чого матерія розлітається на швидкості до 20 000 кілометрів

за секунду. Частину цієї матерії можна спостерігати за багато тисячоліть після спалаху — це так званий залишок наднової (наприклад, Крабоподібна туманність).

Спалах наднової засліплює: на піку яскравості її світність у видимих променях становить приблизно 10^{35} джоулів за секунду. Це в 300 мільйонів разів більше за світність Сонця, тому коли наднова спалахує в нашій Галактиці (що стається в середньому двічі на століття), ми спостерігаємо видовище неймовірної краси. Сьогодні за допомогою автоматизованих і роботизованих телескопів астрономи щороку відкривають у великому «зоопарку» відносно близько розташованих галактик від кількох сотень до тисячі наднових.

Унаслідок колапсу ядра приблизно за одну секунду виділяється у 200 разів більше енергії, ніж Сонце виробило за останні п'ять мільярдів років, — і 99 відсотків випромінюється у вигляді нейтрино.

Саме це сталося в 1054 році, і в результаті на небі з'явилася найяскравіша за останнє тисячоліття зоря — така, що кілька тижнів її було видно навіть удень.

Справжня космічна одноденка, наднова за кілька років тьмяніє, коли газ охолоджується й розсіюється. Проте сам газ не зникає. Унаслідок спалаху 1054 року утворилася не тільки поодиноким нейтронна зоря, а і Крабоподібна туманність — один із найдивовижніших небесних об'єктів, який досі змінюється, практично невичерпне джерело нових даних, надзвичайних знімків і наукових відкриттів. Дуже багато астрономічних процесів відбувається в колосальних часових масштабах, співмірних із геологічними періодами, — мільйони й мільярди років. Тому коли ми виявляємо щось, що відбувається дуже швидко, у межах секунд, хвилин чи навіть років, це особливо захоплює. Частини Крабоподібної туманності змінюють форму що кілька днів і, за даними спостережень космічного телескопа «Габбл» і рентгенівської обсерваторії «Чандра», залишок наднової SN 1987A (розташованої у Великій Магеллановій Хмарі) також змінює форму, і ми можемо спостерігати за цим процесом.

Три нейтринні обсерваторії на Землі зафіксували одночасні спалахи нейтринного випромінювання наднової SN 1987A, світло від якої досягло нас 23 лютого 1987 року. Нейтрино так складно виявити, що згадані три телескопи протягом 13 секунд помітили тільки 25 із

приблизно 300 трильйонів ($3 \cdot 10^{14}$) нейтрино, які за ці 13 секунд пролилися на кожен квадратний метр поверхні Землі, оберненої до наднової. Унаслідок спалаху наднової було викинуто орієнтовно 10^{58} нейтрино, майже немислиму кількість, але зважаючи на велику відстань від Землі (приблизно 170 000 світлових років), до нас долетіло «лише» $4 \cdot 10^{28}$ нейтрино, тобто на 30 порядків менше. Більше ніж 99,999999 відсотка просто пройшло крізь нашу планету; щоб зупинити приблизно половину нейтрино, знадобився б шар свинцю завтовшки світловий рік (10^{13} кілометрів).

Приблизно 20 000 років тому попередник наднової SN 1987A скинув газову оболонку, внаслідок чого навколо зорі утворилися кільця, які вперше помітили приблизно через вісім місяців після спалаху наднової. Швидкість викинутого газу була порівняно невисока — лише 8 кілометрів за секунду, але за роки оболонка віддалилася приблизно на дві третини світлового року — вісім світлових місяців.

Отже, наднова вибухнула, і за вісім місяців ультрафіолетове світло від вибуху (що рухалося, звісно, зі швидкістю світла) наздогнало кільце матерії і, так би мовити, запалило його, і кільце почало випромінювати видиме світло. У вклейці ви можете побачити знімок SN 1987A.

Але є ще дещо цікавеньке, і воно пов'язане з рентгенівським випромінюванням. Газ, який викинула наднова під час спалаху, рухався зі швидкістю близько 20 000 кілометрів за секунду, тобто лише в 15 разів повільніше за швидкість світла. Знаючи, на якій відстані перебувало кільце, ми також можемо передбачити приблизний час, коли викинута із зорі речовина зіткнеться з ним; сталося це трохи більше ніж через 11 років, і в результаті утворилося рентгенівське випромінювання. Звісно, не можна забувати, що хоч ми й говоримо про це так, наче все відбувалося в останні кілька десятиліть, бо наднова SN 1987A розташована у Великій Магеллановій Хмарі, насправді це сталося приблизно 170 000 років тому.

На сьогодні в залишку наднової SN 1987A не вдалося виявити жодної нейтронної зорі. На думку деяких астрофізиків, під час колапсу ядра після утворення нейтронної зорі сформувалася чорна діра. У 1990 році я побився об заклад зі Стеном Вузлі з Каліфорнійського університету (Санта-Круз), одним із найкращих у світі експертів з наднових, чи

знайдуть нейтронну зорю впродовж наступних п'яти років. Я програв 100 баксів.

Ці дивовижні явища викликають інші вражаючі ефекти. У розжареній топці наднової відбуваються реакції ядерного синтезу вищого порядку, в яких утворюються набагато важчі за залізо елементи. Урешті-решт вони потрапляють у газові хмари, які потім можуть зливатися та стискатися, формуючи нові зорі й планети. Ми всі, і люди, і тварини, складаємося з елементів, сформованих у надрах зір. Якби не ці зоряні пічки й приголомшливо потужні спалахи, починаючи з Великого вибуху, не існувало б того різноманіття хімічних елементів, яке ми спостерігаємо в періодичній таблиці. Отже, ми можемо, мабуть, порівняти спалах наднової з небесною лісовою пожежею (щоправда, невеличкою), яка, спалюючи одну зорю, створює умови для народження нових зір і планет.

Нейтронні зорі за всіма мірками виняткові. Діаметром вони лише 10–15 кілометрів (менші, ніж деякі астероїди між Марсом і Юпітером), тобто приблизно в 100 000 разів менші за Сонце, а їхня густина в 300 більйонів ($300 \cdot 10^{12}$) разів більша, ніж середня густина Сонця. Чайна ложка речовини з нейтронної зорі на Землі важила б 100 мільйонів тонн.

Ще мені подобається в нейтронних зорях те, що, просто вимовляючи або пишучи їхню назву, ми поєднуємо дві фізичні протилежності — крихітне й безмежне, щось настільки малесеньке, чого ми ніколи не побачимо, але таке щільне, що виходить за межі нашого розуміння.

Нейтронні зорі обертаються, до того ж деякі із приголомшливою швидкістю — особливо на початку існування. Чому? Із тієї самої причини, чому фігуристка починає крутитися швидше, коли притискає руки до тулуба. Описуючи подібні явища, фізики кажуть про збереження моменту кількості руху (імпульсу). Докладно пояснити момент імпульсу трохи важко, але сам принцип надзвичайно простий.

Як це пов'язано з нейтронними зорями? А ось так: кожне тіло у Всесвіті обертається. Тому зоря, з якої утворилася нейтронна, теж оберталася. Під час вибуху вона скинула більшу частину своєї речовини, але притримала одну-дві маси Сонця, тепер сконцентровані в об'єкті, що в кілька тисяч разів менший за ядро зорі до колапсу.

Оскільки момент імпульсу зберігається, частота обертання нейтронних зір зростає принаймні в мільйон разів.

Перші дві нейтронні зорі, які відкрила Джоселін Белл (див. далі), роблять повний оберт майже за 1,3 секунди. Нейтронна зоря в Крабоподібній туманності здійснює приблизно 30 обертів за секунду, тоді як найшвидша з досі виявлених зір обертається із приголомшливою частотою — 716 разів за секунду. Це означає, що швидкість на її екваторі становить приблизно 15 відсотків швидкості світла!

Той факт, що всі нейтронні зорі обертаються і більшість з них має значне магнітне поле, зумовлює важливе астрономічне явище, відоме як пульсари (назва pulsar — це скорочення від pulsating star — «пульсуюча зоря»). Пульсари — це нейтронні зорі, що випромінюють пучки радіохвиль зі своїх магнітних полюсів, які, як і у випадку із Землею, не збігаються з географічними полюсами — точками на кінцях осі, навколо якої обертається зоря. Під час обертання зорі пучки радіохвиль від пульсара ширяли небом. З погляду спостерігача, який перебуває на шляху пучка, зоря пульсує з постійними інтервалами, і він бачить промені протягом якоїсь часини. Астрономи з очевидних причин іноді називають це ефектом маяка. Вже відкрито півдесятка поодиноких нейтронних зір (не плутати з нейтронними зорями в подвійних системах!), які пульсують у величезному діапазоні електромагнітного спектра, до якого входять радіохвилі, видиме світло, рентгенівські й гамма-промені. До них належить пульсар у Крабоподібній туманності.

Перший пульсар у 1967 році відкрила Джоселін Белл, яка тоді була аспіранткою Кембриджу. Вона і її науковий керівник Ентоні Г'юїш спочатку не знали, як пояснити регулярність сигналів, що тривали лише приблизно 0,04 секунди з інтервалом майже 1,3373 секунди (зараз це називають періодом пульсара). Пульсар назвали LGM-1 (скорочено від Little Green Men — «маленькі зелені чоловічки»), натякаючи на те, що ритмічна пульсація може бути сигналом від якоїсь позаземної цивілізації. Незабаром Белл відкрила другий пульсар з періодом приблизно 1,2 секунди, і стало зрозуміло, що ці імпульси не пов'язані з інопланетянами — з якого дива двом абсолютно різним цивілізаціям посилати на Землю сигнали з приблизно однаковою періодичністю? Невдовзі після того, як Белл і Г'юїш опублікували

результати своїх досліджень, Томас Голд з Корнельського університету впізнав у пульсарах обертові нейтронні зорі.

Чорні діри

Я обіцяв, що ми до них дійдемо. Настав час уважно роздивитися ці химерні об'єкти. Я розумію, чому деякі люди бояться їх. Погулявши трохи на YouTube, ви можете побачити десятки гіпотетичних «реконструкцій» чорних дір, більшість яких потрапляє в категорію «зірок смерті» або «пожирачів зір». У суспільній свідомості чорні діри — це надмогутні космічні вирви, які затягують усе у свою ненаситну пащу.

Але думка про те, що чорна діра засмоктує все поблизу неї, геть хибна. Навіть якщо йдеться про надмасивну чорну діру. Навколо чорної діри із зоряною масою або навіть надмасивної чорної діри можуть обертатися різні астрономічні тіла, переважно зорі, водночас їхнє взаємне розташування зовсім не змінюється. Інакше наша Галактика Чумацький Шлях уже зникла б у розташованій у її центрі величезній чорній дірі, маса якої в 4 мільйони разів більша за масу Сонця.

То що ми знаємо про цього дивного «звіра»? Максимум для нейтронної зорі — приблизно три маси Сонця, потім вона стискається під дією гравітації, утворюючи чорну діру. Якщо маса початкової поодинокі зорі приблизно в 25 разів перевищує масу Сонця, під час колапсу ядра матерія стискатиметься далі, а не зупиниться на етапі нейтронної зорі. Який результат? Чорна діра.

Якщо чорна діра належить до подвійної системи, ми можемо виміряти її гравітаційний вплив на видимих компаньйонів, а в деяких рідкісних випадках — навіть визначити її масу. (Про подвійні системи мова піде в наступному розділі).

Замість поверхні в чорній дірі є те, що астрономи називають горизонтом подій, — межа в просторі, на якій сила тяжіння така потужна, що з гравітаційного поля не може вирватися навіть електромагнітне випромінювання. Розумію, що це звучить не дуже переконливо, тому спробуйте уявити чорну діру як важку кулю, що лежить посередині гумового листа. Під вагою кулі гума провисає, чи не

так? Якщо ви не маєте напихвати листа гуми, візьміть стару панчошу або непотрібні колготи і виріжте з них якомога більший квадрат, поклавши у його центр камінчик. Потім підніміть цей клопоть, тримаючи за краї. Ви одразу побачите лійкоподібну западину, схожу на стовп торнадо. Вітаю: ви створили тривимірну версію того, що відбувається в просторі-часі в чотирьох вимірах. Фізики називають цю западину гравітаційним колодязем, бо він точно імітує вплив тяжіння на простір-час. Якщо ви візьмете важчий камінь, отримаєте глибшу западину, а це вказує на те, що масивніші об'єкти викривлюють простір-час ще більше.

Ми можемо мислити тільки в трьох просторових вимірах, тому нам дуже складно уявити, як масивна зоря створює вирву в чотиривимірному просторі-часі. Сприймати гравітацію як викривлення простору-часу навчив нас Альберт Ейнштейн, перетворивши її на питання геометрії, але не тієї, яку ви вивчали в школі.

Наш експеримент із колготами не ідеальний (упевнений, більшість із вас полегшено зітхне). Цьому є безліч причин, але головна полягає в тому, що неможливо уявити кульку, яка рухається стабільною орбітою навколо утвореного каменем гравітаційного колодязя. Проте в реальному астрономічному житті багато об'єктів мільйони й навіть мільярди років зберігають стабільну орбіту, обертаючись навколо масивних тіл. Місяць обертається навколо Землі, Земля — навколо Сонця, а Сонце і ще 100 мільярдів зір — навколо центра нашої Галактики.

З іншого боку, ця демонстрація допомагає наочно уявити чорну діру. Наприклад, ми бачимо: що масивніший об'єкт, то глибший колодязь і то крутіші його стінки, а отже, щоб вибратися з нього, знадобиться більше енергії. Втрачає енергію навіть електромагнітне випромінювання, коли намагається залишити гравітаційне поле масивної зорі, тобто частота випромінювання зменшується, а хвилі стають довшими. Як ви вже знаєте, зміщення в бік електромагнітного спектра з меншою енергією називають червоним зсувом. У випадку з компактною зорею (масивною і маленькою) відбувається червоний зсув під впливом гравітації, що має назву гравітаційне червоне

зміщення (його не слід плутати із червоним зсувом унаслідок ефекту Доплера — див. розділи 2 і 13).

Щоб покинути поверхню планети чи зорі та знову на неї не впасти, потрібно розвинути певну мінімальну швидкість. Це так звана друга космічна швидкість, або швидкість втечі, і для Землі вона становить приблизно 11 кілометрів за секунду. Тому прив'язані до Землі супутники не можуть мати швидкість, що перевищує це значення. Щоб більша друга космічна швидкість, то більше енергії потрібно, щоб залишити поверхню зорі, тому що вона залежить як від швидкості втечі, так і від маси об'єкта (m), який утікає (потрібна кінетична енергія дорівнює $\frac{1}{2}mv^2$).

Сподіваюсь, ви зможете уявити, що коли гравітаційний колодезь буде дуже-дуже глибокий, то швидкість втечі з його дна може стати більшою за швидкість світла. Оскільки таке неможливо, отже, із цього глибокого гравітаційного колодезя ніщо не вибереться, навіть електромагнітне випромінювання.

Фізик на ім'я Карл Шварцшильд розв'язав рівняння загальної теорії відносності Ейнштейна й обчислив, яким має бути радіус сфери з певною масою, щоб утворився колодезь, звідки не зможе вирватися навіть світло, — чорна діра. Він відомий як радіус Шварцшильда, і його значення залежить від маси об'єкта. По суті, це радіус того, що ми називаємо горизонтом подій.

Саме рівняння приголомшливо просте, але виконується тільки для чорних дір, що не обертаються (їх часто називають чорними дірами Шварцшильда¹⁹). Рівняння містить добре відомі константи, і в результаті ми отримуємо радіус, лише трохи більший за три кілометри в розрахунку на одну масу Сонця. Таким чином, розмір — тобто радіус горизонту подій — чорної діри, скажімо, в 10 разів важчої за Сонце, приблизно дорівнює 30 кілометрів. Також ми можемо обчислити радіус горизонту подій чорної діри з масою Землі — він буде трохи менший за 1 сантиметр. Проте доказів того, що такі чорні діри існують, немає. Отже, якби маса Сонця зосередилася у сфері радіуса приблизно 6 кілометрів, чи було б це схоже на нейтронну зорю? Ні, під впливом гравітаційного притягання такої величезної маси, утиснутої в таку малесеньку сферу, матерія Сонця перетворилася б на чорну діру.

Задовго до Ейнштейна, у 1748 році, англійський філософ і геолог Джон Мітчелл показав, що можуть існувати зорі з таким потужним гравітаційним притяганням, що світло не може вирватися звідти. За допомогою простої ньютонівської механіки (будь-хто з моїх першокурсників зробить це за півхвилини) він отримав такий само результат, як і Шварцшильд: якщо маса зорі в N разів більша за масу Сонця, а її радіус менший ніж $3N$ кілометрів, світло не зможе покинути її. За дивовижним збігом, загальна теорія відносності і простий ньютонівський підхід дають однаковий результат.

