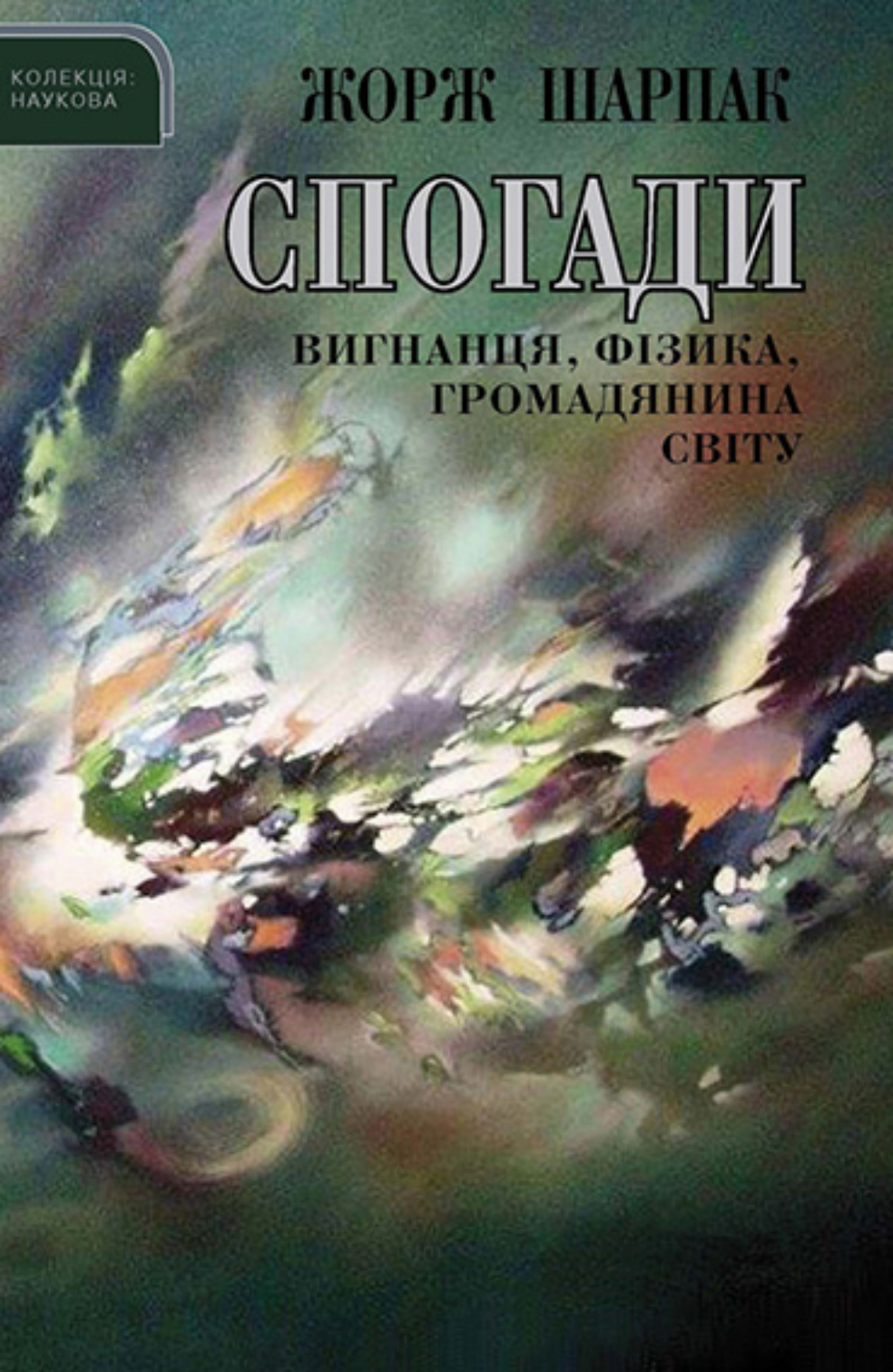


КОЛЕКЦІЯ:
НАУКОВА

ЖОРЖ ШАРПАК

СПОГАДИ

ВИГНАНЦЯ, ФІЗИКА,
ГРОМАДЯНИНА
СВІТУ



*Це видання було здійснене в рамках Програми сприяння
видавничій справі «СКОВОРОДА» Посольства Франції в Україні
та Міністерства закордонних справ Франції*

*Cet ouvrage a été publié dans le cadre du Programme d'Aide
à la Publication «SKOVORODA» de l'Ambassade de France en Ukraine
et du Ministère français des Affaires Etrangères*

*Видання здійснене за підтримки
Міністерства з питань культури Франції —
Національного центру книги*

*Ouvrage publié avec le concours
du Ministère français chargé de la Culture —
Centre national du livre*

Avec le soutien du



*Видання здійснене за підтримки
президента Малої академії наук України С.О. Довгого*

*Cet ouvrage est réalisé grâce au soutien du président de la Jeune
académie des sciences de l'Ukraine prof. Stanislav Dovguy*



МАЛА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ

*Видавництво дякує за сприяння
Європейській академії наук, мистецтв і літератури*

*Nous remercions l'Académie européenne des sciences,
des arts et des lettres pour le soutien de cet ouvrage*



Georges Charpak

MÉMOIRES
d'un déraciné, physicien
et citoyen du monde

avec la contribution
de François Vannucci, Roland Omnès
et Richard L. Garwin



Жорж Шарпак

**СПОГАДИ
ВИГНАНЦЯ, ФІЗИКА,
ГРОМАДЯНИНА СВІТУ**

*За участі
Франсуа Вануччі, Ролана Омнеса
та Річарда Л. Гарвіна*

*З французької переклав
Іван Рябчій*

ББК 84.4 Фра-44

Ш-26

Жорж Шарпак

СПОГАДИ ВИГНАНЦЯ, ФІЗИКА, ГРОМАДЯНИНА СВІТУ

З французької переклав Іван Рябчій

Перекладено за виданням:

Georges Charpak

MÉMOIRES

d'un déraciné, physicien et citoyen du monde

Éditions Odile Jacob, Paris

ISBN: 978-2-7381-2406-7

© *Éditions Odile Jacob, 2008, 2010*

У книжці спогадів видатний французький фізик і громадський діяч єврейсько-українського походження, лауреат Нобелівської премії з фізики 1992 р. Жорж Шарпак (1924—2010) постає в різних іпостасях: і як учасник руху Опору за часів Другої світової війни, і як один із засновників Європейського центру ядерних досліджень ЦЕРН у Женеві, і як невтомний дослідник, і як педагог-подвижник, і як завзятий захисник ідеї мирного атому. Книжка містить унікальний «літопис» фізики елементарних частинок і цінні міркування про єдність мистецтва і науки.

На обкладинці книжки використано роботу

Н. Лемер Д'Агаджіо «Повернення весни»,

дозвіл на використання якої люб'язно надано Автором.

Усі права застережені. Жодну частину цього видання не можна перевидавати, перекладати, зберігати в пошукових системах або передавати у будь-якій формі та будь-яким засобом (електронним, механічним, фотокопіюванням або іншим) без попередньої письмової згоди на це **ТОВ «Видавництво Анетти Антоненко».**

© *Éditions Odile Jacob, 2008, 2010*

© *Іван Рябчій, український переклад, 2014*

© *Станіслав Довгий, передмова, 2014*

© *Nicole Lemaire D'Agaggio, передмова, 2014*

© *«Видавництво Анетти Антоненко», 2014*

ISBN 978-617-7192-08-3

ISBN 978-617-7192-07-6

(Серія «Колекція наукова»)

Наука і мистецтво — разом

У давнину те, що нині знаємо як «науку» і «мистецтво», являли собою одне ціле, і лише згодом було штучно розділене. І все ж архітектура та музика досі не можуть обійтися без математики, живопис і скульптура — без знання властивостей матеріалів, а кінематограф навряд чи можливий без володіння комп'ютерною графікою, спеціальними системами освітлення, зйомки й озвучення... Що ж до літератури, або — ширше — мови, то вона є основним носієм наукових знань, і часом навіть перетворюється на зручне знаряддя наукового експерименту. Так, роман «Гора Аналог» французького письменника Рене Домая є свого роду філософсько-психологічним дослідом з вивчення власного внутрішнього світу. А поезія Жака Пеллетьє дю Манса — ренесансними гімнами точній науці, де вперше лунає чимало думок, які знайдуть розвиток у науковому процесі ХХ ст. Багато хто з митців може претендувати на звання науковця: маляр та інженер Леонардо да Вінчі, вже згаданий психолог і письменник Рене Домаль, художник, що дослідив властивості світла — Ель Греко, а також архітектор Ле Корбюзьє, який уславився у багатьох галузях — живописі, дизайні, скульптурі, літературі тощо.

Незважаючи на це, питання створення окремого напрямку «Наука і мистецтво» постало лише наприкінці минулого століття. Нині це — один із основних

аспектів діяльності ЮНЕСКО та організацій, які співпрацюють із нею. Європейська академія наук, мистецтв і літератури поставила кооперацію науки з мистецтвом своєю головною метою, і доказом цьому є міжнародні колоквиуми, що їх проводить ця наукова організація.. Іде цим шляхом і Мала академія наук України (МАН) — вже третій рік влаштовуємо заходи, на яких представляємо як наукові досягнення наших учнів, так і твори культурної спадщини, матеріальної (живопис та графіка) і нематеріальної (співи та поезія). У 2012 р. в Парижі відбулася виставка «Талант і інтелект», яка поєднала науково-технічні розробки учнів МАН, пісенну творчість Андрія Малишка та художні роботи талановитої юної малярки з Полтави Саші Путрі. А цього року ми презентували виставку художніх робіт Тараса Григоровича Шевченка та науково-освітній інтернет-портал, присвячений його життю та творчості, в Іспанії, Франції та Італії.

Саме тому Жорж Шарпак — універсальна, всебічно обдарована особистість — є для нас орієнтиром. Я щасливий, що людина, яка стояла у витоків Європейської організації ядерних досліджень ЦЕРН та французької асоціації підтримки наукової освіти в школі «Руки в тісті» (*La main à la pâte*), народилася в Україні. Я щасливий, що маємо змогу представити українському читачеві спогади й роздуми цього непересічного діяча. Тут Ви знайдете і біографію Шарпака — рух Опору, навчання під керівництвом Фредеріка Жоліо-Кюрі, заснування ЦЕРН, неймовірні задуми та відкриття, — і свого роду літопис фізики елементарних частинок, і історію громадської діяльності вченого. Долучитися до долі та легенди Жоржа Шарпака для нас — велика честь! Особливо ж у рік 90-річчя видатного вченого та 60-річчя ЦЕРН. МАН уже не перший рік співпрацює з Європейською організацією ядерних досліджень, і візити до адронного колайдера

для десятків українських школярів стали потужним поштовхом до дорослої науки.

Хочу зазначити також, що спогадами видатного сина України і Франції МАН відкриває серію видань, присвячених відомим діячам науки. Кожен з них стане для Вас маленьким відкриттям.

*Президент МАН
Станіслав Довгий*

Вчений, який єднав континенти

Жорж Шарпак тривалий час був дійсним членом нашої Європейської академії наук, мистецтв і літератури, започаткованої 1980 р. Авжеж, ми нечасто бачили його на наших зібраннях, адже він увесь час брав участь у наукових дебатах та вів активне громадське життя. Проте він завжди знаходив можливість ввічливо вибачитися за те, що не може бути присутнім. І ми не тримали на нього зла, тому що знали: Шарпака залучено до численних проєктів, зокрема до вдосконалення апаратури для отримання медичних світлин; ми розуміли, що він був одним із найзавзятіших захисників «мирного атому» і ніколи не припиняв боротьби проти розповсюдження ядерної зброї...