У центрі сферичного горизонту подій лежить так звана сингулярність — точка з нульовим об'ємом і нескінченно великою густиною — химерна річ, яка показує розв'язок рівнянь, а не щось, що ми можемо збагнути. Ніхто нічого не знає про сингулярність, попри деякі спроби уявити її. Не існує (поки що) фізичних законів, які могли б описати це поняття.

В інтернеті можна побачити купу анімованих відеороликів, у яких ідеться про чорні діри; більшість прекрасна та зловісна водночас, але майже всі неосяжні і натякають на руйнування в космічних масштабах. Тому коли журналісти почали писати, що найбільший у світі прискорювач частинок, Великий адронний колайдер (БАК) Європейської організації з ядерних досліджень (CERN), установлений неподалік Женеви, може створити чорну діру, це викликало серйозне занепокоєння в суспільстві, що фізики забавляються майбутнім планети.

Та чи справді це так? Якби вони *дійсно* випадково створили чорну діру — чи почала б вона пожирати Землю? Ми можемо це досить просто обчислити. Під час експериментів 30 березня 2010 року зустрічні пучки протонів у БАК зіштовхувалися з енергією 7 тераелектрон-вольтів (TeV), або 7 трильйонів електрон-вольтів, тобто по 3,5 трильйона на кожний пучок. Урешті-решт науковці, які працюють з БАК, планують досягти енергетичного рівня 14 TeV, що виходить далеко за межі сьогоденних можливостей. Маса протона приблизно $1,6 \cdot 10^{-24}$ грамів. Фізики часто кажуть, що маса протона m приблизно дорівнює 1 мільярд електрон-вольтів, або 1 GeV. Звісно, GeV — це одиниця енергії, а не маси, але оскільки $E = mc^2$ (де c — швидкість світла), E часто називають «масою». На Массачусетській платній

автомагістралі встановлено знаки: «Телефонуй 511 — інформація щодо проїзду». Щоразу, як я їх бачу, згадую про електрони, тому що маса одного електрона 511 кеВ.

Якби всі 14 ТеВ від зіткнення протонів пішли на формування чорної діри, її маса була б у 14 000 разів більша за масу протона, тобто приблизно $2 \cdot 10^{-20}$ грамів. Сила-силенна фізиків і спостережних комісій опрацювала гори літератури із цього питання, оприлюднила результати й дійшла висновку, що немає про що хвилюватися. Ви хочете знати чому? Резонно. Що ж, аргументи були такі.

По-перше, сценарії, за якими ВАК вистачить енергії для створення таких крихітних чорних дір (відомих як мікроскопічні чорні діри), спираються на теорію так званих великих додаткових вимірів, що вважається, м'яко кажучи, надто спекулятивною. Ця теорія виходить далеко за межі експериментально підтверджених явищ. Тому можна почати з того, що шанси створити мікроскопічну чорну діру мізерні.

Безумовно, виникали побоювання, що ці мікроскопічні чорні діри якимось чином можуть виявитися стабільними «акреторами» — об'єктами, здатними збирати речовину, втягувати її в себе й рости, — і почнуть поглинати навколишню матерію, а потім врешті-решт і Землю. Але якби стабільні чорні мікродіри існували, то вже були б створені космічними променями надзвичайно високих енергій (а вони існують), які вриваються в нейтронні зорі та білі карлики, де вони і поселилися б. Але білі карлики й нейтронні зорі, судячи з усього, залишаються незмінними сотні мільйонів, якщо не мільярдів років, тому навряд чи вони мають крихітні чорні діри, які пожирають їх ізсередини. Інакше кажучи, стабільні мікроскопічні чорні діри, схоже, не несуть жодної загрози.

З іншого боку, без теорії додаткових вимірів навіть саме існування чорних дір, маса яких менше ніж $2 \cdot 10^{-5}$ грамів (її називають планківською масою), неможливе. Тобто в нас ще немає фізики, яку можна було б застосувати до чорних дір такої малої маси. Нам знадобиться теорія квантової гравітації, якої не існує. Тому запитання про те, яким буде радіус Шварцшильда для чорної діри масою $2 \cdot 10^{-20}$ грамів, також позбавлене сенсу.

Як показав Стівен Гокінг, чорні діри можуть випаровуватися: що менша їхня маса — то швидше. Чорна діра, маса якої в 30 разів більша

за масу Сонця, випарується приблизно за 10^{71} років. Надмасивна чорна діра, у мільярд разів важча за Сонце, проіснує 10^{93} років. Можливо, тепер вам цікаво, за скільки часу випарується мікроскопічна чорна діра масою $2 \cdot 10^{-20}$ грамів? Це чудове запитання, але відповіді не знає ніхто: теорію Гокінга не можна застосувати до чорних дір, маса яких менша за планківську. Але щоб угамувати вашу цікавість, скажу, що чорна діра масою $2 \cdot 10^{-20}$ грамів прожила б лише 10^{-39} секунд. Схоже, вони випаровуються швидше, ніж утворюються. Одне слово, вони навіть не встигають утворитися.

Нам явно не варто перейматися через мікроскопічні чорні діри масою $2 \cdot 10^{-20}$ грамів, що можуть утворитися у ВАК.

Я розумію, що це не завадило людям позиватися до суду, домагаючись відмови від запуску колайдера. Проте мене непокоїть величезна прірва між ученими й рештою людства, а також те, як паршиво в нас виходить пояснювати, чим ми займаємось. Навіть незважаючи на те, що деякі найкращі фізики у світі дослідили це питання й пояснили, чому колайдер не становить жодної загрози, журналісти й політики вигадують сценарії розвитку подій та розкочегарюють страхи в суспільстві на порожньому місці. На якомусь рівні наукова фантастика видається сильнішою за науку.

Мабуть, немає нічого дивнішого за чорну діру. Нейтронна зоря принаймні заявляє про себе своєю поверхнею. Вона ніби каже: «Я тут і можу показати вам свою поверхню». У чорної діри немає поверхні, і вона взагалі нічого не випромінює (крім досі не виявленого випромінювання Гокінга).

Чому деякі чорні діри, оточені сплющеним кільцем речовини, відомим як акреційний диск (див. наступний розділ), випускають надзвичайно високоенергетичні потоки частинок перпендикулярно до площини акреційного диска, хоча не зсередини горизонту подій²⁰ — досі одна з найвеличніших нерозгаданих таємниць. Подивіться на цей знімок: wired.com/wiredscience/2009/01/spectacular-new.

Дізнатися щось про нутро чорної діри, всередині горизонту подій, ми можемо тільки математичними методами. Оскільки ніщо не може вийти назовні, ми не отримуємо жодної інформації про «інтер'єр» чорної діри — деякі фізики з гумором називають це «космічною

цензурою». Чорна діра ховається у власній печері. Тільки-но ви перекинетесь через горизонт подій, як ніколи не зможете вибратися звідти — навіть не надішлете сигнал. Якщо це буде надмасивна чорна діра, ви цього навіть не помітите. Там немає рівчака, стіни чи виступу, через які потрібно переступити. Коли ви перетнете горизонт, навколо вас не відбудеться жодних різких змін. Попри всю релятивістську фізику, якби ви поглянули на годинник, не побачили б, що він зупинився або став іти швидше чи повільніше.

Для віддаленого спостерігача все виглядатиме зовсім по-іншому. Він бачить не вас. Його очі сприймають ваше *зображення*, яке доносить світло, що відбивається від вашого тіла й виривається із гравітаційного колодязя чорної діри. З наближенням до горизонту подій колодязь дедалі глибшає. Світлу доводиться витратити більше енергії, щоб виринути з колодязя, і воно зазнає дедалі більшого гравітаційного червоного зміщення. Усе електромагнітне випромінювання зміщується в бік довших хвиль (нижчих частот). Ваше зображення ставатиме дедалі червонішим, а потім ви зникнете, тому що випромінювання від вас зміститься до довших хвиль, в інфрачервону частину спектра, а згодом — до чимраз довших радіохвиль, і щойно ви перетнете горизонт подій, довжина хвиль стане нескінченністю. Тому для віддаленого спостерігача ви фактично зникнете ще до того, як перетнете межу.

Також віддалений спостерігач виявить дещо дуже непередбачуване: світло, що надходить із простору навколо чорної діри, рухається повільніше. Так от, це зовсім не суперечить теорії відносності: для спостерігача біля чорної діри світло досі рухатиметься з тією самою швидкістю c (приблизно 300 000 кілометрів за секунду). Але для віддаленого спостерігача швидкість світла буде менша за c . Ваше зображення, створене світлом, яке ви відбиваєте, доходитиме до спостерігача повільніше, ніж якби ви були не поблизу чорної діри. Це призведе до дуже цікавого ефекту: спостерігач бачить, що коли ви наближаєтеся до горизонту подій, то уповільнюєтеся! Світло від вас надходитиме до нього з дедалі більшими інтервалами, тому здаватиметься, наче ви рухаєтеся в уповільненому темпі. Для спостерігача на Землі ваша швидкість, ваші рухи, ваш годинник, і навіть пульс уповільнюватимуться з вашим наближенням до

горизонту подій і повністю зупиняться в той момент, коли ви його досягаєте. Якби світло від вас біля горизонту подій не ставало невидимим через гравітаційне червоне зміщення, для спостерігача ваше зображення «застигло» б навіки на поверхні горизонту подій.

Для простоти я знехтував ефектом Доплера, який буде величезним, тому що ваша швидкість постійно зростатиме. По суті, ви перетинатимете горизонт подій зі швидкістю світла. (Для спостерігача на Землі ефект Доплера буде схожий на ефект гравітаційного червоного зміщення).

Перетнувши горизонт подій, ви вже не зможете спілкуватися із зовнішнім світом, але зможете спостерігати за ним. Унаслідок гравітаційного зміщення світло ззовні матиме вищу частоту й меншу довжину хвилі, тому ви бачитимете Всесвіт у фіолетовому зміщенні. (Із цієї ж причини те саме сталось би, якби ви змогли стояти на поверхні нейтронної зорі). Але оскільки ви падаєте з величезною швидкістю, зовнішній світ віддалятиметься від вас, і світло від нього матиме червоний зсув (через ефект Доплера). Отже, який буде результат? Що переможе — фіолетове зміщення чи червоний зсув? Чи не переможе жодне?

Я запитав про це в Ендрю Гемілтона з Університету Колорадо (JILA), одного з найкращих у світі знавців чорних дір, і, як я й очікував, відповідь не така проста. Для тіла у стані вільного падіння червоне й фіолетове зміщення більш-менш нейтралізують одне одного, але зовнішній світ згори і знизу матиме червоне зміщення, а в горизонтальному напрямку — фіолетове. (Можливо, вам сподобаються його фільми із циклу «Подорож у чорну діру Шварцшильда» (Journey into a Schwarzschild black hole), що розповідають, як це — бути тілом, що падає в чорну діру: jila.colorado.edu/~ajsh/insidebh/schw.html).

Утім вам не буде де стати, тому що там немає поверхні. Уся речовина, з якої створено чорну діру, стиснулася до розмірів точки, до сингулярності. А як щодо припливних сил? Чи не розірвало б вас на шматочки через те, що на вашу голову й пальці ніг діятиме різна гравітаційна сила? (Такий само ефект спостерігається на Землі: на бік, повернутий до Місяця, впливає більша сила тяжіння, ніж на протилежний бік; цим пояснюються припливи й відпливи).

Саме так, вас пошматувало б. Чорна діра Шварцшильда, втричі важча за Сонце, розірвала б вас за 0,15 секунди до того, як ви перетнете горизонт подій. Це явище має дуже колоритну назву — спагетифікація; воно передбачає розтягування тіла до немислимих меж. Щойно ви перетнете горизонт подій, різні частини вашого тіла досягнуть точки сингулярності приблизно за 0,00001 секунди, і вас зіжмакає в точку нескінченної густини. А якщо чорна діра в 4 мільйони разів важча за Сонце, на зразок тієї, що розташована в центрі нашої Галактики, ви перетнете горизонт подій без жодних проблем, принаймні спочатку, але рано чи пізно вас порве на спагеті. (Повірте, станеться це радше «рано», тому що у вас до цього залишатиметься лише приблизно 13 секунд, а потім, за 0,15 секунди, ви досягнете сингулярності).

Як саме явище чорні діри здаються чудними будь-кому, а особливо астрофізикам, які їх досліджують (зокрема, мої колишні аспіранти Джеффри Макклінток і Джон Міллер). Нам відомо, що існують чорні діри з масою зорі. Їх відкрили в 1971 році, коли оптичні астрономи показали, що Лебідь X-1 — подвійна система, а одна з двох зір — чорна діра! Про це я розповім у наступному розділі. Готові?

19 У чорних дір, що обертаються, горизонт подій не сферичний, а сплюснутий — ширший біля екватора.

20 У 2019 році було одержано перше в історії зображення горизонту подій — видимої межі чорної діри в сузір'ї Діви, віддаленої від нас більше ніж на 50 мільйонів світлових років. Її маса перевищує масу Сонця в 6,5 мільярда разів, а діаметр горизонту подій становить 20 мільярдів кілометрів, що більше ніж утричі перевищує відстань від Сонця до Плутона. — *Прим. наук. ред.*

Небесний балет

Вас уже не здивує той факт, що більшість зір, які ви бачите на небі в будь-який телескоп чи без нього, — не просто віддалені версії добре знайомого нам Сонця. Вони значно складніші. Можливо, ви не знали, що приблизно третина того, що ви спостерігаєте, навіть не поодинокі зорі, а так звані подвійні системи — пов'язані силами тяжіння пари зір, що обертаються одна навколо одної. Інакше кажучи, коли ви дивитесь на нічне небо, приблизно третина зір, які ви бачите, подвійні, навіть якщо зовні вони схожі на поодинокую зорю. Існують навіть потрійні зоряні системи, в яких три зорі обертаються одна навколо одної, хоча їх набагато менше. Багато яскравих рентгенівських джерел у нашій Галактиці виявилися подвійними зорями, тому я часто мав з ними справу. Вони дивовижні.

Обидві зорі, що входять до подвійної системи, обертаються навколо так званого центра мас системи — точки, розташованої між ними. Якщо зорі мають однакову масу, то цей центр перебуватиме на однаковій відстані від центра обох, а якщо маса різна — ближче до масивнішої зорі. Оскільки обидві зорі здійснюють повний оберт за однаковий час, у більш масивної зорі повинна бути нижча орбітальна швидкість.

Щоб унаочнити цей принцип, уявіть гриф гантелі з дисками однакової маси, що обертаються навколо своєї середньої точки. А тепер уявіть гантель, у якої на одному кінці один кілограм, а на другому — п'ять. Центр мас цієї гантелі буде ближче до важчого кінця, тому коли вона обертатиметься, у важчого диска буде менша орбіта, а легшому за той самий час доведеться пройти більшу відстань. Якщо замість дисків уявити зорі, ви побачите, що легша зоря мчатиме орбітою в п'ять разів швидше за свою громіздкішу компаньйонку.

Якщо одна із зір значно масивніша за другу, центр мас системи може навіть лежати всередині масивнішої зорі. У випадку Землі й Місяця (які теж утворюють подвійну систему) центр мас розташований у надрах Землі на глибині приблизно 1600 кілометрів. (Я згадую про це в додатку 2).

Сіріус, найяскравіша зоря на небі (віддалена приблизно на 8,6 світлового року), також є подвійною системою, що складається із двох зір, відомих як Сіріус А і Сіріус В. Вони роблять повний оберт навколо спільного центра мас приблизно за 50 років (це їхній період обертання).

Як розпізнати подвійну зорю? Побачити її нарізно неозброєним оком неможливо. Утім залежно від відстані до подвійної зорі й потужності використовуваних телескопів, часом ми можемо одержати візуальне підтвердження, побачивши дві зорі окремо.

Відомий німецький математик і астроном Фрідріх Вільгельм Бессель передбачив, що найяскравіша зоря на небі, Сіріус, є подвійною і складається з видимої та невидимої зір. Такого висновку він дійшов, спираючись на свої точні астрономічні спостереження: у 1838 році Бессель першим виміряв паралакс зорі (трохи випередивши Гендерсона — див. розділ 2). У 1844 році у знаменитому листі Александру фон Гумбольдту він писав: «Я дотримуюся переконання, що зоря Сіріус — подвійна система, що складається з видимої та невидимої зір. Немає причин вважати, що світність є невід'ємною ознакою космічних тіл. Видимість незліченної кількості зір не виключає невидимості безлічі інших». Це надзвичайно глибока думка. Зазвичай ми не віримо в існування того, чого не бачимо. Бессель започаткував так звану астрономію невидимого.

«Невидиму» зорю-компаньйона (Сіріус В) по-справжньому *побачили* тільки в 1862 році, коли в моєму рідному місті Кембридж (штат Массачусетс) Алван Кларк випробовував новісінький 18,5-дюймовий телескоп (це був найбільший на той час телескоп, виготовлений компанією його батька). Щоб протестувати телескоп, він спрямував його на Сіріус, який сховався над обрисами Бостона, і виявив Сіріус В, який у 10 000 разів тьмяніший, ніж Сіріус А.