Пригадую, як він долучився до нової для нього справи — заохочення школярів до вивчення точних наук. Він постійно ходив по школах! Авжеж, ми вже тоді зрозуміли значення тієї діяльності, але на той час наукової освіти для школярів не було серед напрямків роботи Академії. Нашою стратегічною метою було зближення двох Європ: Західної та Східної.

Цю мету ми переслідували від самого моменту створення Академії. Тоді це здавалося ризикованим вибором. Однак упродовж кількох наступних років дві частини Європи справді об'єдналися! Як виявилося, ми мали рацію. Почалась активна співпраця з ЮНЕСКО.

Разом із цією міжнародною організацією ми стали першими, хто насмілився вірити в об'єднання Європи та працювати у цьому напрямку. Ми зводили мости між націями, відрізаними одна від одної.

Мені поталанило переконати високопосадовців Франції та інших країн Західної Європи, а також численних лауреатів Нобелівської премії, що наша робота мусить концентруватися навколо ідеї зближення двох Європ. Спираючись на уряди європейських країн та ЮНЕСКО, ми почали працювати зі Східною Європою. Ми змогли прийняти у Франції чимало відомих інтелектуалів із тих країн.

Історія довела, що ми мали рацію. У ніч проти 10 листопада 1989 р. Берлінський мур упав...

Тоді з'явилося чимало інших європейських академій — їм уже не було чого остерігатися. А ми вже думали про нові перспективи.

З 1990 р. я пропонувала відкрити нашу Академію для інших регіонів світу. Мене підтримували, але всі сходилися на тому, що Академія мусить лишатися євроцентричною. Адже ми були та є передусім європейцями! Хоч би хто переконував нас у протилежному...

Саме тому Європейська академія наук, мистецтв і літератури налагодила зв'язки з 55-и національними академіями в різних частинах світу, саме тому серед наших членів — близько півсотні нобеліантів, саме тому ми відкриваємо представництва в інших регіонах, встановлюючи контакти з Канадою, США, Південною Америкою, Китаєм, Японією, Африканським континентом... На прохання ЮНЕСКО наша Академія приділятиме більше уваги Африці. У 2015 р. в марокканському місті Марракеш пройде міжнародний колоквиум «Світло на службі людства», в якому візьмуть активну участь країни не лише Магрибу, а й усієї Африки.

Ось, у кількох словах, те, що я передбачила ще 1980 р. Варто сказати, що 1974 р. висловлювати вголос думку про можливість створення Європейської академії було небезпечно. А я це зробила у Кремлі під час поважного Конгресу миру! Я перебувала там у складі французької делегації. Виявилось, що моя ідея вписалася в Історію. І я зігнорувала страхи, побоювання, ідеологічні перестороги, численні непорозуміння та дурні передчуття різноманітних світових потуг, які не бажали бачити Європу сильною. І сьогодні я майже погоджуюсь зі славетною фразою Шарля де Голля, сказаною в листопаді 1959 р.: «Так, саме Європа — від Атлантики до Уралу — саме Європа, об'єднана Європа вирішить долю світу!»

На моє переконання, народи Європи повинні об'єднати зусилля та зберегти цінності, притаманні саме їм. Цінності, які подарували нам таких видатних людей, як Жорж Шарпак. Адже він поєднував континенти: Європу Східну та Західну (бо народився в Україні, а жив у Франції), Близький Схід і Європу (адже частина дитинства Шарпака минула в Ізраїлі), Північну Америку та Європу (методи американської педагогіки він активно поширював у Франції), Росію та Європу (Шарпак підтримував радянських дисидентів, а його лабораторія плідно працювала з російськими колегами). Це була потужна багатогранна особистість, яка вміла обстоювати свою думку. І його слова завжди знаходили адресатів.

Хочу зауважити, що завдання та робота Малої академії наук України повністю збігаються з настановами Шарпака. Дітей змалку треба при звичаювати до Науки. Країнам Європи варто повчитись у Малої академії та перейняти досвід заради майбутнього континенту.

*Д-р Ніколь Лемер Д'Агажжйо
Засновниця і довічний секретар
Європейської академії наук, мистецтв і літератури
Кавалер Ордена Почесного легіону*

Частина перша

ВИГНАНЕЦЬ

Жорж Шарпак

Розділ перший

Поневіряння іммігранта з Центральної Європи

Я народився 1924 р. в одному з долинних українських містечок¹ і — через географічні, політичні та культурні обставини — мусив поневірятися, що глибоко й назавжди позначилося на мені.

Прийшов я на світ у кількох десятках кілометрів від кордону, накинутаго більшовикам у 1922 р. після того, як їх перемогло польське військо, підтримане Союзниками, що здолали Німеччину². Той край роками плюндрували численні етнічні та ідеологічні групи, що часом сходились у жорстоких двобоях: українські націоналісти, поляки, анархісти. Останніми командував Махно, якого поборники з усіх куточків світу вважають героєм.

Два роки життя минуло у Хайфі, в Палестині, де мої батьки довбали ріняк. До Польщі вони повернулися 1928 р. з незрозумілих міркувань — певно, керуючись втомою від надміру тяжкої праці та невпинних хвороб їхніх дітей.

Франція — нова батьківщина

Скільки вражаючих, переважно щасливих випадковостей траплялося в моєму житті! Коли у віці семи років я вперше потрапив до Франції, то вона видалася мені раєм! Окрім героїв, які захищали Дрейфуса, та антисемітів,

які не могли змиритися з його виправданням³, Францію населяли здебільшого толерантні люди. Я успішно влився до паризької комунальної школи і вже за рік вільно спілкувався французькою. Потроху примусив батьків говорити цією мовою вдома. Я володів п'ятьма-шістьма мовами, серед яких була польська, яку я вчив упродовж двох років у школі в польській частині України⁴. Я ще довго зберігав уривки цих мов, і згодом це допомогло мені стати портьє в одному дуже космополітичному готелі, а під час війни, напевно, не раз рятувало життя.-

Прибувши до Франції, я — вигнанець і апатрид — знайшов нову батьківщину. Опинившись серед своїх нових шкільних друзів, я швидко прийняв більшість французьких героїв, через яких виникає гордість за належність до цієї країни. Подолавши мовну перепону, я захопився Жулем Верном, Александром Дюма та багатьма іншими авторами, що відшліфували мою літературну освіту.