Хвала небесам за астроспектроскопію: фіолетове і червоне зміщення

Щоб визначити, чи входять зорі до подвійної системи, особливо якщо вони віддалені, найчастіше застосовують спектроскопію та вимірюють зміщення, що виникає в результаті так званого ефекту Доплера.

Спектроскопія чи не найпотужніший інструмент астрофізики, а ефект Доплера — одне з найважливіших астрономічних відкриттів за останні кілька століть.

Ви вже знаєте, що об'єкти з достатньо високою температурою випромінюють видиме світло (випромінювання чорного тіла). Розкладаючи сонячне світло, дощові краплі, що утворюють веселку (див. розділ 5), демонструють неперервну послідовність кольорів від червоного до фіолетового, яку називають спектром. Якщо розкласти світло від зорі, ми також побачимо спектр, але його кольори не завжди матимуть однакову інтенсивність. Прохолодніша зоря, наприклад, буде червонішою (і її спектр також). Температура Бетельгейзе (в сузір'ї Оріона) лише 2000 кельвінів. Це одна з найчервоніших зір на небі. З іншого боку, Беллатрікс, також у сузір'ї Оріона, має температуру 28 000 кельвінів. Це одна з найбільш блакитних і найяскравіших зір, яку часто називають «Зірка амазонок».

Якщо уважно придивитися до зоряних спектрів, можна побачити вузькі проміжки, на яких кольори слабкі або взагалі відсутні. Це лінії поглинання. У спектрі Сонця таких ліній тисячі. Вони з'являються через те, що в атмосфері зір присутні багато різних елементів. Атоми, як ви знаєте, складаються з ядра й електронів. Електрони не можуть мати якусь довільну кількість енергії. Вони перебувають на енергетичних рівнях з певними дискретними значеннями — їхня енергія не може бути проміжною на цих визначених рівнях. Інакше кажучи, їхня енергія «квантована» — це поняття дає початок квантовій механіці.

Атом нейтрального водню має один електрон. Якщо опромінювати його світлом, цей електрон може перестрибнути на вищий енергетичний рівень, поглинувши енергію світлового фотона. Але через дискретність енергетичних рівнів електрона станеться це не з будь-якими фотонами, а лише з тими, що мають конкретну енергію (а отже, конкретну частоту і довжину хвилі), що дозволить електрону здійснити квантовий стрибок з одного рівня на інший. Цей процес, що називають резонансним поглинанням, знищує фотони, і тому їхні частоти відсутні в неперервному спектрі. Такі пропуски називають лініями поглинання.

Водень може створити у видимій частині зоряного спектра чотири лінії поглинання (на точно відомих довжинах хвилі, тобто кольорах). Більшість елементів утворює значно більше ліній, тому що їхні атоми містять набагато більше електронів. По суті, кожному елементу властиве унікальне поєднання ліній поглинання, за яким їх можна ідентифікувати. Вони дуже добре вивчені й виміряні в лабораторіях. Отже, ретельно дослідивши лінії поглинання в зоряних спектрах, ми можемо визначити, які елементи є в атмосфері зорі.

Утім, коли зоря рухається від нас, унаслідок ефекту Доплера весь її спектр (включно з лініями поглинання) зміщується в червоний бік (це так званий червоний зсув). Якщо спектр, навпаки, зміщується у фіолетовий бік, то зоря рухається до нас. Точно вимірявши, наскільки змістилися лінії поглинання, ми можемо обчислити швидкість зорі відносно Землі.

Якщо ми спостерігаємо, наприклад, подвійну систему, кожна зоря буде половину орбіти рухатися до нас, а другу половину — від нас. З її зорею-компаньйоном усе буде точнісінько навпаки. Якщо обидві зорі досить яскраві, ми побачимо в спектрі червоне і блакитне зміщення ліній поглинання. Це означатиме, що перед нами подвійна зоря. Але лінії поглинання зміщуватимуться в спектрі внаслідок руху зорі вздовж орбіти. Наприклад, якщо період обертання зорі становить двадцять років, кожна лінія поглинання пройде повний шлях за цей термін (десять років спостерігатиметься червоне зміщення, і ще десять — фіолетове).

Якщо ми бачимо тільки червоне (або тільки фіолетове) зміщення ліній спектра, то все одно можемо зробити висновок, що це подвійна зоря, якщо лінії рухаються то в один, то в інший бік. Час, за який лінії проходять повний цикл, буде періодом обертання зорі. Коли таке відбувається? У випадку, якщо одна зоря занадто тьмяна, щоб її можна було побачити із Землі у видимих променях.

А тепер повернімося до наших рентгенівських джерел.

Шкловський і не тільки

У далекому 1967 році радянський фізик Йосип Шкловський запропонував модель для джерела Скорпіон Х-1. «За всіма

характеристиками, ця модель відповідає нейтронній зорі в стані акреції. [...] Природна й дуже ефективна подача речовини для такої акреції відбувається за рахунок потоку газу, що перетікає від вторинного компонента тісної подвійної системи до первинного, який є нейтронною зорею».

Розумію, що ці рядки, можливо, не приголомшать вас. Цьому не сприяє і те, що сформульовані вони досить сухою технічною мовою астрофізики. Але саме так розмовляють між собою фахівці практично в будь-якій сфері. Моя мета на лекціях і головна причина, чому я написав цю книжку, — перекласти справді приголомшливі, новаторські, а часом навіть революційні відкриття моїх колег-фізиків такою мовою, яку зможуть збагнути розумні й допитливі аматори, тобто збудувати міст між світом науковців і вашим світом. Здається, багато хто з нас надає перевагу тому, щоб говорити тільки з колегами, і тому більшості людей — навіть тим, хто дуже хоче зрозуміти науку, — надзвичайно складно потрапити в наш світ.

Отже, візьмімо ідею Шкловського й погляньмо, що він запропонував: подвійна зоряна система, що складається з нейтронної зорі та зорі-компаньйона, речовина з якої перетікає на нейтронну зорю. У такому разі нейтронна зоря буде «в стані акреції». Інакше кажучи, вона прирощуватиме речовину від компаньйона — зорі-донора. Дивна ідея, еге ж?

Як виявилось, Шкловський мав рацію. Але ось що цікаво: він говорив тільки про Скорпіон Х-1, і більшість з нас не надто серйозно сприйняла його ідею. Але таке часто стається з теоріями. Я не думаю, що ображу своїх колег-теоретиків, якщо скажу, що в астрофізиці переважна кількість теоретичних припущень виявляються помилковими. Тому ті, хто працює в царині спостережної астрофізики, зазвичай не звертають на них особливої уваги.

Виявляється, що акреціювальні нейтронні зорі створюють ідеальні умови для виникнення рентгенівських променів. А як ми з'ясували, що Шкловський не помилявся?

Тільки на початку 1970-х астрономи визнали подвійну природу деяких рентгенівських джерел, але це не означало, що всі вони були акреціювальними нейтронними зорями. Першим свої таємниці відкрило джерело Лебідь Х-1, і воно виявилось одним з

найважливіших у рентгенівській астрономії. Відкрили його під час польоту ракети в 1964 році. Це надзвичайно яскраве й потужне джерело випромінювання і досі привертає увагу рентгенівських астрономів.

Потім, у 1971 році, радіоастрономи зафіксували радіохвилі від Лебідь X-1. Їхні радіотелескопи визначили розташування джерела в межах ділянки неба (квадрата похибки) площею приблизно 350 квадратних кутових секунд, що в 20 разів менше, ніж квадрат похибки, який отримують, відстежуючи рентгенівське випромінювання. Астрономи почали шукати його оптичний відповідник. Інакше кажучи, вони хотіли *побачити* у видимому світлі зорю, яка створювала ці загадкові рентгенівські промені.

У межі квадрата похибки потрапив дуже яскравий блакитний надгігант, відомий як HDE 226868. З огляду на те, що це була зоря, астрономи могли порівняти її з іншими дуже схожими зорями й досить точно обчислити масу. П'ять астрономів, зокрема і всесвітньо відомий Алан Сендидж, дійшли висновку, що HDE 226868 просто «звичайний надгігант класу B0, без якихось особливостей», відкинувши припущення, що це оптичний відповідник джерела Лебідь X-1. Утім інші (на той час не такі відомі) оптичні астрономи дослідили зорю ретельніше і зробили кілька надзвичайно важливих відкриттів.

Вони виявили, що ця зоря входить до подвійної системи з періодом обертання 5,6 дня. Сильний потік рентгенівського випромінювання від цієї подвійної системи, як вони правильно визначили, зумовлений акрецією газу від оптичної зорі (донора) на дуже малий — компактний — об'єкт. Тільки перетікання газу на масивний, але дуже маленький об'єкт могло пояснити щедрий потік випромінювання.

Вони виміряли зміщення ліній поглинання в спектрі зорі-донора під час її руху вздовж орбіти (пригадуєте: коли вона рухається до Землі, лінії спектра зміщуються у фіолетовий бік, а коли від Землі — у червоний) і дійшли висновку, що зоря-компаньйон, джерело рентгенівського випромінювання, занадто масивна, щоб бути нейтронною зорею або білим карликом (інший тип компактної, дуже щільної зорі, схожої на Сіріус B). Ну, якщо це ні те ні інше і щось навіть масивніше за нейтронну зорю, що ж це могло бути? Звісно, чорна діра! Саме це вони і припустили.

Утім, будучи вченими-спостерігачами, вони сформулювали свої висновки обережніше. Луїза Вебстер і Пол Мердін, чий звіт було опубліковано в журналі Nature від 7 січня 1972 року, висловилися так: «Оскільки маса зорі-компаньйона, очевидно, більше ніж дві маси Сонця, отже, ми припускаємо, що цей об'єкт може бути чорною дірою». А ось що написав Том Болтон за місяць у Nature: «Це дозволяє говорити про реальну можливість того, що вторинний компонент [акретор] — чорна діра». У вклейці ви можете побачити художнє зображення джерела Лебідь X-1.

Таким чином, три чудові астрономи — Вебстер і Мердін із Великої Британії та Болтон із Торонто — спільно відкрили рентгенівські подвійні зорі та знайшли першу чорну діру в нашій Галактиці. (Болтон так цим пишався, що кілька років їздив на машині з номерним знаком Cug X-1²¹).

Мені завжди видавалося дивним, що їм не присудили жодної важливої премії за це феноменальне відкриття. Урешті-решт, вони поцілили в яблучко, і були *першими*! Вони заскочили першу рентгенівську подвійну зорю. І заявили, що акретором може бути чорна діра. Чудова робота!

У 1975 році не хто інший, як сам Стівен Гокінг, побився об заклад із другом, фізиком-теоретиком Кіпом Торном, що Лебідь X-1 — ніяка не чорна діра, хоча більшість астрономів на той час вважали саме так. Через 15 років Гокінг визнав, що програв парі, думаю, із превеликим задоволенням, бо більшість його досліджень були пов'язані із чорними дірами. За останніми й найточнішими даними, маса чорної діри в Лебідь X-1 приблизно становить 15 мас Сонця (мені це відомо із приватної розмови з Джеррі Оросом і моїм колишнім студентом Джеффом Макклінтоком).

Уважні читачі вже, напевно, подумали: «Стривайте-но! Щойно ви сказали, що чорні діри нічого не випромінюють і ніщо не може вирватися з їхнього гравітаційного поля. Як вони можуть бути джерелами рентгенівських променів?». Чудове запитання, на яке я обіцяю відповісти, але спершу анонс: рентгенівські промені виходять не із простору, обмеженого горизонтом подій, — їх випромінює речовина, що падає в чорну діру. Хоча чорна діра пояснювала те, що ми бачили, спостерігаючи за джерелом Лебідь X-1, вона не могла

пояснити особливостей рентгенівського випромінювання від інших подвійних зір. Для цього були потрібні нейтронні зорі, які виявили за допомогою чудового супутника «Ухуру» (Uhuru).

У грудні 1970 року на орбіту вийшов перший супутник, призначений тільки для спостереження за рентгенівським випромінюванням. Запустили його з полігону в Кенії в сьому річницю її незалежності, і назвали «Ухуру», що мовою суахілі означає «свобода».

«Ухуру» став початком революції, що триває й досі. Подумайте, які можливості дає супутник: спостереження 365 днів на рік, 24 години на добу, без жодних атмосферних перешкод! «Ухуру» міг здійснювати такі спостереження, про які ми півтора десятка років тому могли лише мріяти. Трохи більше ніж за два роки супутник обстежив небо за допомогою лічильників, здатних уловлювати джерела, в 500 разів слабкіші за Крабоподібну туманність і в 10 000 разів — за Скорпіон Х-1. Він виявив 339 джерел (ми до того відкрили лише кілька десятків) і дозволив скласти першу повну карту неба в рентгенівському спектрі.

Нарешті звільнивши нас від пут атмосфери, орбітальні обсерваторії геть змінили наше уявлення про Всесвіт, бо ми навчилися бачити глибокий космос з усіма його дивовижними об'єктами в усіх частинах електромагнітного спектра. Космічний телескоп «Габбл» розширив наші уявлення про оптичний всесвіт, тоді як низка рентгенівських обсерваторій — про всесвіт у рентгенівських променях. А зараз гамма-обсерваторії досліджують всесвіт на ще вищих енергетичних рівнях.

У 1971 році «Ухуру» виявив пульсації джерела Кентавр Х-3 (у сузір'ї Кентавра) з періодом 4,84 секунди. У межах одного дня супутник спостерігав, як інтенсивність рентгенівського випромінювання змінилася в 10 разів приблизно за годину. Період пульсацій спершу скоротився, а потім зріс приблизно на 0,02 і 0,04 відсотка, і кожна зміна періоду відбувалася приблизно за годину. Усе це було надзвичайно захопливо, але водночас неабияк спантеличувало. Пульсації не могли виникати через обертання нейтронної зорі; їхній період стабільний. Жоден з відомих пульсарів не міг за годину змінити період обертання на 0,04 відсотка.

Пазл було складено, коли пізніше група, яка аналізувала дані з «Ухуру», виявила, що Кентавр Х-3 — це подвійна зоря з періодом обертання 2,09 дня. Пульсації з періодом 4,84 секунди — наслідок

обертання нейтронної зорі, на яку відбувається акреція. Докази були незаперечними. По-перше, дослідники чітко побачили повторювані затемнення (кожні 2,09 дня), коли нейтронна зоря ховалася за зорею-донором, яка блокувала рентгенівські промені. І по-друге, їм вдалося виміряти зміну періоду пульсації внаслідок ефекту Доплера. Коли нейтронна зоря наближається до нас, період пульсації трохи коротший, а коли віддаляється — трохи довший. Ці неймовірні результати було опубліковано в березні 1972 року. Вони стали логічним поясненням незрозумілих явищ, описаних у звіті 1971 року. Це точно повторювало модель, яку Шкловський запропонував для джерела Скорпіон X-1: подвійна система, що складається із зорі-донора й акреціювальної нейтронної зорі.

Пізніше того самого року група Джакконі виявила ще одне джерело з пульсаціями і затемненнями — Геркулес X-1. Ще одна рентгенівська подвійна система з нейтронною зорею!

Це були просто приголомшливі відкриття, які докорінно змінили рентгенівську астрономію і визначили напрямок досліджень на кілька наступних десятиліть. Рентгенівські подвійні зорі дуже рідкісні: можливо, лише одна зі ста мільйонів подвійних зір у нашій Галактиці є рентгенівською подвійною. А проте зараз ми знаємо, що наша Галактика налічує кілька сотень рентгенівських подвійних зір. У більшості випадків компактний об'єкт (акретор) — білий карлик або нейтронна зоря, але також відомі принаймні два десятки систем, у яких акретором є чорна діра.

Пам'ятаєте змінність густини потоку випромінювання з періодом 2,3 хвилини, які виявила моя група в 1970 році (до запуску «Ухуру»)? Тоді ми не мали жодного уявлення, що означають ці зміни. Що ж, тепер нам відомо, що GX 1+4 — це рентгенівська подвійна система з періодом обертання майже 304 дні, а акреціювальна нейтронна зоря обертається з періодом приблизно 2,3 хвилини.

Як улаштовані рентгенівські подвійні зорі

Коли нейтронна зоря утворює пару із зорею-донором потрібного розміру, розташованою на потрібній відстані, вона може влаштувати яскраве видовище. Десь далеко у Всесвіті зорі, про існування яких сер

Ньютон навіть не здогадувався, виконують прекрасний танець, нерозривно переплетений із законами класичної механіки, які зрозумілі будь-якому студенту-природничнику.