Найкраще мені давалася геометрія. Чудові були вчителі. Легко здолавши програму початкової школи, я перестрибнув через два класи і — за рік до іспиту на бакалавра — вступив до ліцею ім. Св. Людовіка, розташованого неподалік від нашого дому⁵. Хутко надолужив відставання в літературі. Більшість учнів ліцею кепсько знали точні науки, бо мусили вчити давньогрецьку й латину, що було необхідно для інтелектуальної еліти.

На дворі був 1939 р., назріла й вибухнула війна.

Я захоплювався математикою. У 1941 р. вступив на перший курс спеціалізованого математичного класу ліцею ім. Св. Людовіка. Було мені 17 років. Перемога німців завадила спокійному життю ліцеїста, поглиненого навчанням.

Нацистська катастрофа перевернула моє життя.

Кілька років ми мешкали в Парижі в кімнатці для прислуги. Спати мені доводилося в одному ліжку з моїм

братом Андре, молодшим за мене на чотири роки⁶. Батьки жили дуже скромно з невеличких підробітків: мама щось шила вдома, тато на ровері розвозив крам по єврейських харчових крамничках Парижа. Проте вони ні за що в світі не пропустили би виступ хору Червоної армії. Це нагадувало їм пісні, чувані у дитинстві. Батьки із захватом читали російських класиків — Толстого, Достоевського, — добре знали російські традиції. Пригадую, як мама, підкликаючи таксі, зверталася до водія російською, бо найчастіше таксистами ставали емігранти. У Росії батьки кілька років ходили до школи, тож удома, коли хотіли, щоб діти їх не зрозуміли, спілкувалися бездоганною російською мовою. Я зберіг ностальгію за цією чудовою мовою, і перегадом, у в'язниці в Монпельє, намагався її опанувати. А що ще робити в тюрмі 18-річному хлопцеві, як не студіювати російську мову, математику, готуватися до втечі й по сто разів здійснювати навколосвітню подорож разом із сімома сусідами по малесенькій камері?

У Франції ми поринули у вир насиченого політичного життя. У 1932—1940 роках і всередині країни, і зовні відчувалася загроза фашизму. Під час німецької окупації прихильники гітлерівського режиму вільно поширювали свої погляди, залюбки долучаючись до спроб винищення євреїв.

Під впливом шкільних друзів я в ранньому віці вступив до кількох антифашистських організацій — молодіжне крило соціалістичної партії «Червоні соколи» та «Притулки для молоді» анархо-троцькистського нахилу⁷. У віці 15 років, під час політичної лихоманки 1936 р. я ходив по заводах читати страйкарям напам'ять Превера й церковні служби, співав з ними у хорі⁸.

Коли 1941 р. режим Віші примусив євреїв носити жовті зірки⁹, наша родина, природно, відмовилася.

Мої політичні зв'язки допомогли отримати французькі документи на ім'я Шарпантьє.

Клас вищої математики ліцею Святого Людовіка я відвідував як інтерн, намагаючись якомога рідше потрапляти під облоги. У липні 1942 р. один шкільний товариш, батько якого був поліціантом, попередив, що наступного дня нашу родину збиралися заарештувати, відвезти до Дрансі¹⁰ та депортувати. Того ж вечора ми вирішили втекти на південь країни. Я щойно склав письмові іспити до Національної фізико-хімічної школи й мусив поквапитися на усний іспит¹¹.

Я перетнув демаркаційну лінію та оселився по інший бік — у Краю Басків, що прилягав до неї¹². Батьків перевезли рідні моїх однокласників, вони теж перетнули лінію, і ми нарешті зустрілися на вільній землі, яку, втім, невдовзі — у листопаді 1942 р. — також захопили німці.

Я вступив до ліцею в Монпельє до спеціалізованого математичного класу під новим іменем — Шарпантьє. Навчання було на дуже високому рівні, у мене з'явилися близькі друзі. Мешкав я з мамою, тато працював на бійні, а братика прихистила одна родина в департаменті Лозер. Там я долучився до руху Опору, отримав звання лейтенанта Французьких внутрішніх сил, і сталося неминуче.

Мене заарештували, судили французьким військовим трибуналом, який виніс вирок. Я опинився в центральній в'язниці містечка Ейс¹³, де скніли 1200 в'язнів уряду Віші — цвіту Опору та чимало іспанців, які воювали у Франції та дії яких визначили як «терористичні».

Що мені залишалось? Кілька книг з математики допомогли подолати занадто одноманітне життя у в'язниці. Ми готували втечу, яка не здійснилася. Я вперше в житті тримав у руках рушницю, відібрану в охоронців, а інші, поки там що, роздавали зброю, яку союзники скинули парашутами.

На нас напали вояки режиму Віші. Усіх поранених стратили. Мені пощастило — кулі просвистіли біля самих вух, але я залишився неушкодженим.

Невдовзі охоронців, серед яких у нас з'явилися друзі, замінили на ополченців, а після висадження союзників у Нормандії нас забрала дивізія Das Reich, яка згодом «відзначилась» у масових убивствах в Орадурі-на-Глані¹⁴.

Після тимчасового перебування в концентраційному таборі у Комп'ені 18 червня 1944 р. нас перевели до Дахау¹⁵. Я мав нагоду на власній спині відчути, як дисципліна та братерство можуть міцно зв'язати людей. За три дні подорожі у вагоні для худоби, куди нас напхали понад сотню, ніхто не помер. А в наступному «потязі смерті» — він прибув 5 липня — дев'ятсот французів загинули, збожеволівши під час поїздки.

У Дахау я лишався недовго, адже нацистський керманіч німецької промисловості Альберт Шпеер переконав Гітлера, що безглуздо кидати до газових камер депортованих, цілком придатних до праці — краще забезпечити Райх вкрай необхідними робітниками¹⁶.

Частину з нас віддали військово-повітряним силам як рабів. Нас розмістили в цеху в баварському містечку Ландсберг-ам-Лех. Вояки СС охороняли нас, установлювали порядок денний, проте їхня влада цілковито спиралася на будівельників, що подовжували злітну смугу. Сюди мали сідати реактивні винищувачі, що повинні були битися проти повітряних фортець, які нищили німецькі міста.

Довелося стати землекопом. Аби раби працювали краще, їх слід було годувати, тож супчик тут виявився трохи кращим, ніж у Дахау! Жорстокість есесівців перепиняли бригадири — це, за їхніми словами, призводило до зниження темпу роботи. Серед цих німців траплялися сміливці, що ненавиділи гітлерівський режим.

Я добре пам'ятаю Буффало Білла — гіганта-бригадира, який щораз, як доводилося пхати вагонетку з ґрунтом, велів удавати, що штовхаємо, насправді ж брався до роботи сам. А інший щораз, як закінчували рити траншею з трубою для відведення води, вправно стрибав до канави і затикав трубу кількома грудками землі. По десяти роках ми радо дізналися, що один із літаків, приземлившись, провалився разом зі злітною смугою.

Коли в когось із нас болів зуб, його відвозили до поліклініки, де військовий лікар хутко висмикував джерело болю. Я не раз супроводжував групу хворих, бо лише я знав ритуали вітання німців при вході та виході — це були глибоко приховані рештки моєї обізнаності з ідиш. Дантист просив вартового почекати назовні та завжди з повагою вітався зі мною, розповідаючи, що варвари відступають і невдовзі нас звільнять. Він вилікував мене, вирвавши корені, але залишивши неушкодженими зуби, які — як казав він — мені ще знадобляться. Його виказали, тож нас перевели до сусіднього табору для євреїв, де дантисти були справжніми м'ясниками. Проте мене залишили в супроводжуваних, бо лише я міг витлумачити гавкіт, необхідний для проходу на територію табору.

У нашому бараку есесівці обмежували свій дебош: адже вони мали стежити, щоб працівники викладалися максимально і злітна смуга будувалася якомога швидше. Обмежити їх можна було й іншим робом. У бараку був один молодий поляк, Стубс, що користувався привілейованим статусом. Йому пощастило вижити під час експерименту, коли визначали шанси на виживання потерпілого кораблетрощу посеред холодних океанічних вод. Стубс мав спеціальну дієту і неважку роботу комірника і чистильника одягу. Щотижня він віз вантажівкою до Дахау купу сорочок із живою вошвою, а наступного тижня сорочки поверталися вже без вошви. Це мало вберегти нас від тифу. Один есесівець, що втратив контроль

над собою й побив Стубса, постав перед трибуналом за грубе порушення дисципліни, яке завадило важливому науковому експерименту.

Якось, темної та морозної ночі, один із в'язнів — колишній французький високопосадовець — подався до комори кроїти собі онучі. Бідолаха вибрав чудовий шмат, який, на жаль, виявився шинеллю есесівського офіцера. Коли вранці про це дізналися, ми здригнулися, адже розуміли, що за цей вчинок його повісять. Тоді Стубс продемонстрував нам свій вплив. Він домовився з офіцером про обмін шинелі на нову тканину. Проте комендант наполіг на покаранні. Тож високопосадовець мусив упродовж двох тижнів перед обідом качатися на столі та вголос повторювати «я шахрай!». Нас дивувала зажура покараного, бо насправді він дивом уникнув смерті й мав би за це хвалити Бога. Цей випадок доводить, як важливо для будь-якої організації користуватися з принагідної оказії, що забезпечує їй сталість.

Збагнули ми й те, як використати вади системи, аби створити таємне товариство, пов'язане з німецькими партизанами. Стубс забезпечував зв'язок із рухом опору в центральному таборі Дахау; це було дуже важливо, адже ми боялися, що під час звільнення таборів нас усіх повбивають, тож варто було готуватися дати відсіч.

Математику довелося відкласти. Ми згуртувалися по п'ять осіб; ці групи називалися «куреньями» (gourbis). Так було легше допомагати одне одному в разі потреби. Тож щовечора відкладали ложечку супу для наших найслабших братів. Знесиленому в'язневі тиждень із додатковою порцією супу міг врятувати життя.

У моєму «курені» перебував на кілька років старший за мене талановитий студент-математик. Він був троцькистом і, як на мене, здіймався надто високо до хмар. Цей студент зітхнув із полегшею, дізнавшись, що його відправляють до Німеччини. Річ у тім, що керівництво

в'язниці в Еїс помістило його під карантин, і він так ослаб, що боявся бути забитим під час запланованої втечі. Бідолашний мріяв когось навчати, тож узяв мене за піддослідного. Викладав мені сучасну математику. Я добре пам'ятаю дні, коли, опершись на лопати, ми чекали на неповороткі вагонетки з ґрунтом, що затримувались через повітряну тривогу чи бомбування. Студент розповідав про принцип Цермело — а що саме, вже й не згадаю¹⁷. Але згодом, коли уряд Франції ввів викладання сучасної математики в середніх школах, я з легкістю ділився знаннями з дюжиною підлітків, які мешкали неподалік.