Щоб було зрозуміліше, почнімо зі спорідненого прикладу. Земля й Місяць утворюють подвійну систему. Якщо з'єднати центр Землі із центром Місяця, на цій лінії буде точка, де сила притягання, спрямована до Місяця, рівна, але протилежно спрямована до сили притягання до Землі. Якби ви там опинилися, рівнодійна сил, які діють на вас, дорівнювала б нулю. З одного боку від цієї точки ви почали б падати на Землю, а з другого — на Місяць. У цієї точки є назва — внутрішня точка Лагранжа. Звісно, вона розташована ближче до Місяця, тому що його маса приблизно у 80 разів менша, ніж маса Землі.

А тепер повернімося до рентгенівських подвійних систем, до яких входить акреціювальна нейтронна зоря та значно більша зоря-донор. Якщо ці зорі розташовані дуже близько одна до одної, внутрішня точка Лагранжа може лежати нижче поверхні зорі-донора. Тоді на частину речовини зорі-донора діятиме сила притягання до нейтронної зорі, яка перевищує силу тяжіння самої зорі, спрямовану до її центра. У результаті речовина — розжарений газ — перетікатиме із зорі-донора на нейтронну зорю.

Оскільки зорі обертаються навколо спільного центра мас, речовина не може падати прямо на нейтронну зорю. Перш ніж досягти поверхні, розжарений газ потрапляє на орбіту навколо нейтронної зорі, утворюючи диск, що обертається. Його називають акреційним диском. Частині газу із внутрішніх шарів диска зрештою вдається впасти на поверхню нейтронної зорі.

Далі до гри долучається цікаве фізичне явище, з яким ви вже ознайомилися в іншому контексті. Оскільки газ дуже гарячий, він іонізований, тобто складається з позитивно заряджених протонів і негативно заряджених електронів. А нейтронні зорі мають дуже потужне магнітне поле, тому заряджені частинки рухаються вздовж його магнітних ліній, і більшість плазми врешті-решт потрапляє на магнітні полюси зорі, як полярне саяво на Землі. Поверхня нейтронної зорі біля магнітних полюсів (де в неї вривається речовина) розжарюється до мільйонів кельвінів та випромінює рентгенівські

промені. А через те що магнітні полюси зазвичай не збігаються із полюсами осі обертання (див. розділ 12), ми спостерігаємо рентгенівський потік на Землі, тільки коли розжарена пляма повернута в наш бік. Нейтронна зоря обертається, тому з'являється ефект пульсації.

У будь-якій рентгенівській подвійній системі навколо компактного об'єкта — нейтронної зорі, білого карлика або, як у випадку з Лебідь X-1, чорної діри — обертається акреційний диск. Акреційні диски — одні з найдивовижніших утворень у Всесвіті, але майже ніхто, крім астрономів-професіоналів, про них ніколи не чув.

Акреційні диски було виявлено навколо всіх рентгенівських подвійних систем із чорної дірою. Їх мають навіть надмасивні чорні діри в центрі багатьох галактик, хоча, судячи з усього, це, мабуть, не стосується чорної діри в центрі нашої Галактики.

Дослідження акреційних дисків стало окремою галуззю сучасної астрофізики. Ви можете побачити їхні дивовижні зображення, ввівши в пошуковик гугла словосполучення «X-ray binaries». Ми ще багато чого не знаємо про акреційні диски. Найбільше нас бентежить те, що ми досі не цілком розуміємо, як речовина з акреційного диска потрапляє на компактний об'єкт. Крім того, до кінця не з'ясовано природу непостійності в акреційних дисках, яка викликає змінність потоку речовини на компактний об'єкт і змінність світності рентгенівського випромінювання. Також дуже мало відомо про радіострумені, наявні в кількох рентгенівських подвійних системах.

Зоря-донор може передавати нейтронній зорі до 10^{18} грамів речовини за секунду. Здається, наче це багато, але навіть такими темпами на те, щоб передати кількість матерії, що становить масу Землі, знадобиться 200 років. Речовина з диска перетікає на зорю-акретор під владою її потужного гравітаційного поля, що розганяє її до неймовірних швидкостей — від третини до половини швидкості світла. Гравітаційна потенціальна енергія, яку вивільняє речовина, перетворюється на кінетичну (орієнтовно $5 \cdot 10^{30}$ ватів) і розжарює стрімкий потік газу до мільйонів градусів.

Як ви знаєте, нагріта матерія випромінює тепло (це називають випромінюванням чорного тіла — про нього йтиметься в розділі 14). Що вища температура, то більша енергія випромінювання, а це

означає коротші хвилі та вищу частоту. Коли речовина нагрівається від 10 мільйонів до 100 мільйонів кельвінів, то більшість її випромінювання — рентгенівське. Майже всі $5 \cdot 10^{30}$ ватів вивільняються у вигляді рентгенівського випромінювання. Порівняйте це із загальною світністю Сонця — $4 \cdot 10^{26}$ ватів, з яких лише 10^{20} ватів припадає на рентгенівське випромінювання. Поверхня нашого Сонця просто крижана порівняно із цією речовиною.

Самі нейтронні зорі занадто маленькі, щоб їх було видно, зате ми можемо побачити в оптичний телескоп значно більші зорі-донори й акреційні диски. Останні можуть випромінювати досить багато світла, частково внаслідок процесу, який називається рентгенівським розжарюванням. Коли речовина з диска на величезній швидкості падає на поверхню нейтронної зорі, рентгенівські промені, що утворюються в результаті, розлітаються навсібіч, при цьому влучаючи в сам диск і нагріваючи його ще сильніше. Більше про це я розповім у наступному розділі, присвяченому рентгенівським спалахам.

Відкриття рентгенівських подвійних зір стало ключем до розгадки першої таємниці рентгенівського випромінювання поза межами Сонячної системи. Тепер ми розуміємо, чому рентгенівська світність джерела на зразок Скорпіон Х-1 у 10 000 разів перевищує його оптичну світність. Рентгенівські промені йдуть від розжареної (до десятків мільйонів кельвінів) нейтронної зорі, а видиме світло — від значно прохолоднішої зорі-донора й акреційного диска.

Ми вважали, що досить добре розуміємо природу подвійних зір, але на нас чекав ще один сюрприз. Рентгенівські астрономи почали робити відкриття, що випереджали теоретичні моделі.

У 1975 році одна дуже дивна знахідка стала початком найяскравішого періоду в моїй науковій кар'єрі. Я з головою поринув у роботу, що мала на меті виявити, дослідити й пояснити надзвичайне й загадкове явище — рентгенівські спалахи.

Розповідь про рентгенівські спалахи містить мою суперечку з радянськими вченими, які цілком неправильно витлумачили свої дані, а також з деякими колегами з Гарварду, які вважали, що джерело рентгенівських спалахів — дуже масивні чорні діри (бідолашні чорні діри, їх так часто несправедливо в чомусь звинувачують). Вірите чи ні,

але мені навіть телефонували (і не раз) із проханням не публікувати деяких даних про спалахи з міркувань національної безпеки.

21 Англійська назва джерела Лебідь X-1. — *Прим. пер.*

Рентгенівські барстери

Природа завжди сповнена несподіванок, і в 1975 році вона вразила причетних до рентгенівської астрономії. Ситуація була такою напруженою, що не всім вдавалося стримувати емоції, і я був у самому вирі подій. Я роками сперечався з колегою з Гарварду (який не хотів слухати), але з радянськими колегами мені пощастило більше (вони слухали). Можливо, мені буде дуже складно залишатися об'єктивним через мою провідну роль у всій цій історії, але я спробую.

Несподіванкою були рентгенівські спалахи. Їх у 1975 році незалежно одне від одного відкрили дві групи науковців: Гріндлей і Хейзе за даними з Астрономічного супутника Нідерландів (ANS), а також Беліан, Коннер і Еванс, які використовували дані двох американських розвідувальних супутників Vela-5, призначених для стеження за ядерними випробуваннями. Рентгенівські спалахи були зовсім не схожі на змінність густини потоку випромінювання від Скорпіон X-1, де ми спостерігали різке чотириразове зростання спалахів протягом десятихвилинного періоду, що тривало менше години. Нововідкриті рентгенівські спалахи були значно швидші, яскравіші й тривали лише кілька десятків секунд.

У МТІ був власний супутник (запущений у травні 1975 року), що називався «Третій малий астрономічний супутник», або SAS-3 (Small Astronomy Satellite). Назва не така романтична, як «Ухуру», але робота з ним була найзахопливішою в моєму житті. Ми вже знали про рентгенівські барстери — джерела цих коротких спалахів, — і в січні 1976 року почали їх шукати, а до березня вже знайшли п'ять. Усього на кінець року ми відкрили їх десять. Завдяки чутливості й особливостям компонування SAS-3 виявився ідеальним інструментом для пошуку й вивчення джерел рентгенівських спалахів. Звісно, він не був спеціально створений для того, щоб виявляти рентгенівські спалахи, тому в якомусь розумінні нам пощастило. Бачите, яку роль у моєму житті зіграла леді Удача! Ми одержували неймовірні дані — небо дарувало нам золото щодня — і я працював цілодобово. Я був відданий роботі й одержимий нею. Така нагода трапляється тільки раз

у житті — власна рентгенівська лабораторія, яку можна спрямувати куди завгодно й одержувати дані високої якості.

Правду кажучи, ми всі захворіли «лихоманкою спалахів» — студенти й аспіранти, допоміжний персонал, докторанти й викладачі, — і я досі згадую це приємне відчуття. Урешті-решт ми опинилися в різних дослідницьких групах, а отже, стали сприймати всіх інших, навіть колишніх колег, як конкурентів. Декому з нас це не подобалося, але маю визнати, що, на мою думку, це змушувало нас працювати більше й краще, і результати були просто фантастичними.

Така одержимість не пішла на користь моєму сімейному життю. Моя кар'єра складалася якнайкраще, але мій перший шлюб зазнав фіаско. Звісно, це була моя провина. Упродовж багатьох років я на кілька місяців їхав на інший кінець світу, щоб запускати повітряні кулі. Навіть коли в нас з'явився власний супутник, я міг податися в Австралію.

Джерела спалахів у якомусь сенсі замінили нам родини. Адже ми жили та спали з ними і вивчили їх уздовж і вшир. Подібно до друзів, кожне з них було унікальним, зі своїми особливими дивацтвами. Я й досі пізнаю багато красномовних обрисів, які зображають ці спалахи.

Більшість джерел були розташовані на відстані приблизно 25 000 світлових років, що дало змогу нам обчислити енергію рентгенівського спалаху (який тривав менше хвилини); вона становить приблизно 10^{32} джоулів — практично немислима цифра. Тому погляньте на це так: Сонцю потрібно майже три дні, щоб виділити таку кількість енергії на всіх довжинах хвиль.

Деякі спалахи виникали регулярно, майже за годинником, наприклад, джерело МХВ 1659-29 створювало спалахи з інтервалом 2,4 години, тоді як інші джерела змінювали інтервали між спалахами від кількох годин до кількох днів, а деякі не виявляли жодної активності по кілька місяців. Літера «М» в аббревіатурі МХВ означає МТІ, «Х» — Х-промені, а «В» — барстер. Цифри вказують на координати джерела в так званій екваторіальній системі координат. Якщо серед вас є астрономи-аматори, ви про неї чули.

Звісно, найбільше нас цікавила причина цих спалахів. У 1976 році двоє моїх колег із Гарварду (зокрема, Джош Гріндлей, один з їхніх

відкривачів), захопившись, припустили, що джерелом спалахів є чорні діри, важчі в кількасот разів за Сонце.

Незабаром ми відкрили, що спектри під час рентгенівських спалахів і під час охолодження чорного тіла схожі. Чорне тіло — це не чорна діра. Це ідеальна модель тіла, що поглинає все випромінювання, яке на нього потрапляє. (Як вам відомо, чорний колір поглинає випромінювання, тоді як білий — відбиває. Саме тому чорне авто, яке залишили влітку на стоянці біля маямського пляжу, нагріється більше, ніж біле). Крім того, оскільки ідеальне чорне тіло нічого не відбиває, вся енергія, яку воно випромінює, є наслідком його нагрівання.

Уявіть нагрівальний елемент в електричній духовці. Коли він нагрівається до температури приготування їжі, починає світитися червоним, випромінюючи низькочастотне червоне світло. Розжарюючись іще більше, він стає оранжевим, потім жовтим — і зазвичай це все. Коли ви вимикаєте духовку, елемент охолоджується, і графік його випромінювання певною мірою схожий на хвіст рентгенівських спалахів. Спектри чорного тіла вивчені так добре, що, визначивши залежність спектра від часу, можна обчислити його температуру під час охолодження.

Маючи повне уявлення про чорні тіла, ми можемо за допомогою елементарної фізики дійти дуже багатьох висновків щодо спалахів, що я вважаю дивовижною. Це ж треба, аналізуючи спектри рентгенівського випромінювання від невідомих джерел на відстані 25 000 світлових років, ми здійснили прорив завдяки тим законам фізики, які студенти МТІ вивчають на першому курсі!

Ми знаємо, що повна кількість енергії, яку за секунду випромінює чорне тіло, пропорційна його температурі в четвертому ступені (це аж ніяк не логічно), а також площі його поверхні (це вже логічно — що більша площа, то більше енергії виділяється). Отже, якщо в нас є дві сфери діаметром один метр і одна з них удвічі гарячіша за другу, вона випромінюватиме в 16 разів (2^4) більше енергії. Крім того, площа поверхні сфери пропорційна квадрату її радіуса, тому якщо температура тіла залишатиметься незмінною, а розмір збільшиться втричі, то кількість енергії, яку воно випромінює за секунду, зросте в дев'ять разів.

Рентгенівський спектр у будь-який момент спалаху підказує нам температуру чорного тіла для джерела випромінювання. Під час спалаху температура швидко зростає до майже 30 мільйонів кельвінів, а потім поступово знижується. Оскільки нам була відома приблизна відстань до барстерів, ми могли також обчислити світність джерела в будь-який момент спалаху. Знаючи температуру і світність чорного тіла, можна обчислити радіус джерела випромінювання — так само в будь-який момент, поки триває спалах. Уперше це зробив Жан Свонк із Центру космічних польотів імені Годдарда. Ми в МТІ незабаром це повторили й дійшли висновку, що спалахи створювало тіло, яке охолоджувалося, радіуса приблизно 10 кілометрів. Це був переконливий доказ, що джерело спалахів — нейтронні зорі, а не дуже масивні чорні діри. І якщо це нейтронні зорі, вони, очевидно, входили до рентгенівських подвійних систем.

У 1976 році в МТІ приїжджала італійська астрономка Лаура Мараскі. Якогось лютого дня вона зайшла до мене в кабінет і висловила здогад, що спалахи виникають через потужні термоядерні вибухи на поверхні акреціювальних нейтронних зір. Коли водень перетікає на нейтронну зорю, гравітаційна потенціальна енергія перетворюється на тепло, і газ розжарюється настільки, що починає виділяти рентгенівські промені (див. попередній розділ). Але, як припустила Мараскі, накопичуючись на поверхні нейтронної зорі, акреціювальна речовина може зазнати некерованого ядерного синтезу (як у водневій бомбі), й це спричиняє рентгенівський спалах. Наступний вибух може статися за кілька годин, коли накопичиться нова порція ядерного палива. За допомогою простих обчислень на дошці в моєму кабінеті Мараскі показала, що коли матерія мчить до поверхні нейтронної зорі на швидкості, яка становить приблизно половину швидкості світла, вивільняється значно більше енергії, ніж під час термоядерних вибухів, і дані це підтверджували.

Я був вражений: це пояснення здавалося переконливим. Термоядерні вибухи відповідали всім вимогам. Тоді й охолодження, що ми спостерігали під час спалахів, мало сенс, якщо те, що ми бачили, було потужним вибухом на нейтронній зорі. Також її модель добре пояснювала інтервали між спалахами: щоб стався вибух, має накопичитися достатня кількість речовини. За звичайного темпу

акреції критична маса може зібратися за кілька годин, і приблизно такий інтервал між спалахами ми спостерігали в багатьох джерел.

У мене в кабінеті на столі стоїть цікавий радіоприймач, який часто бентежить моїх відвідувачів. Він працює від сонячної батареї і лише тоді, коли в ній достатньо заряду. Поки приймач собі стоїть, вбираючи сонячне світло, батарея поступово наповнюється енергією (узимку значно повільніше), а тоді приблизно що десять хвилин — часом довше, якщо погода погана — він несподівано вмикається, але тільки на кілька секунд, бо майже одразу розряджається. Зрозуміли? Так само, як в акумуляторі накопичується електроенергія, на поверхні нейтронної зорі накопичується акреціювальна речовина: коли збирається потрібна кількість, стається вибух, який згодом згасає.