Упродовж останніх днів перед остаточною поразкою німців нас вивезли до табору, сусіднього з Дахау — Аллаху. Ми прямували колоною, що поступово всотувала в'язнів з інших ближніх таборів. В Аллаху довелося рити братські могили й ховати тих, кого забили, бо вони не мали сил іти. Звільнило нас американське військо генерала Паттона¹⁸, і кілька днів ми були полишені на самих себе. Група політичних в'язнів установила залізну дисципліну, аби уникнути лінчування колаборантів-капо та охоронців, бо, на їхню думку, це стало би виявом деградації. Та коли американські вояки знайшли переповнені братські могили, вони безжально розстріляли есесівців.

Звільнених в'язнів миттю підхопили війська союзників. Напевне, з політичних міркувань, додому нас відправили не одразу, а по шести тижнях відпочинку на березі якогось озера. Знання німецької та куций словниковий запас англійської, яку я вивчав у ліцеї, допомогли отримати роботу за межами табору. Нестримно прагнучи свободи, я три дні йшов на захід і нарешті автостопом дістався французького війська.

Певно, ніколи я не ризикував життям так, як в американських військових вантажівках, за кермом яких були вояки, закохані в ризик і спорт, і на солом'яних

стріхах, де довелося провести дві ночі — адже заради мого смугастого однострою нацисти-втікачі були готові на все. За кілька днів мене відправили до Парижа, до готелю «Лютеція»¹⁹, куди збирали всіх колишніх в'язнів-французів*.

Там я зустрів маму — вона щодня приходила туди по новини. Татові й брату також пощастило, завдяки фальшивим документам, втекти від нацистів і потрапити під захист французьких патріотів. Звісно, я був худючий, проте загалом здоровий, тож найперше поквапився повернутися до навчання, бо з якихось незбагнених причин прагнув стати науковцем.

На підготовку до конкурсів я мав два роки. Проте між мною та іншими ліцеїстами була суттєва різниця у віці. Я вже не почувався ні хлопчиком, ні підлітком, як усі ці учні з порядних родин — більшість без перешкод пройшла всі ступені шкільних сходів, які вели до однієї з престижних великих шкіл.

Мене назавжди причарувало оточення, з яким познайомився у «Червоних соколах» та «Притулках для молоді». «Соколи» ставилися до нас, дітлахів, як до дорослих, і ми всі — віком від 11 років — навчалися разом. У «Притулках» також вітали спільний триб життя. Він захоплював нас, адже ми відкривали для себе дружбу, співи та перші підліткові закоханості — переважно цілком невинні, проте вельми важливі для подальшого. Цей період, без сумніву, зіграв вирішальну роль у моїй вже дорослій освіті.

Тож я не мав ані найменшого бажання повертатися до ліцею ще на два роки та готуватися до конкурсів,

* Мої контакти з Францією до повернення з Дахау 1945 р. детально описано у книжці «Життя, напнуте, мов струна» (La Vie à fil tendu, P., Odile Jacob, 1993) — створеній у співпраці з Домінік Содінос. Вона опитала всіх іще живих свідків тієї доби, які були разом зі мною у найскрутніших умовах.

які могли б дати значно більше, ніж вступ до Гірничої школи²⁰ у статусі студента-іноземця — адже мене вже прийняли туди до арешту. Оскільки всі кращі учні Політехнічної школи проходили практику в Гірничій школі, то, на мою думку, розумніше було зекономити один-два додаткових роки навчання в ліцеї.

Я помилився. Війна спричинилася до крайньої нестачі фізиків. А Франція потребувала фахівців, щоби наздогнати англосаксів. Уряд мудро розпорядився терміново відправити кращих учнів Політехнічної школи на стажування до американських та англійських шкіл і лабораторій. Розрахунок був слушний — швидко пощастило відновити блискучу школу теоретичної фізики. Багато хто з тих студентиків за кілька років зажив міжнародної слави, і згодом я товаришував із кількома з тих щасливців.

Отже, я вступив до паризької Гірничої школи як звичайний студент-іноземець. Мусив провчитися три роки, скорочених до двох із половиною завдяки статусові колишнього бійця руху Опору.

Кілька місяців працював інженером на вугільних шахтах у Франції та Шотландії, проте не відчув нахилу до цього фаху. Тож я обрав чорну металургію і мав чудову нагоду стажуватися на лотаринзьких заводах²¹. Це мало би, здавалося, відвернути від захоплення наукою, та я був хлопець затятий!

Я чекав. Завдяки навчанню в Гірничій школі зміг натуралізуватися — адже досі значився громадянином Польщі. Франція потребувала польських шахтарів, які масово прибували відбудовувати країну. Вони отримували французьке громадянство, якщо погоджувались і надалі працювати у шахтах. Я запевнив, що щиро прагну саме такої долі, тож 1946 р. отримав натуралізацію, а разом зі мною — батьки і брат Андре, які нещодавно тішилися моєю військовою нагородою.

Хибно обраний напрямок освіти я виправляв читанням американських підручників з фізики. Пригадую, як зрадів, прочитавши розділ про теорію відносності — річ нескладну для людини, яка два роки життя присвятила вивченню вищої математики. Паралельно до навчання в Гірничій школі отримав куценьке посвідчення про завершення курсу точних наук в університеті, що дозволяло взятися до дисертації. У 1948 р. я опинився без роботи, проте готовий навчатися фізиці.

Доля посміхнулася ще раз, коли мене прийняли до лабораторії Фредеріка Жоліо-Кюрі в Колеж-де-Франс²². Не зайвим виявилось моє бойове минуле, адже успіхи в навчанні аж ніяк не свідчили на мою користь. Проте час був такий — благословенний, конкуренції між науковцями майже не було. Я став стажером при Національному центрі наукових досліджень CNRS²³ і отримував зарплатню вдвічі нижчу за ту, яку міг би мати у промисловому секторі. Отак я увійшов до фізики.

Від віртуального гірничого інженера до фізика-експериментатора

У Колеж-де-Франс Жоліо-Кюрі вів захопливий курс розвитку ядерної фізики впродовж останніх п'ятнадцяти років. Він і сам зробив чимало значних відкриттів. Було й таке, що йому не скорилося. А я — юний науковець — з легкістю уявляв себе у шкірі гігантів наукової думки, які швидко прямували до прогресу — адже дуже часто їхні методи виявлялися досить примітивними, а міркування — простими.

Готуючи дисертацію на своєму сіннику, я зрозумів, що не маю достатньо знань для дослідницької роботи. Усе довелося вчити наново. Я стажувався, мов справжнісінький початківець, навіть учився видувати скло —

тоді скляні лічильники Гайгера були дуже поширені завдяки дешевизні²⁴, — та поводитися зі струмом, що було необхідно для розуміння показів лічильника. Та завдяки багатій уяві я швидко засвоїв ази, хоча завжди жалкував, що так і не став теоретиком.

У Колеж-де-Франс я увійшов до складу невеличкої навчальної групи молодих теоретиків з різних лабораторій та кількох експериментаторів, що прагнули поглибити знання з теоретичної фізики. Ми горбатили над працею двох американців — Блатта і Вайсскопфа²⁵.

Мені пощастило — у комуні Ле-Уш французький фізик Сесіль Моретт-ДеВітт заснувала школу теоретичної фізики²⁶. Упродовж двох років я стажувався там влітку. Серед тамтешніх викладачів — переважно американців — траплялися автори фундаментальних відкриттів. З ними я зміг заповнити чимало лакун у знаннях. До того ж вони страшенно раділи знахідкам дослідників, які працювали над реакціями, спричиненими високоенергетичними космічними променями. Було відкрито чимало нових таємничих частинок. Це спілкування, поза сумнівом, визначило мою галузь: фізику високих енергій.

Моя дисертація стосувалася видавання променів низьких енергій, пов'язаних із дезінтеграцією ядра. Відповідно довелося вивчити будову пропорційних лічильників. І я впевнений, що саме обізнаність із цими лічильниками в подальшому сприяла моему успіху, коли 1968 р. я запропонував використовувати пропорційні камери у фізиці частинок.

Предметом роботи я обрав двофазовий лічильник, який довелося сконструювати разом з Франсісом Сюзором, старшим за мене на три роки. Проте ще раніше, працюючи з пропорційним лічильником, що містив лише один дуже чутливий електрод, ми зробили значне відкриття, за що навіть опинилися на першій сторінці газети *Le Figaro*!

Тоді ми гадали, буцім нам поталанило довести, що в радіоактивному β -промінні видимий електрон був наслідком попереднього розпаду іншої частинки. Її існування вважалося дуже коротким, а взаємодія між атомами всередині неї дуже відрізнялася від взаємодії всередині електрона. Жоліо-Кюрі не знайшов заперечень проти нашого тлумачення дослідів і представив їх в Академії наук. Зізнаюся — маючи менше 30 років, я з величезною насолодою відчув, що зробив значний прорив.

На жаль, підґрунтя у цього відчуття було надто хитким. Ми порівнювали розсіювання електронів (β -промені), випромінених чистим радіоактивним джерелом, поставленим на тоненьку платівку, з розсіюванням електронів, вирваних з атомного пучка, випроміненого джерелом, яке розпадалося таким чином, що заряд ядра не впливав на процес. Ми переконливо довели, що β -промені, що випромінюються з ядра, є не електронами, а рештками дуже швидкого передання іншого проміжного випромінювання ядра. Джерелами слугували розчини у воді радіоактивних тіл, що не містили речовини у твердій фазі.

Такого висновку ми дійшли, спостерігаючи за зворотною дифузією β -променів у тонких алюмінієвих платівках з поставленими на них джерелами. Спостерігалася чітка різниця між потужністю розсіяного випромінювання за наявності β -випромінювачів і потужністю за наявності випромінювачів чистих електронів, емітованих внаслідок різних процесів із джерел або з атомного пучка.

Джерела β -променів не містили помітної кількості речовини, джерела ж електронів, які, здавалося б, також не повинні її мати, таки її містили. Звичайно, небагато, проте достатньо, аби, коли ми висушили краплину, речовина утворила кристали по її краях. А це значно перевищувало середній рівень кількості речовини, за

якого відбувається випромінення електронів. Знадобилося шість місяців, аби знайти похибку.

За цей випадок нам ніхто не дорікав, проте голова відділу однієї великої лабораторії заявив, що після цієї публікації ні за що не візьме мене на роботу! Я видрукував статтю про спосіб підготовки джерел без утворення кристалічних гало. Пишу про це, бо наша пригода свідчить: науковець має право на помилку. Один знаний біолог якось сказав мені, що поряд із п'ятнадцятьма публікаціями в серйозному журналі *Nature* він має три таких, яких волів би взагалі ніколи не писати.

У ті часи я захоплювався фізикою високих енергій, що постала з дослідження рідкісних ядерних реакцій, що відбувалися на великих висотах і спостерігалися за допомоги повітряних куль, устаткованих фотоплівками достатньої товщини.

Мені спала на думку ідея детектора, яка, цілком може бути, стала моїм найуспішнішим винаходом. Задум ґрунтувався на переданні світла, отриманого завдяки створенню лавин електронів, вивільнених у газі короткими електричними імпульсами, зумовленими пробігом швидкої частинки; імпульси напругою сотні тисяч вольт тривали лише кілька мільярдних часток секунди. Я намагався застосувати до задуму різні методи, і для цього вирушив до Гамбурга, де зустрівся з професором Ретером — всесвітньо визнаним авторитетом у царині електричних розрядів у газах²⁷. Деякі з його методів візуалізації лавин електронів роз'яснювали шлях до досягнення моєї мети.

Не маючи достатніх знань, я проводив примітивні досліди, однак мені поталанило побачити, як електричні розряди спалахують на траєкторіях частинок*.