Потім, 2 березня 1976 року, за кілька тижнів після приїзду Мараскі та в розпал «лихоманки спалахів» ми відкрили рентгенівське джерело МХВ 1730-335, на якому відбувалося *кілька тисяч спалахів за день*. Вони нагадували кулеметний вогонь: спалахи часто відбувалися з інтервалом у шість секунд! Не знаю, чи зможу вповні передати наше збентеження. Це джерело (зараз його називають Швидким Барстером) цілком вибивалося з картини й одразу знищило теорію Мараскі. По-перше, за шість секунд на поверхні нейтронної зорі ніяк не може зібратися достатньо речовини для термоядерного вибуху. Крім того, якщо спалахи — побічний продукт акреції, ми мали б спостерігати викликаний нею сильний рентгенівський потік (вивільнення гравітаційної потенціальної енергії), який значно перевищує енергію спалахів, але цього не було. Тому на початку березня 1976 року здавалося, що чудова термоядерна модель, яку запропонувала Лаура Мараскі, мертва за мертвою. У публікації, присвяченій МХВ 1730-335, ми припустили, що спалахи викликані «епізодичною акрецією» на нейтронну зорю. Інакше кажучи, розжарена матерія з акреційного диска потрапляє на поверхню нейтронної зорі не постійним потоком, а дуже нерегулярно.

Вимірюючи спалахи якийсь час, ми з'ясували, що після сильнішого спалаху доводиться довше чекати наступного. Пауза могла тривати від шести секунд до восьми хвилин. Щось схоже відбувається із блискавками. Коли вдаряє особливо велика блискавка, тобто відбувається сильний розряд, потрібно більше часу, аби потенціал

електричного поля зріс настільки, щоб його вистачило на ще один розряд.

Того ж року зненацька виринув переклад нещодавньої радянської статті, присвяченої рентгенівським спалахам: їх виявили в 1971 році за допомогою супутника «Космос-428». Ми були приголомшені. Радянські вчені відкрили рентгенівські спалахи, випередивши Захід! Проте що більше я дізнавався про ці спалахи, то більше зростав мій скептицизм. Спалахи, виявлені ними, так різьче відрізнялися від багатьох спалахів, які виявив я за допомогою SAS-3. Тому в мене з'явилися серйозні сумніви щодо їхньої справжності. Я допускав, що вони або мали штучне походження, або якимось дивним і незрозумілим чином виникали недалеко від Землі.

Через існування «залізної завіси» дослідити це глибше не вдавалося. Дізнатися відповідь було неможливо. Проте мені пощастило: влітку 1977 року мене запросили в Радянський Союз на конференцію вельми високого рівня. У ній узяли участь лише дванадцять радянських і дванадцять американських астрофізиків. Саме тоді я познайомився зі всесвітньо відомими вченими — Йосипом Шкловським, Роальдом Сагдєєвим, Яковом Зельдовичем і Рашидом Суняєвим.

Я прочитав доповідь про — ви ж здогадалися — рентгенівські спалахи, а потім зустрівся з авторами радянської статті. Вони люб'язно показали мені багато даних щодо спалахів, значно більше, ніж вони оприлюднили в 1975 році. Мені одразу стало зрозуміло, що все це нісенітниця, але я їм цього не сказав, принаймні тоді. Спершу я пішов до їхнього керівника Роальда Сагдєєва, який тоді очолював Інститут космічних досліджень Академії наук СРСР у Москві. Я сказав йому, що хочу обговорити одне досить делікатне питання. Він запропонував поговорити в іншому місці (в кабінеті було повно «жучків»), тому ми вийшли на вулицю. Я навів йому свої аргументи, чому вони помиляються щодо спалахів, і він одразу все зрозумів. Я переймався, що коли розповім про це всім, у цих хлопців, можливо, виникнуть серйозні проблеми з радянським режимом. Він запевнив, що цього не станеться, і переконав зустрітися з ними й сказати їм те саме, що і йому. Я так і зробив, і відтоді про радянські рентгенівські спалахи ми більше не чули. Хочу додати, що ми досі дружимо!

Можливо, вам цікаво, що було причиною цих спалахів. Тоді я не мав жодного уявлення, але тепер знаю: вони мали штучне походження. І вгадайте, хто їх створив? Радянський Союз! Трохи згодом я відкрию цю таємницю.

Поки що повернімося до справжніх спалахів, яких ми ніяк не могли зрозуміти. Коли рентгенівські промені від спалахів вриваються в акреційний диск (або зорю-донор) рентгенівської подвійної зорі, диск і зоря нагріваються і на короткий час спалахують в оптичному діапазоні. Оскільки рентгенівські промені спершу мають потрапити на диск і зорю-донор, ми розраховували, що оптичний спалах від диска дійде до нас за кілька секунд після рентгенівського спалаху. Тож ми почали шукати поєднання оптичних і рентгенівських спалахів. Мій колишній аспірант Джефф Макклінток і його колеги в 1977 році вперше ідентифікували джерела спалахів в оптичному діапазоні: ними виявилися МХВ 1636-53 і МХВ 1735-44; саме на них ми і націлилися.

Бачите, як усе відбувається в науці? Якщо модель правильна, її мають підтвердити спостереження. Улітку 1977 року ми з моїм колегою і другом Джеффри Гоффманом організували всевітнє «чатування на спалахи» — одночасне спостереження в рентгенівському, радіохвильовому, оптичному й інфрачервоному діапазоні.

Це була дивовижна авантюра. Ми мали переконати астрономів із сорока чотирьох обсерваторій у чотирнадцяти країнах присвятити дорогоцінний час у найсприятливіші для дослідження години (так звані «час темноти», коли відсутній Місяць) одній тьмяній зорі — що, можливо, нічого не дасть. Їхня готовність узяти участь свідчила про те, якою важливою для астрономів була таємниця рентгенівських спалахів. За тридцять п'ять днів ми за допомогою SAS-3 зареєстрували 120 спалахів від джерела МХВ 1636-53, але телескопи на поверхні не зафіксували жодного. Яке розчарування!

Можливо, ви подумали, що нам довелося вибачатися перед колегами з усього світу, але насправді ніхто не сприйняв це як проблему. Це невід'ємна складова науки.

Наступного року ми повторили спробу, але використали великі наземні телескопи. Джефф Гоффман переїхав у Г'юстон, щоб стати астронавтом, але до мене приєдналися моя аспірантка Лінн Комінскі та голландський астроном Ян ван Парадейс, який почав працювати в

МТІ у вересні 1977 року²². Цього разу ми обрали МХВ 1735-44. У ніч на 2 червня 1978 року ми досягли успіху. За кілька секунд після того, як ми в МТІ за допомогою SAS-3 зафіксували рентгенівський спалах, Джош Гріндлей із колегами (включно з Макклінтоком) у півтораметровий телескоп в обсерваторії «Серро-Тололо» в Чилі спостерігали оптичний спалах. Наше відкриття потрапило на обкладинку журналу Nature, що було неабиякою честю. Це ще раз підтвердило, що джерело спалахів — рентгенівські подвійні зорі.

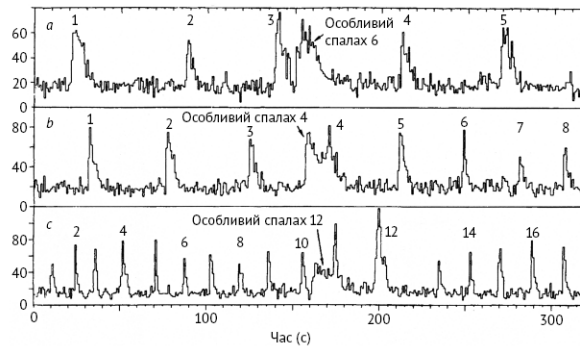
Для нас досі залишалося загадкою, чому всі джерела, крім одного, створювали лише кілька спалахів на день і чому Швидкий Барстер так відрізнявся від решти. Відповідь крилася в найдивовижнішому — і найнезрозумілішому — відкритті за всю мою кар'єру.

Швидкий Барстер — це так званий транзієнт. Джерело Центавр X-2 також є транзієнтом (див. розділ 11). Проте Швидкий Барстер — періодичний транзієнт. У 1970-ті він ставав активним що півроку, але лише на кілька тижнів, після чого зникав з ефіру.

Приблизно за півтора року після відкриття Швидкого Барстера ми помітили одну особливість у графіку його спалахів, що перетворила це загадкове джерело на розетський камінь для рентгенівських барстерів. Восени 1977 року, коли Швидкий Барстер знову був активний, мій студент Герман Маршалл, уважно вивчаючи графіки спалахів, помітив серед дуже швидких спалахів спалахи іншого типу, які відбувалися значно рідше, приблизно раз на три-чотири години. Спектри цих особливих спалахів, як ми їх спершу називали, демонстрували таку саму схожість зі спектрами під час охолодження чорного тіла, яка була властива всім спалахам від багатьох інших джерел. Інакше кажучи, мабуть, наші особливі спалахи (пізніше ми назвали їх спалахами I типу, а швидкі спалахи — спалахами II типу) насправді зовсім не особливі. Спалахи II типу явно були наслідком епізодичної акреції — це не викликало жодного сумніву — але, можливо, типові спалахи I типу таки справді виникали через термоядерні вибухи. Незабаром я вам розповім, як ми це з'ясували. Просто наберіться терпіння.

Восени 1978 року мій колега з МТІ Пол Джосс здійснив деякі ретельні обчислення, щоб з'ясувати природу термоядерних спалахів на поверхні нейтронних зір. Він дійшов висновку, що спершу накопичений водень поступово перетворюється в гелій, але той гелій,

щойно досягне критичної маси, тиску і температури, може вибухнути й тоді відбудеться термоядерний спалах (і рентгенівський спалах I типу). Із цього випливав прогноз, що енергія рентгенівського випромінювання, вивільнена під час стійкої акреції, має приблизно в 100 разів перевищувати енергію, яка виділяється під час термоядерного спалаху. Інакше кажучи, доступна гравітаційна потенціальна енергія приблизно в 100 разів більша за доступну термоядерну енергію.



Рентгенівські спалахи від Швидкого Барстера, зареєстровані восени 1977 року за допомогою супутника SAS-3. Висота лінії показує кількість зареєстрованих за секунду рентгенівських променів, а на горизонтальній осі відкладено час. Кожна секція відповідає періоду в приблизно 30 секунд. Спалахи II типу, які швидко повторюються, пронумеровані послідовно. У кожній секції можна побачити по одному «особливому спалаху», які мають різні номери. Це спалахи I типу (термоядерні спалахи).

Джерело зображення: Hoffman, Marshall, and Lewin, Nature, 16 Feb. 1978.

Ми виміряли загальну кількість енергії, яку Швидкий Барстер випроменив у рентгенівському спектрі за п'ять із половиною днів наших спостережень восени 1977 року, і з'ясували, що на спалахи II типу припадає приблизно в 120 разів більше енергії, ніж на «особливі» спалахи I типу. Це був вирішальний аргумент. Тоді ми переконалися, що Швидкий Барстер — це рентгенівська подвійна зоря, спалахи I типу — результат термоядерних спалахів на поверхні акреціювальної нейтронної зорі, а спалахи II типу — наслідок вивільнення гравітаційної потенціальної енергії речовини, яка перетікає від зорі-донора на нейтронну зорю. Це вже не викликало жодних сумнівів. Відтоді ми знали, що всі джерела спалахів I типу — це рентгенівські подвійні системи з нейтронною зорею. Водночас ми остаточно переконалися, що джерелами спалахів не можуть бути чорні діри. У них немає поверхні, тому там не можуть виникати термоядерні спалахи.

Попри те що на початок 1978 року для більшості з нас було вже цілком очевидно, що джерела спалахів — нейтронні зорі в подвійних системах, Гріндлей у Гарварді й далі наполягав, що спалахи виникають через процеси в масивних чорних дірах. У 1978 році він навіть опублікував статтю, в якій намагався пояснити, як це відбувається. Я ж казав, що науковці часом приростають до своїх теорій. Кембриджська газета *The Real Paper* опублікувала величезну статтю під назвою «Гарвард і МТІ на межі», у якій було вміщено наші з Гріндлеем фотографії.

Докази належності джерел спалахів до подвійних зір з'явилися в 1981 році, коли ми з моїм данським другом Хольгером Педерсоном і Яном ван Парадейсом виявили, що джерело МХВ 1636-53 має період обертання 3,8 години. Проте лише в 1984 році Гріндлей нарешті визнав свою помилку.

Так найдивніше рентгенівське джерело, Швидкий Барстер, допомогло підтвердити гіпотезу щодо звичайних (І типу) спалахів рентгенівського випромінювання, які спантеличували нас самі по собі. Іронія в тому, що хоча Швидкий Барстер стільки всього пояснив, сам він багато в чому залишається загадкою. Астрономів-практиків це не дуже стосується, але от теоретики досі ніяковіють. Максимум, що ми зробили, і максимум, що нам вдалося зробити, це запропонувати пояснення «епізодичної акреції». Розумію, що це схоже на назву інфекційної хвороби, яку можна підхопити у відпустці в екзотичній країні. І річ у тім, що це лише слова, а не фізика. Речовина, що рухається до нейтронної зорі, з невідомих причин, на деякий час затримується в диску, перш ніж її згусток або кільце відділиться від нього і порине на поверхню зорі, спалахами вивільняючи гравітаційну потенціальну енергію. Це явище називають нестабільністю диска, але це також лише слова: ніхто не знає, чому і як це відбувається.

Якщо відверто, ми також не розуміємо, чому деякі рентгенівські джерела поводяться як періодичні транзїєнти. Чому вони то «вмикаються», то «вимикаються»? Ми просто цього не знаємо. Якось у 1977 році всі детектори SAS-3 одночасно почали реєструвати спалахи. Це було дивно, тому що ці пристрої спостерігали за небом в абсолютно різних напрямках. Єдине раціональне пояснення, що спало нам на думку, — кризь космічний апарат пройшли гамма-промені надвисоких

енергій (рентгенівське випромінювання на таке не здатне), залишивши по собі сигнали. Оскільки всі детектори спрацювали одночасно, ми не мали жодного уявлення, звідки прийшло це гамма-випромінювання. Протягом кількох місяців ми спостерігали десятки подібних епізодів, а потім усе припинилося, щоб за тринадцять місяців початися знову. Для всіх в МТІ це явище було загадкою.

З допомогою моєї студентки Крістіани Теллефсон я почав складати каталог таких спалахів, і ми навіть систематизували їх за категоріями А, В і С, залежно від їхніх характеристик. Я зберігав їх у папці, якій дав назву «Кляті спалахи».

Пам'ятаю, як проводив презентацію для представників NASA (вони приїжджали до нас щороку), на якій розповів останні захопливі новини про рентгенівські спалахи та продемонстрував деякі з тих дивних спалахів. Своє небажання публікувати результати я пояснив тим, що ці спалахи здаються мені якимись несправжніми. Проте мене переконали не зволікати. Тому ми з Крістіаною почали готувати статтю.

Але якось мені цілком несподівано зателефонував мій колишній студент Боб Скарлетт, який працював над засекреченим проектом у Національній лабораторії в Лос-Аламосі. Він попросив не публікувати статтю про дивні спалахи. Мені було цікаво чому, але йому заборонили оголошувати мені причину. Він запитав про час, коли виникали спалахи, і я надав йому цю інформацію. Через два дні він знову зателефонував і цього разу *наполягав*, щоб я не публікував даних з міркувань національної безпеки. Я ледь не впав зі стільця. Я одразу зателефонував Франс Кордова — своїй подрузі й колишній колезі, яка тоді також працювала в Лос-Аламосі. Я переповів їй нашу з Бобом розмову, сподіваючись, що вона зможе пролити світло на те, що відбувається. Напевно, вона поговорила про це з Бобом, тому що за кілька днів також зателефонувала й настійно порадила не друкувати статтю. Щоб заспокоїти мене, вона запевнила, що ці спалахи не мають жодного значення для астрономії. Одним словом, я не опублікував результатів.

Через багато років я дізнався, що сталося: «кляті спалахи» йшли від кількох радянських супутників, що працювали від атомних електрогенераторів. Вони містили надзвичайно потужні джерела

радіоактивного випромінювання. Щоразу, коли SAS-3 пролітав неподалік одного з радянських супутників, вони бомбардували його гамма-променями від радіоактивного джерела. Що ж, пам'ятаєте дивні спалахи, які в 1971 році зареєстрували радянські вчені? Зараз я цілком переконаний, що вони створювалися їхніми ж супутниками. Яка іронія!

Період від кінця 1970-х аж до 1995 року був для мене надзвичайно насиченим. Тоді рентгенівська астрономія була найбільш прогресивним напрямком практичної астрофізики. Дослідження рентгенівських спалахів стало вершиною моєї наукової кар'єри. Щороку я проводив, мабуть, з десятком колоквиумів по всьому світу: у Східній та Західній Європі, Австралії, Азії, Латинській Америці, на Близькому Сході та у Сполучених Штатах. Я виступав на багатьох міжнародних конференціях з астрофізики й був головним редактором трьох книжок з рентгенівської астрономії, з яких остання — «Компактні зорі як рентгенівські джерела» (Compact Stellar X-ray Sources) — вийшла у 2006 році. Це були чудові та запаморочливі часи.

Але попри всі наші дивовижні досягнення, Швидкий Барстер досі опирається спробам розгадати його найглибші таємниці. Колись учені знайдуть відповіді, я впевнений. І, звичайна річ, натраплять на щось, що спантеличить їх не менше. Це мені й подобається в фізиці. І це пояснює, чому я повісив у своєму кабінеті на видному місці великий плакат із графіками спалахів від Швидкого Барстера. І у Великому адронному колайдері, і на околицях надглибокого поля Габбла фізики одержують дедалі більше даних і пропонують чимраз більше оригінальних теорій. Але я переконаний в одному: здійснюючи відкриття, висуваючи гіпотези й створюючи теорії, вони натраплятимуть на нові таємниці. У фізиці що більше відповідей, то більше нових запитань.

²² Тоді я ще не знав, що ми з Яном станемо дуже близькими друзями й до його передчасної смерті в 1999 році спільно напишемо майже 150 наукових статей.

Способи бачення світу

Зазвичай старшокласники й студенти дуже неохоче обирають фізику, бо її часто подають у вигляді складного набору математичних формул. Мій підхід на лекціях у МТІ та в цій книжці зовсім інший. Я подаю фізику як спосіб сприйняття світу, що відкриває нам території, яких ми інакше не побачили б, — від найкрихітніших субатомних частинок до безмежності Всесвіту. Фізика дозволяє нам побачити невидимі сили, що постійно діють навколо нас, від гравітації до електромагнітних сил, і підказує, де й коли шукати дощові веселки, а також гало, туманні веселки, глорії і, можливо, навіть скляні веселки.

Усі фізики-новатори докорінно змінювали наше сприйняття світу. Після Ньютона ми змогли зрозуміти й навчилися передбачати рух усіх небесних тіл у Сонячній системі, використовуючи для цього математичні інструменти — обчислення. Після Ньютона ніхто вже не міг заперечити, що сонячне світло складається зі світла різних кольорів, а веселка утворюється, коли сонячні промені заломлюються й відбиваються в дощових краплях. Максвелл назавжди поєднав електрику й магнетизм: мені навіть було складно розповідати про них в окремих розділах.

Ось чому фізика дивовижним чином схожа на мистецтво: новаторське мистецтво — це також новий спосіб бачення, спосіб сприйняття світу. Можливо, вас це здивує, але більшу частину свого життя я полонений сучасним мистецтвом майже так само, як і фізикою — я люблю їх обох! Я вже згадував про велику колекцію посуду Fiesta. Крім того, від середини 1960-х я зібрав більше ста предметів мистецтва — картин, колажів, скульптур, килимів, стільців, столиків, ляльок, масок, і в мене вдома вже не вистачає місця для них на стінах і підлозі.

У моєму кабінеті в МТІ переважає фізика, хоча я на правах аренди володію двома чудовими творами мистецтва, які мені надав університет. Але вдома у мене, мабуть, лише з десяток книжок із фізики і приблизно 250 з мистецтва. Я щасливий, що мені прищепили любов до мистецтва з дитинства.

Мої батьки колекціонували твори мистецтва, хоча теоретично дуже мало знали про нього. Вони просто керувалися своїми вподобаннями, а це іноді могло завести у глухий кут. Часом вони обирали чудові твори, часом ні — принаймні так здається зараз, озираючись назад. До картин, які справили на мене незабутнє враження, належить портрет мого батька, який зараз висить над каміном у моєму будинку в Кембриджі. Ця річ справді приголомшлива. Батько був дуже цікавою людиною — і, як і я, він був упертюхом. Художник, який знав його дуже добре, блискуче вловив риси батька, зобразивши його торс, велику видовжену лису голову, посаджену між могутніми квадратними плечами, а на тонких губах — самовдоволену усмішку. Але найбільше на портреті вирізняються його масивні чорні окуляри, що обрамлюють невидимі очі; вони зорять за глядачем у кожному кутку кімнати, а ліва брова здивовано вигнута над оправою. У цьому вся суть його характеру: проникливість.

Батько водив мене в галереї та музеї, коли я був старшокласником, і саме тоді я почав закохуватися в мистецтво, яке навчило мене по-іншому дивитися на світ. Мені подобалося, що в галереях чи музеях, на відміну від школи, ти дієш відповідно до власних зацікавлень: зупиняєшся, де хочеш й на скільки бажаєш, а потім продовжуєш, коли вважаєш за потрібне. Так виникає особистий зв'язок з мистецтвом. Потім я почав ходити в музеї сам і незабаром уже досить багато знав. Я захопився Ван Гогом. (Насправді його ім'я вимовляється «Ван Хоxx» — це практично неможливо вимовити, якщо ви не голландець — два гортанні звуки, ледь відокремлені коротким «о»). Усе закінчилося тим, що в п'ятнадцять я прочитав однокласникам лекцію про Ван Гога. Також я інколи влаштовував для друзів екскурсії музеями. Отож насправді до викладання мене привело мистецтво.

Тоді я вперше дізнався, яка це радість — навчати інших людей будь-якого віку, розширювати обрії їхнього сприйняття. Шкода, що часом мистецтво здається таким само складним і незрозумілим, як і фізика для тих, кому не пощастило з учителями. Саме тому останні вісім років я із задоволенням щотижня проводжу мистецьку вікторину — вивішую на дошку оголошень у МТІ роздруковану з інтернету репродукцію із запитанням: «Хто автор?». Троє учасників, які протягом року дають найбільше правильних відповідей, одержують

призи — чудові книжки з мистецтва. Деякі постійні учасники годинами прочісують інтернет і таким чином вивчають мистецтво. Мені так подобалася ця вікторина, що тепер я проводжу іншу що два тижні на своїй фейсбук-сторінці. Ви також можете взяти участь у ній.

Крім того, мені пощастило співпрацювати з кількома дивовижними художниками-новаторами. У кінці 1960-х до нас у МТІ прийшов німецький художник Отто Піне, творець «небесного мистецтва»; він починав як науковий співробітник Центру поглиблених візуальних досліджень, а потім очолював його протягом двох десятиліть. На той час я вже встиг запустити кілька своїх велетенських повітряних куль, тому мав нагоду допомогти Отто з його «небесним мистецтвом». Перший проект, над яким ми працювали разом, називався «Експеримент зі світловою лінією» (Light Line Experiment). Він полягав у тому, що чотири майже 80-метрові поліетиленові трубки, наповнені гелієм, закріплювалися з обох кінців на землі. Вони здіймалися від легкого подмуху вітру, утворюючи над університетським стадіоном граційні дуги. Ми зв'язали всі чотири трубки разом у повітряну кулю 300 метрів завдовжки й відпустили один кінець у небо. А вночі ми виносили прожектори, які підсвічували частини багатометрової змієподібної кулі, що вигиналася, утворюючи неймовірні фігури змінних форм. Це було приголомшливо!

У цих проектах я зазвичай виконував технічну роль: обчислював, чи реально втілити ідеї Отто щодо розмірів і форм куль. Наприклад, якої товщини має бути поліетилен, з якого їх виготовлено? Ми хотіли, щоб кулі були достатньо легкими, аби вільно злітати, але й достатньо міцними, аби витримати сильний вітер. У 1974 році для одного заходу в Аспені (штат Колорадо) ми розвішали багатогранні скляні намистини по кутах «світлового намету». Щоб віднайти ефективне рішення з точки зору і фізики, й естетики, я здійснив багато обчислень, змінюючи розміри куль і вагу намистин. Мене неймовірно захоплювало розв'язання фізичних задач, які допомагали втілювати художні ідеї Отто.

Я чимало часу присвятив велетенській п'ятикольниковій інсталяції «Веселка», яку Отто створив для закриття Олімпіади 1972 року в Мюнхені. Звісно, ми навіть не підозрювали, що Олімпіада закінчиться страшною розправою — убивством ізраїльських спортсменів, тому

наша майже 500-метрова «Веселка», що підносилася на 150 метрів над Олімпійським озером, стала символом надії перед лицем катастрофи. Фотографію інсталяції можна побачити у вклейці. Коли я починав запускати кулі для дослідження Всесвіту, мені навіть не спадало на думку, що колись я братиму участь у таких проектах.

Отто познайомив мене з голландським художником Петером Стрейкеном, творчість якого я добре знав, бо мої батьки в Нідерландах колекціонували його роботи. Якось Отто зателефонував мені на роботу й сказав: «У мене зараз один голландський художник. Хочеш познайомитись?». Чомусь люди вважають, що якщо ви з однієї маленької країни, то захочете поговорити, але зазвичай у мене такого бажання не виникає. Я відповів: «Чого б це? Як його звать?». Коли Отто сказав, що це Петер Стрейкен, я, звісно, погодився, але щоб не ризикувати, додав, що в мене часу лише півгодини (це була неправда). Отже, Петер зайшов до мене, ми проговорили майже п'ять годин (так, п'ять годин!), а потім я запросив його на устриці в Legal Sea Foods. Ми одразу знайшли спільну мову, і Петер більше ніж двадцять років був одним з моїх найближчих друзів. Ця зустріч назавжди змінила моє життя!

Під час тієї першої розмови мені вдалося показати Петеру, чому в одному з основних питань його творчості — «Коли щось одне відрізняється від іншого?» — усе залежить від того, що розуміти під відмінністю. Для когось квадрат може відрізнитися від трикутника й кола. Проте якщо вважати їх замкненими контурами, що утворюють геометричні фігури, тоді вони будуть однаковими.

Петер показав мені десяток комп'ютерних малюнків, створених в одній програмі, і сказав: «Вони всі однакові». Мені вони здалися абсолютно різними. Усе залежить від того, як розуміти «однаковість». Я зауважив, що якщо для нього вони всі однакові, то, можливо, він не проти залишити один мені. Він погодився й написав на малюнку голландською: «Met dank voor een gesprek» (буквально: «Із вдячністю за розмову»). Це було типowo для Петера — дуже скромно. Якщо чесно, з усієї моєї колекції творів Стрейкена цей маленький малюнок — найулюбленіший.

Петер знайшов у мені фізика, який не тільки цікавився мистецтвом, але й міг допомогти йому з роботою. Він один з перших у світі

представників комп'ютерного мистецтва. У 1979 році Петер (разом з Лін і Даніелем Деккерами) приїхав на рік у МТІ, і ми почали дуже тісно співпрацювати. Ми бачилися ледь не щодня, і двічі або тричі на тиждень я вечеряв у нього вдома. До Петера я «дивився» на мистецтво, а завдяки Петеру я став його «бачити».

Без нього я, мабуть, ніколи не навчився б звертати найбільше уваги на новаторські твори й не зрозумів би, як вони можуть докорінно змінити наше бачення світу. Я дізнався, що в мистецтві головне не тільки краса, або це навіть узагалі не головне. Суть мистецтва — це відкриття невідомого, і в цьому для мене мистецтво й фізика сходяться.

Відтоді я почав дивитися на мистецтво зовсім інакше. Для мене вже не мало значення, чи «подобається» мені твір. Важливими були художня цінність, новий спосіб сприйняття світу, а це можна оцінити, тільки якщо розумієшся на мистецтві. Я почав придивлятися до року написання картин. Новаторські роботи Малевича 1915–1920 років просто зачаровують. А схожі картини інших художників, написані в 1930-ті, мене не цікавлять. «Мистецтво — це або плагіат, або революція», — казав Поль Гоген з типовою для нього зарозумілістю, але в цьому є частка правди.

Мене захоплювала еволюція, яка сприяла новаторству. Для прикладу, незабаром я міг точно визначити, у якому році написав ту чи іншу картину Мондріан — зміни в його стилі між 1900 і 1925 роками приголомшують, — а тепер і моя дочка Пауліна теж це вміє. За багато років я не раз помічав, що музеї часом неправильно вказують рік написання картини. Коли я звертаю на це увагу кураторів (я роблю це щоразу), вони інколи ніяковіють, але завжди виправляють помилку.

Я допомагав Петеру втілити з десятків ідей. Нашим першим проектом був «16-й простір» (16th Space) — мистецтво в шістнадцяти вимірах (ми обійшли теорію струн з її одинадцятьма вимірами). Також я пригадую його серію «Зсув» (Shift). Він розробив математичну основу для комп'ютерної програми, яка генерувала дуже складні й цікаві мистецькі твори. Але оскільки Петер не дуже добре знав математику, його рівняння були дивні — просто недоладні. Він хотів зробити математику красивою, але не знав як.

Мені вдалося віднайти рішення, зовсім не складне з погляду фізики: рухомі хвилі в трьох вимірах. Ви можете задати довжину хвилі, вказати їхню швидкість і напрямок. А якщо потрібно, щоб три хвилі проходили одна крізь одну, можна і таке зробити. Ви задаєте початковий стан, а потім накладаєте хвилі. При цьому інтерференція створює надзвичайно цікаві зображення.

В основі цих картин лежала прекрасна математика, а для Петера це було дуже важливо. Я не вихваляюся — він сказав би те саме. Саме цю роль я в основному грав у його житті: я мав показати художнику, як зробити все красивим і водночас зрозумілим із погляду математики. До речі, Петер завжди дуже люб'язно дозволяв мені обрати одну картину з кожної серії. Який я щасливчик — у мене приблизно тринадцять робіт Стрейкена!

У результаті моєї співпраці з Петером директор роттердамського музею Бойманса — ван Бенінгена в 1979 році запросив мене прочитати першу лекцію про Мондріана під величезним склепінням Кепелькерк в Амстердамі. Зала була переповнена: мене слухало приблизно дев'ятсот людей. Зараз такі престижні лекції організують кожен другий рік. Серед лекторів були Умберто Еко (1981), Дональд Джадд (1993), Рем Колгас (1995) і Чарльз Дженкс (2010).

Мій досвід у мистецтві не обмежується співпрацею з Отто і Петером: якось я спробував (жартома) сам створити концептуальне мистецтво. Під час лекції «Мистецтво ХХ століття очима фізика» (Looking at 20th-Century Art Through the Eyes of a Physicist) я повідомив, що в мене вдома приблизно з десяток книжок із фізики і щонайменше двісті п'ятдесят із мистецтва — співвідношення приблизно двадцять до одного. Я розклав на столі двадцять книжок з мистецтва і запросив слухачів погортати їх під час перерви. Щоб зберегти баланс, я потім оголосив, що приніс півкнижки із фізики. До того вранці я дійсно розділив один підручник навпіл, просто посередині корінця. І я підняв половину книжки вгору, показуючи, що я розрізав дуже акуратно. «А це для тих, кому мистецтво не цікаве!» — сказав я, з грюкотом кинувши її на стіл. Здається, до неї ніхто і не підійшов.

Якщо подивитися на історію мистецтва від Ренесансу до сьогодні, можна простежити чітку тенденцію. Художники поступово звільнялися від обмежень, накладених тогочасними традиціями: щодо

теми, форми, матеріалів, перспективи, техніки й кольору. На кінець XIX століття митці остаточно відмовилися від ідеї мистецтва як реалістичного зображення світу.

Річ у тім, що зараз хоч ми і вважаємо більшість цих новаторських робіт прекрасними, їхні автори мали на меті зовсім інше: запропонувати людям новий спосіб бачення світу. Багато картин, якими сьогодні ми захоплюємося і вважаємо культовими — наприклад, «Зоряна ніч» Ван Гога або «Зелена смуга» Матісса (портрет його дружини), — свого часу зазнали глузувань і були зустриті вороже. Усіма шановані імпресіоністи, картини яких представлено в багатьох світових музеях, — Моне, Дега, Піссарро, Ренуар — щойно почали виставляти свої роботи, також наражалися на нищівну критику сучасників.

Той факт, що зараз ми вважаємо ці картини красивими, означає, що ці художники перемогли свою добу: їхній новий спосіб бачення і сприйняття світу став нашим світом і нашим баченням. Те, що сто років тому видавалося потворним, зараз може бути прекрасним. Мені подобається визначення, яке дав один критик, сучасник Матісса, назвавши його поборником потворності. А колекціонер Лео Стайн хоч і охарактеризував його портрет мадам Матісс — «Жінку в капелюсі» — як «найогидніша мазанина, яку я лише бачив», усе-таки придбав картину!

У XX столітті художники використовували готові речі — часом шокуючі, наприклад пісуар Марселя Дюшана (який він назвав «Фонтан») чи його «Мона Ліза» із зухвалим написом «L.H.O.O.Q.». Дюшан був великим визволителем; після нього дозволено все! Він хотів перевернути наше уявлення про мистецтво.

Після Ван Гога, Гогена, Матісса і Дерена неможливо сприймати колір так, як раніше, а після Енді Воргола — бляшанку супу «Кемпбелз» чи образ Мерилін Монро.

Новаторські витвори мистецтва можуть бути красивими, навіть прекрасними, але зазвичай — спершу точно — вони спантеличують і навіть видаються потворними. Справжня краса новаторського твору, хай який він негарний на перший погляд, у його значенні. Новий спосіб бачення світу не схожий на добре знайоме тепле ліжко, а радше

на пробуджуючий холодний душ. Як на мене, він заряджає енергією, бадьорить і звільняє.

Так само я ставлюся до новаторства в галузі фізики. Щоразу, коли наука робила наступний крок у глиб раніше не видимої чи оповитої туманом території, наше бачення світу назавжди змінювалося.

Багато дивовижних відкриттів, про які я розповів, спершу глибоко спантеличували вчених. Їх математичне обґрунтування може неабияк налякати. Але сподіваюся, що, знайомлячи вас із деякими найважливішими досягненнями, я зміг показати, які вони захопливі й красиві. Так само як Сезанн, Моне, Ван Гог, Пікассо, Матісс, Мондріан, Малевич, Кандинський, Бранкузі, Дюшан, Поллок і Воргол проклали нові шляхи, кидаючи виклик світу мистецтва, Ньютон і всі, хто йшов після нього, дали нам по-новому побачити світ.

Фізики-новатори початку ХХ століття — зокрема Анрі Антуан Беккерель, Марія Кюрі, Нільс Бор, Макс Планк, Альберт Ейнштейн, Луї де Бройль, Ервін Шредінгер, Вольфганг Паулі, Вернер Гейзенберг, Поль Дірак, Енріко Фермі — висунули теорії, що підривали столітні, якщо не тисячолітні, уявлення науковців про реальність. До появи квантової механіки ми вважали, що частинка — це частинка, яка підкоряється законам Ньютона, а хвиля — це хвиля, яка підкоряється іншим законам. Тепер ми знаємо, що всі частинки можуть поводитись як хвилі, а всі хвилі — як частинки. Тому дискусія фізиків ХVІІ століття про те, що таке світло — частинки або хвилі (якій, здавалося, поклав край у 1801 році Томас Юнг, висловившись на користь хвиль — див. розділ 5), тепер неактуальна, бо це і те й інше.

До появи квантової механіки вважалося, що фізика детермінована, тобто якщо сто разів провести той самий дослід, ми щоразу одержуватимемо той самий результат. Тепер ми знаємо, що це не так. Квантова фізика має справу з імовірністю, а не визначеністю. Цей факт настільки вражає, що навіть Ейнштейн так його й не визнав. «Бог не грає в кості» — його знамениті слова. Що ж, Ейнштейн помилявся!

До появи квантової механіки ми вважали, що положення частинки та її імпульс (добуток її маси та швидкості) можна, в принципі, одночасно визначити з будь-якою точністю. Це те, що нам кажуть закони Ньютона. Тепер ми знаємо, що насправді все інакше. Хоч як це нелогічно, але що точніше ми можемо визначити положення частинки,

то більшою буде похибка для її імпульсу. Це так званий принцип невизначеності Гейзенберга.

У спеціальній теорії відносності Ейнштейн стверджував, що простір і час утворюють єдину чотиривимірну реальність — простір-час. Він допускав, що швидкість світла незмінна (300 000 кілометрів за секунду). Навіть якби хтось наближався до вас у надшвидкому поїзді, що рухається на половині швидкості світла (150 000 кілометрів за секунду), світлячи вам фарами в обличчя, швидкість світла для вас обох була б однаковою. Логічно було б подумати, що оскільки поїзд наближається до вас, то, бачачи спрямоване на вас світло, ви маєте додати 300 000 і 150 000 й отримати в підсумку 450 000 кілометрів за секунду. Але нічого подібного — якщо вірити Ейнштейну, 300 000 плюс 150 000 все одно буде 300 000! Мабуть, ще більше закипав мозок від його загальної теорії відносності, яка повністю переосмислювала сили, що утримують разом астрономічний Всесвіт, стверджуючи, що гравітація викривлює матерію простору-часу, зміщує орбіти, вздовж яких рухаються тіла, й навіть змушує світло відхилятися в згаданому викривленому просторі-часі. Ейнштейн показав, що ньютонівську фізику потрібно серйозно переглянути, й відкрив шлях до сучасної космології — Великого вибуху, розширення Всесвіту й чорних дір.

Коли я в 1970-х почав викладати в МТІ, то більше наголошував на тому, що фізика — красива й надзвичайно цікава, а не на подробицях, які все одно минуть повз увагу студентів. Пояснюючи кожен тему, я намагався по змозі пов'язати матеріал зі світом студентів — щоб вони побачили речі, про які раніше не замислювалися, але які були на відстані витягнутої руки. Щоразу, як студенти щось запитують, я кажу: «Чудове запитання». Останнє, що вам потрібно, — змусити їх відчувати себе дурними порівняно з вами.

У моєму курсі з електрики й магнетизму є один дуже цінний для мене момент. Більшість семестру ми потроху підкрадаємося до рівнянь Максвелла, які з приголомшливою елегантністю описують зв'язок між електричними й магнітними явищами — різними виявами електромагнітного поля. У тому, як ці рівняння говорять одне з одним, є якась неймовірна розкіш. Їх неможливо розділити. Разом вони утворюють єдину теорію поля.

Тому я відображаю ці прекрасні рівняння за допомогою проектора по всій аудиторії. «Подивіться на них, — кажу я студентам. — Вдихніть їх. Впустіть їх у свій мозок. Тільки раз у житті ви можете вперше усвідомити значення всіх рівнянь Максвелла — довершених, надзвичайних і взаємопов'язаних. Більше це ніколи не повториться. Ви змінилися назавжди. Ви втратили цноту». На честь цього важливого дня в житті студентів, коли вони досягли цієї інтелектуальної вершини, я приношу на лекцію шістсот нарцисів — по одному для кожного студента.

Через багато років, уже давно забувши подробиці рівнянь Максвелла, студенти пишуть мені, що пам'ятають день нарцисів — день, коли вони по-новому поглянули на світ, який я відзначив квітами. Для мене це найвищий рівень викладання. Мені значно важливіше, щоб студенти запам'ятали красу побаченого, ніж щоб вони могли повторити те, що я написав на дошці. Головне не матеріал, який ти викладаєш, а таємниці, які ти розкриваєш.

Моя мета — допомогти їм полюбити фізику й поглянути на світ іншими очима, на все життя! Ти розширюєш їхній горизонт, і вони ставлять запитання, яких раніше не ставили. Річ у тім, щоб відкрити світ фізики так, аби поєднати його зі щирим зацікавленням студентів навколишнім світом. Саме тому я намагаюся показувати студентам ліс, а не вилазити з ними на кожне дерево. Саме це я намагався зробити й у цій книжці. Сподіваюся, вам сподобалась наша подорож.

Подяки

Ця книжка так би й залишилася нездійсненою мрією без розуму, далекоглядності, ділових якостей і моральної підтримки нашої надзвичайної літературної агентки Венді Стротман. Вона звела нас обох, знайшла для книжки правильного видавця, прочитала чорнові варіанти багатьох розділів як професійна редакторка, дала книжці назву й допомогла нам зосередитися на результаті. Також ми щасливі приймати її вірну дружбу, що підтримувала нас протягом роботи над проектом.

Важко переоцінити внесок нашої редакторки Емілі Лус, чиє бачення книжки виявилось заразним, а надзвичайна увага до стилю оповіді багато чого навчила нас обох. Попри величезний тиск індустрії, що часто змушує видавців робити все швидко заради отримання прибутку, Емілі наполягла на якісному редагуванні книжки, постійно домагаючись від нас більшої виразності, плавніших переходів і чіткішого фокусу. Завдяки її таланту й наполегливості книжка стала значно кращою. Також ми вдячні Емі Раян за майстерну коректуру рукопису.

Щодня я одержую на електронну пошту десятки чудових, часто дуже зворушливих листів від людей з усього світу, які дивляться мої лекції онлайн. Ці лекції з'явилися в інтернеті завдяки Річарду (Діку) Ларсону. У 1998 році, коли він очолював Центр розширених навчальних послуг і був викладачем факультету електротехніки в МТІ, він запропонував зняти мої досить нетрадиційні лекції на відео, щоб вони були доступні студентам з інших університетів. Значну фінансову підтримку надали Фонд Лорда в Массачусетсі й добродійна організація Atlantic Philanthropies. Ініціатива Діка стала попередником онлайн-курсів. Коли у 2001 році платформа МТІ OpenCourseWare відчинила свої двері, мої лекції стали доступними в кожному куточку світу, а зараз їх щороку переглядає мільйон людей.

У 2007 році я став героєм статті Сари Пімер, що вийшла на першій шпальті New York Times 19 грудня. Стаття мала заголовок: «71-річний професор — зірка інтернету» (At 71, Physics Professor is a Web Star).

Вона спричинила ланцюгову реакцію подій, що привела до написання цієї книжки. Дякую, Саро!

Останні два роки, навіть ті сімдесят днів, які я провів у лікарні (і ледь не помер), я не переставав думати про книжку. Вдома я постійно обговорював її зі своєю дружиною С'юзан Кауфман. Через цю книжку я не міг заснути багато ночей. С'юзан з усім цим мирилася й підбадьорювала мене. Також вона кинула своїм проникливим редакторським оком на більшість розділів книжки і помітно їх покращила.

Я надзвичайно вдячний кузині Еммі Арбель-Каллус і сестрі Беа Блоксма-Левін за те, що вони поділилися зі мною дуже болісними спогадами про події часів Другої світової війни. Я розумію, як це було важко для них обох. Це було нелегко і для мене. Дякую Ненсі Стібер, моїй близькій подрузі вже тридцять років, і за те, що вона постійно виправляє мої помилки в англійській, і за безцінні коментарі та пропозиції. Також хочу подякувати моєму другові й колезі Джорджу Кларку. Якби не він, я б не почав викладати в МТІ. Джордж дав мені прочитати поданий у Дослідницьку лабораторію Військово-повітряних сил проект компанії American Science and Engineering, з якого народилася рентгенівська астрономія.

Я вдячний Скотту Г'юзу, Енекталі Фігероа-Фелісіано, Натану Сміту, Алексу Філіппенку, Оуену Джинджерішу, Ендрю Гемілтону, Марку Віттлу, Бобу Джеффу, Еду ван ден Хевелу, Полу Мердіну, Джорджу Вудроу, Джеффу Макклінтоку, Джону Белчеру, Максу Тегмарку, Річарду Ліу, Фреду Расію, покійному Джону Гачрі, Джеффу Гоффману, Ватті Тейлору, Вікі Каспі, Фреду Баґаноффу, Рону Ремілларду, Крістін Шерратт, Марку Бессетту, Маркосу Ханкіну, Білу Сенфорду й Ендрю Нілі за допомогу в потрібний момент.

І нарешті я безмежно вдячний Воррену Гольдштейну за його терпіння і гнучкість. Напевно, часом він почувався стомленим (і, можливо, незадоволеним) від занадто великої кількості фізики за малий час.

Волтер Левін

Хочу подякувати людям, які погодилися поговорити зі мною про Волтера Левіна: Лаурі Блоксма, Беа Блоксма-Левін, Пауліні Броберг-

Левін, С'юзан Кауфман, Еллен Крамер, Вісу де Гееру, Емануелю (Чаку) Левіну, Девіду Пулі, Ненсі Стібер і Петеру Стрейкену. Усі вони суттєво допомогли мені зрозуміти Волтера Левіна, навіть якщо декого з них і не процитовано в цій книжці. Едвард Грей, Джейкоб Гарні, Лоуренс Маршалл, Джеймс Макдональд і Боб Келмер намагалися вберегти нас із Волтером від помилок у сфері їхньої спеціалізації. Хоч як би ми воліли перекласти все на них, ми беремо на себе повну відповідальність за можливі неточності. Також хочу подякувати Вільяму Лео, випускнику Університету Гартфорда 2011 року, за допомогу у важливий момент. Троє найрозумніших письменників, яких я знаю, — Марк Гунтер, Джордж Кеннер і Леннард Девіс — дали мені безцінні поради на початку роботи над проектом. Декан Джозеф Фьолькер і помічник ректора Фред Свайцер з Університету Гартфорда по-різному допомогли мені знайти час, щоб закінчити книжку. Я глибоко вдячний своїй дружині Донні Шапер — феноменальній організаторці, а також авторці, за останніми підрахунками, тридцяти книжок — яка зрозуміла та схвалила моє занурення в незнайомий світ. Вісімнадцятого жовтня 2009 року на світ з'явився наш онук Калєб Бенджамін Лурія, і ми з насолодою спостерігали, як він здійснює власні дивовижні експерименти, пізнаючи фізику в побуті. І нарешті висловлюю глибоку вдячність Волтеру Левіну, який за останні кілька років дав мені більше знань із фізики, ніж ми обоє могли собі уявити, та знову розпалив у мені пристрасть, що аж надто довго була приспана.

Воррен Гольдштейн

Додаток 1

Стегнові кістки ссавців

Логічно припустити, що маса ссавця пропорційна його розміру. Наприклад, порівняймо цуценя із дорослим собакою, який у чотири рази більший. Я припускаю, що в собаки всі лінійні розміри — висота і довжина тіла, довжина й товщина лап, об'єм голови тощо — у чотири рази більші, ніж у цуценяти. У такому разі об'єм (а отже, й маса) собаки приблизно дорівнює масі цуценяти, помноженій на 64.

Щоб краще собі це уявити, візьмімо куб зі сторонами a , b і c . Об'єм цього куба дорівнює $a \cdot b \cdot c$. Якщо збільшити всі сторони в чотири рази, об'єм стане $4a \cdot 4b \cdot 4c$, тобто $64abc$. Висловлюючись більш математичною мовою, можна сказати, що об'єм (а отже, й маса) ссавця пропорційний його довжині в третьому степені. Якщо дорослий собака в чотири рази більший за цуценя, його об'єм має бути приблизно в 4^3 , тобто в 64 рази більший. Отже, якщо ми позначимо довжину стегнової кістки l і будемо порівнювати ссавців різного розміру, їхня маса повинна бути приблизно пропорційна l^3 .

Добре, це була маса. Далі: міцність стегнової кістки, яка несе на собі всю цю вагу, має бути пропорційною її товщині, правильно? Що товщі кістки, то більше навантаження вони витримують — це зрозуміло інтуїтивно. Якщо виразити це математично, міцність стегнової кістки пропорційна площі її перерізу. Його форма близька до кола, і ми знаємо, що площа кола дорівнює πr^2 , де r — радіус кола. Таким чином, площа пропорційна d^2 , якщо d — діаметр кола.

Позначимо товщину стегнової кістки d (від «діаметр»). Виходячи із припущення Галілея, маса ссавця мала б бути пропорційна d^2 (щоб кістки витримували вагу тварини), але також вона пропорційна l^3 (це справедливо завжди, незалежно від припущення Галілея). Таким чином, якщо він мав рацію, d^2 має бути пропорційне l^3 , а це те саме, що сказати, що d пропорційне $l^{3/2}$.

Якщо порівнювати двох ссавців, один з яких у п'ять разів більший за другого (а отже, довжина його стегнової кістки l приблизно в п'ять разів більша), можна очікувати, що товщина його стегнової кістки d приблизно в $5^{3/2} = 11$ разів більша. На лекції я показав, що стегнова

кістка слона приблизно в 100 разів довша за мишачу. Тому, якщо Галілей не помилявся, ми можемо очікувати, що вона буде приблизно в $100^{3/2} = 1000$ разів товща, ніж кістка миші.

Таким чином, у дуже масивних тварин товщина кістки дорівнюватиме довжині, або навіть стане більшою, і ми отримаємо зовсім не пристосованих до життя ссавців. Це могло б пояснити, чому максимальний розмір ссавців обмежений.

Додаток 2

Закони Ньютона в дії

Закон всесвітнього тяжіння можна записати таким чином:

$$F_{\text{тяж}} = G \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (1)$$

де $F_{\text{тяж}}$ — це сила взаємного притягання між тілами масою m_1 і m_2 , а r — відстань між ними; G — коефіцієнт, який має назву гравітаційна стала.

Закони Ньютона дозволили обчислити, принаймні в принципі, масу Сонця та деяких планет.

Погляньмо, як це можна зробити. Я почну із Сонця. Припустімо, що m_1 — це маса Сонця, а m_2 — це маса планети (будь-якої). Вважатимемо, що орбіта планети — коло радіуса r , і позначмо T період обертання планети навколо Сонця (для Землі T становить 365,25 дня, для Меркурія — 88 днів, а для Юпітера — майже 12 років).

Якщо орбіта має форму кола або дуже близька до нього (а це так для п'яти із шести планет, відомих у XVII столітті), темп обертання планети постійний, але напрямок її швидкості весь час змінюється. Утім коли напрямок швидкості тіла змінюється, навіть якщо її значення залишається незмінним, це вже буде рух із прискоренням, а отже, згідно із другим законом Ньютона, має бути сила, яка надає тілу цього прискорення.

Ця сила має назву доцентрової ($F_{\text{дц}}$), і вона завжди спрямована від рухомої планети до Сонця. Звісно, Ньютон не був би Ньютоном, якби не з'ясував, як обчислити цю силу (я виводжу цю формулу під час лекції). Значення доцентрової сили дорівнює

$$F_{\text{дц}} = \frac{m_2 v^2}{r}, \quad (2)$$

де v — швидкість руху планети. Але ця швидкість дорівнює окружності орбіти $2\pi r$, поділеній на час T , за який планета робить повний оберт навколо Сонця. Отже, ми можемо записати формулу так:

$$F_{\text{дц}} = \frac{4\pi^2 m_2 r}{T^2}. \quad (3)$$

Звідки береться ця сила? Яке її походження? Ньютон зрозумів, що це має бути гравітаційне притягання Сонця. А отже, дві сили у наведених вище формулах — це одна й та сама сила; вони рівні:

$$F_{\text{тяж}} = F_{\text{дц}} \quad (4)$$

Якщо ще трохи погратися із цією формулою, переставивши змінні (для вас це нагода освіжити шкільні знання з алгебри), ми отримаємо масу Сонця:

$$m_1 = \frac{4\pi^2 r^3}{GT^2} \quad (5)$$

Зверніть увагу, що у формулі (5) уже немає маси планети (m_2). Її вже можна не розглядати. Нам потрібна тільки середня відстань від планети до Сонця та період її обертання T . Хіба вас це не дивує? Урешті-решт, m_2 є у формулах (1) і (2). Але наявність маси планети в обох формулах якраз і є причиною того, що коли ми зрівнюємо $F_{\text{тяж}}$ та $F_{\text{дц}}$, змінна m_2 виключається. У цьому вся краса цього методу, і цим ми завдячуємо серу Ньютону.

Із формули (5) випливає, що співвідношення r^3/T^2 однакове для всіх планет. Попри те що вони перебувають на зовсім різній відстані від Сонця та мають цілком різні періоди обертання, значення r^3/T^2 для всіх однакове. Це дивовижне відкриття зробив німецький астроном і математик Йоганнес Кеплер ще в 1619 році, задовго до Ньютона. Але ніхто не міг бодай якось пояснити, чому це співвідношення (куба радіуса до квадрата періоду обертання) постійне. Лише геніальний Ньютон через 68 років показав, що це випливає з його законів.

Таким чином, якщо нам відома відстань від будь-якої планети до Сонця (r), період обертання планети (T) і гравітаційна стала (G), ми можемо за допомогою формули (5) обчислити масу Сонця (m_1).

Періоди обертання планет з високою точністю були відомі задовго до XVII століття. Відстані від планет до Сонця також було давно визначено з високою точністю, але тільки у *відносному* вимірі. Інакше кажучи, астрономи знали, що середня відстань від Венери до Сонця становить 72,4 відсотка відстані від Землі до Сонця, а Юпітер перебуває у 5,2 раза далі від Сонця, ніж Земля. Проте абсолютні значення цих відстаней — це вже зовсім інша історія. У XVI столітті, за

часів великого данського астронома Тихо Браге, вважалося, що відстань від Землі до Сонця у 20 разів менша, ніж насправді (це приблизно 150 мільйонів кілометрів). На початку XVII століття Кеплер отримав точніший результат, але він усе одно був у сім разів менший за реальну відстань.

Як видно із формули (5), маса Сонця пропорційна кубу його відстані (до планети), тому якщо відстань r буде в сім разів менша за реальну, маса Сонця буде менша за фактичну в 7^3 , тобто у 343 рази — не надто цінний результат.

Поступ стався в 1672 році, коли італійський учений Джованні Кассіні виміряв відстань від Землі до Сонця із точністю приблизно 7 відсотків (для тих часів вражаючий результат), а отже, для r^3 похибка була лише майже 22 відсотки. Похибка для G становила, очевидно, мінімум 30 відсотків. Тому припускаю, що на кінець XVII століття маса Сонця могла бути визначена з точністю не менше ніж 50 відсотків.

Оскільки відносні відстані від Сонця до планет були відомі досить точно, знаючи абсолютну відстань від Сонця до Землі із точністю до 7 відсотків, у кінці XVII століття можна було обчислити абсолютні відстані від Сонця до решти п'яти відомих планет із тією самою точністю.

За допомогою описаного вище способу обчислення маси Сонця можна також визначити масу Юпітера, Сатурна і Землі. Було відомо, що всі ці планети мають супутники. У 1610 році Галілео Галілей відкрив чотири супутники Юпітера, які зараз називають Галілеєвими супутниками. Якщо m_1 — маса Юпітера, а m_2 — маса одного з його супутників, ми можемо обчислити масу Юпітера за допомогою формули (5), так само, як і масу Сонця, тільки r у цьому випадку — відстань між Юпітером і його супутником, а T — період обертання цього супутника навколо Юпітера. Чотири Галілеєві супутники (загалом їх у Юпітера 63!) мають періоди обертання 1,77 дня, 3,55 дня, 7,15 дня і 16,69 дня.

Із часом відстані та гравітаційну сталу G виміряли значно точніше. На початок XIX століття похибка для значення G становила приблизно 1 відсоток. Похибка для прийнятого зараз значення становить майже 0,01 відсотка.

Розгляньмо конкретний приклад. За допомогою формули (5) обчислимо разом масу Землі (m_1), скориставшись орбітою Місяця (маса якого m_2). Щоб отримати правильний результат, відстань r потрібно перевести в метри, а період T — у секунди. Тоді якщо ми візьмемо значення G $6,673 \cdot 10^{-11}$, то одержимо масу в кілограмах.

Середня відстань до Місяця (r) дорівнює $3,8440 \cdot 10^8$ метрів (384 400 кілометрів). Період його обертання (T) становить $2,3606 \cdot 10^6$ секунд (27,32 дня). Якщо підставити ці числа у формулу (5), отримаємо результат $6,030 \cdot 10^{24}$ кілограмів. Найточніше на сьогодні значення маси Землі приблизно дорівнює $5,974 \cdot 10^{24}$ кілограмів, що лише на 1 відсоток менше за те, яке я обчислив. Звідки різниця? По-перше, формула, якою ми скористалися, виходить із того, що орбіта Місяця має форму кола, тоді як насправді вона видовжена, або еліптична. У результаті мінімальна відстань до Місяця становить приблизно 363 000 кілометрів, максимальна — майже 406 000 кілометрів. Звісно, закони Ньютона можна спокійно застосовувати і для еліптичних орбіт, але від тієї математики у вас може закипіти мозок. Можливо, це вже сталося!

Є ще одна причина, чому наші обчислення дали не зовсім точний результат. Ми припустили, що Місяць обертається навколо Землі по колу і що центр цього кола збігається із центром Землі. А отже, у рівностях (1) і (3) ми прийняли за r відстань між Землею та Місяцем. Це справедливо для рівності (1), проте, як ішлося в розділі 13, як Місяць, так і Земля обертаються навколо спільного центра мас системи Місяць-Земля, розташованого приблизно на 1600 кілометрів нижче земної поверхні. Тому значення r у рівності (3) трохи менше, ніж у рівності (1).

Живучи на Землі, ми можемо обчислити масу своєї планети іншими способами. Один з них — виміряти прискорення вільного падіння біля її поверхні. Будь-яке тіло з довільною масою m , якщо відпустити його з висоти, падатиме із прискоренням g , яке приблизно дорівнює 9,82 метра на секунду у квадраті²³. Середній радіус Землі — майже $6,371 \cdot 10^6$ метра (6371 кілометр).

А тепер повернімося до формули (1). Оскільки $F = ma$ (за другим законом Ньютона), тоді

$$G \frac{m_{\text{землі}} m}{r^2} = mg, \quad (6)$$

де r — радіус Землі. Знаючи, що $G = 6,673 \cdot 10^{-11}$, $g = 9,82$ метра на секунду у квадраті, а $r = 6,371 \cdot 10^6$ метрів, ми можемо обчислити $m_{\text{землі}}$ в кілограмах (спробуйте самі!). Якщо трохи спростити рівність (6), отримаємо:

$$m_{\text{землі}} = \frac{gr^2}{G}. \quad (7)$$

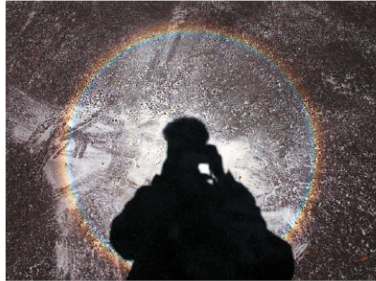
У мене $m_{\text{землі}}$ становить $5,973 \cdot 10^{24}$ кілограмів (вражає, правда?).

Зверніть увагу, що у формулі (7) уже відсутня маса скинутого тіла m . У цьому немає нічого дивного, адже маса Землі ніяк не може залежати від маси тіла, яке на неї скинули.

Вам також може бути цікаво знати, що, на думку Ньютона, середня густина Землі становить 5000–6000 кілограмів на кубічний метр. Це не було висновком з якихось астрономічних спостережень і не мало жодного стосунку до котрогось із його законів; це була просто гіпотеза. Насправді середня густина Землі становить 5540 кілограмів на кубічний метр. Якщо дозволите записати припущення Ньютона як 5500 ± 500 кілограмів на кубічний метр, то похибка його результату складає лише 10 відсотків (дивовижно!).

Не знаю, чи сучасники Ньютона сприйняли його припущення за правду, але припустімо, що так. У XVII столітті радіус Землі вже був відомий, тому в ті часи можна було б обчислити її масу із точністю до 10 відсотків (маса — це об'єм, помножений на густину). Тоді можна було б за допомогою формули (7) обчислити G із такою самою точністю. Я розповідаю про це, бо мене захоплює думка, що якби сучасники зважили на гіпотезу Ньютона про середню густину Землі, уже в кінці XVII століття було б можливо визначити гравітаційну сталу G із точністю до 10 відсотків.

23 До речі, на екваторі це прискорення на 0,18 відсотка менше, ніж на полюсах — тому що форма Землі неідеальна. На екваторі порівняно з полюсами тіла віддалені від центра Землі приблизно на 20 кілометрів більше, тому значення g там менше. Згадані 9,82 метра на секунду у квадраті — це середнє значення.



Скляна веселка навколо тіні Волтера Левіна на території музею deCordova в Массачусетсі.
«Астрономічна фотографія дня» за 13 вересня 2004 року. Фото надав Волтер Левін.



Стіна туману вкриває телескоп БТА на Північному Кавказі (Росія). Фото надав Волтер Левін.



Коли туман наблизився (точно за розкладом), сонце було ще високо, і от результат — «святий Волтер». Фото надав Волтер Левін.



Біла веселка поблизу Піка Пайкс у Колорадо. Зверніть увагу на темну смугу на внутрішньому краї — додаткову веселку. Фото надав Войтек Рихлік.



Подвійна веселка над радіообсерваторією «Дуже велика антена» (Very Large Array) у штаті Нью-Мексико. Зверніть увагу, що в первинній веселки червона смуга розташована із зовнішнього краю, а у вторинної — із внутрішнього. Крім того, небо всередині первинної веселки значно світліше, ніж за її межами. Утім усередині вторинної веселки небо темніше, ніж за нею. Дуже темну ділянку між дугами називають смугою Александра. Фото надали Кеннет Ланг (Університет Тафтса) і Даглас Джонсон (Обсерваторія Інституту Баттеля, Вашингтон).



Дочка Волтера Левіна Емма холодного зимового дня безстрашно допомагає батькові створити веселку. Фото надав Волтер Левін.



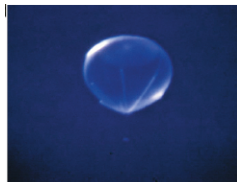
Додаткові веселки — повторювані зелені й фіолетові смуги. Фото надав Ендрю Данн.



Глорія навколо тіні літака, фотографія Волтера Левіна. Його місце (одразу за крилами) — у центрі глорії. Фото надав Волтер Левін.



Запуск повітряної кулі об'ємом більше мільйона кубічних метрів із Еліс-Спрінгс, Австралія. Фото надав Волтер Левін.



Повітряна куля об'ємом мільйон кубічних метрів на висоті 45 кілометрів крізь телескоп. Фото надав Волтер Левін.



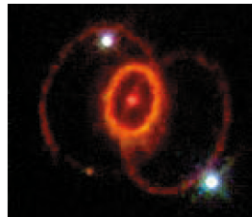
Повітряну кулю об'ємом 960 000 кубічних метрів наповнюють газом, світанок 15 жовтня 1970 року, Мілд'юра, Австралія. Під час цього запуску група Левіна відкрила джерело GX 1+4 і його змінність із періодом 2,3 хвилини. Фото надав Волтер Левін.



Інсталяція Отто Піне «Веселка» для закриття літніх Олімпійських ігор 1972 року в Мюнхені. У її створенні брав участь Волтер Левін (див. розділ 15). Фото надав Вольф Губер.



Крабоподібна туманність (діаметр — приблизно 11 світлових років). Блакитне світло — це випромінювання електронів, які обертаються навколо магнітного поля в туманності. Волокна — залишки атмосфери зорі, що вибухнула в 1054 році. Із Землі туманність здається приблизно в шість разів меншою за Місяць. *Фото надали NASA й команда проекту «Спадщина Габбла». Права на фото належать NASA/ESA/JPL/Arizona State University.*



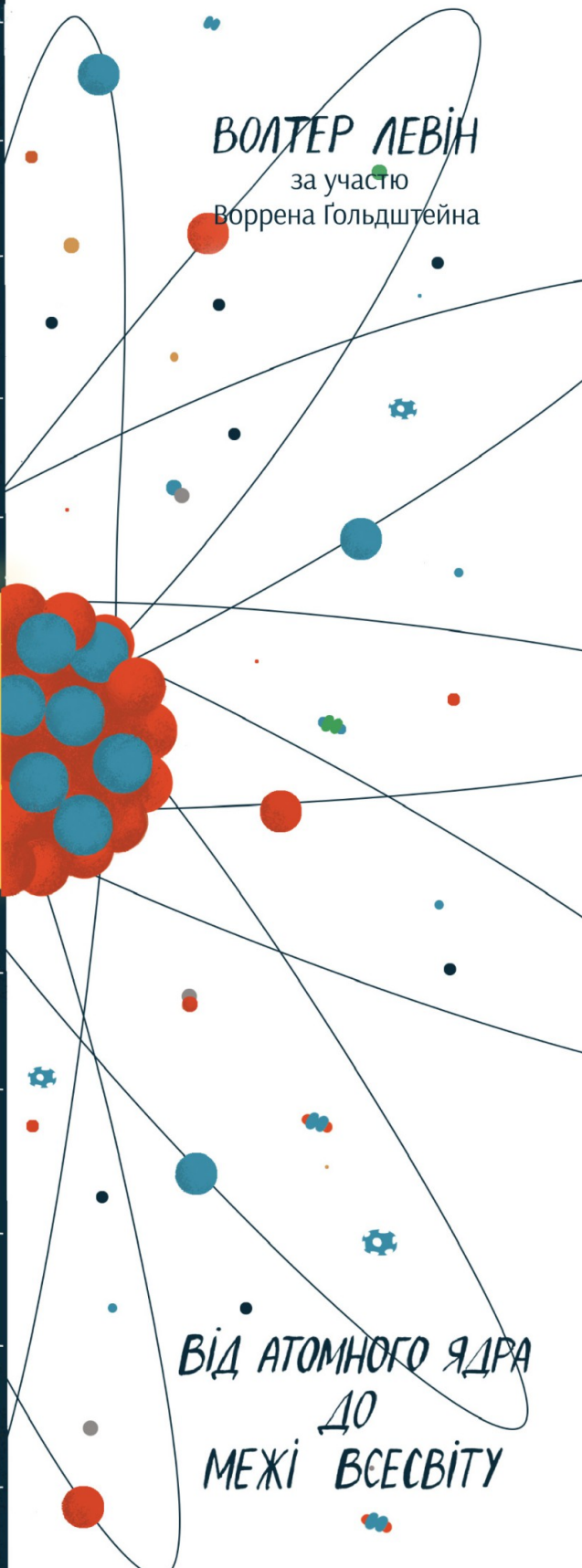
Наднова SN 1987A. Три кільця на зображенні — речовина, яку викинула зоря за тисячі років до спалаху. Про найяскравіше внутрішнє кільце докладно розповідається в розділі 12. У центрі кільця видно світло від зорі, що спалахнула. Дві білі зорі не пов'язані з надновою SN 1987A. *Фото надали д-р Крістофер Барроуз, ESA/STSci та NASA.*



Художнє зображення подвійної зоряної системи Лебідь X-1. Ліворуч — зоря-донор HDE 226868, що, за оцінками, приблизно в 30 разів масивніша за Сонце. Праворуч — акреціювальна чорна діра з акреційним диском, що утворився внаслідок перетікання газу із зорі-донора. Маса чорної діри приблизно в 15 разів більша за масу Сонця. *Фото надали ESA, Hubble.*



ПРОСТА
Фізика



ВОЛТЕР ЛЕВІН

за участю
Воррена Гольдштейна

ВІД АТОМНОГО ЯДРА
ДО
МЕЖІ ВСЕСВІТУ