* «Попередні випробування та характеристики нового детектора, який дозволяє фотографувати траєкторію іонізуючих частинок у газах», *Journal de physique*, липень 1957 р. Див. також статтю «Радій» (там само, число 18, с. 539, 1957 р.) і розділ “The development

Вивчення даних підказало, як довести задум до пуття. Я замовив модулятор радара, який використовували для пристосування коротких імпульсів до високого тиску в лампах, що використовуються в радарах.

Я спробував отримати візу, щоби потрапити до лабораторії в радянському місті Дубна²⁸, адже подекуди, що росіяни опанували технології, необхідні для втілення мого задуму. Проте я її так і не отримав, хоча іншим дослідникам із нашої лабораторії, які працювали над іншими проектами, радянське посольство охоче давало візи. Можливо, підсилювач світіння, який вони використовували, мав і військове застосування, тож вони не бажали розголошувати свою розробку.

Статті ніхто не помітив, згадали про неї лише по трьох роках в одному американському журналі, що спеціалізувався на анотаціях статей з усього світу. А вона містила всі дані, необхідні для побудови іскрових камер і камер неперервних розрядів, створених згодом японцями, американцями і грузинами, які стали першопрохідцями в цій царині. Втім, у моїй подальшій долі науковця цей детектор зіграв визначальну роль. Я представив його у Венеції на конференції з питань високих енергій. На той час фізиків просто причарувала бульбашкова камера — революційний детектор, винайдений Дональдом Артуром Глейзером, нобелівським лауреатом 1960 р. Впродовж чверті століття бульбашкові камери пануватимуть у фізиці частинок. Причина? Їхня точність, а також багатуша інформація та фундаментальні відкриття, які стали доступними фізикам завдяки їм. Деякі з цих камер — велетенські, заповнені рідким воднем — коштували близько ста мільйонів доларів. Знадобилися двадцять п'ять років, значний поступ в

of spark chamber techniques” у колективній монографії Ж. Шарпака, Л. Массонне та Ж. Фав’є “Progress in Nuclear Techniques and Instrumentation”, т. 1, North Holland, червень 1964 р.

електроніці та мої дослідження пропорційних камер, аби за кілька років бульбашкові камери застаріли і повністю зникли.

Після представлення мого детектора-недоноска один з американських фізиків — Леон Ледерман — запросив мене на розмову і запитав, чи не хотів би я вирушити до Європейського центру ядерних досліджень. ЦЕРН щойно відкрили в Женеві, і там почалося зведення гігантських прискорювачів. Завдяки цьому Європа могла позмагатися з Америкою та СРСР. Ледерман збирався провести там академічну відпустку і намагався зібрати європейську команду, щоби взятися за вирішення базової проблеми: точного вимірювання магнетичного моменту мюона. Так назвали таємничу частинку вагою у двісті разів більшою за електрон; казали, що це хіба що важкий електрон без жодних ознак якихось незвичайних взаємодій.

Я радо погодився. Модулятор радара, що мав створювати короткі електричні імпульси, потрапив до ЦЕРНу і, замість досліджувати властивості іскор у траєкторіях частинок, використовувався, аби розгойдувати мікроскопічний магніт, прикріплений до поляризованих мюонів.

Ледерман був мого віку, але вже встиг прославитися, довівши — разом з Річардом Л. Гарвіним і одним студентом, — що мюони, утворені внаслідок дезінтеграції піонів, були поляризовані. А це порушувало священний принцип фізики — збереження еквівалентності: дзеркальне відображення певного фізичного стану мусить являти дозволений фізичний стан. Їхні висновки відкрили шлях тисячам дослідів, що вивчали властивості мюонів, зафіксованих у різних матеріалах.

Рік по тому до Ледермана приєднався Річард Л. Гарвін, вправність і енциклопедичні знання якого здавалися мені просто-таки диявольськими. Отак повні три роки я з великою користю для себе здійснював різні вимірю-

вання у першому прискорювачі ЦЕРНа, увійшовши до складу невеличкої міжнародної команди, всі члени якої були вельми обдарованими науковцями*.

Коли, з визначенням магнітного моменту з точністю до однієї стотисячної, ми довели, що мюон таки справді тотожний важкому електрону, було вирішено припинити дослідження та поміркувати про точніші методи вимірювань для роботи з набагато інтенсивнішими мюонами, отриманими або в ЦЕРНі, або в Сполучених Штатах. Частина команди, захопившись проблемою, подалася працювати на американському прискорювачі в Брукгейвені — там і минуло їхнє наукове життя.

За сорок п'ять років досліджень їм поталанило досягнути неймовірної точності — десять у мінус десятім ступені магнітного моменту g , передбаченого електродинамікою і рівного 2,0011659208. Так, вони підтвердили, що йдеться таки про важкий електрон, якому — з незрозумілих причин — властиво приховуватися. Це стало одним з перших і найбільш вражаючих відкриттів ЦЕРНу — в деталях його описали Фарлі та Янніс Семерцидіс*. За той час було відкрито ще один — третій електрон, набагато важчий, маса якого дорівнювала 1,5 маси протона. Міцна родина електронів відображала таємничу фундаментальну властивість деяких сімейств частинок.

Потрапивши до ЦЕРНу, я опинився в середовищі, де можна було вільно завітати до кабінету будь-якого вченого-теоретика. Вони радо відповідали на будь-які запитання, охоче вступали до дискусій. Видатний керівник, директор Віктор Вайскопф прагнув підвищення рівня теоретичних знань дослідників. Робота біля прискорювача, бувало, завершувалась о третій ночі, але ми нізащо не пропустили би лекції з теоретичної фізики, призначеної на десяту ранку, навіть якби спати дове-

* Першу нашу спільну статтю підписали Ж. Шарпак, Ф. Фарлі, Р. Гарвін, Т. Мюллер, Ж. Санс та А. Дзікікі.

лося на розкладачці. А захоплюючі дослідження лише підживлювали наше гостре бажання.

Тож я вирішив залишитись у ЦЕРНі. Був вражений завданнями, які ставила перед собою фізика частинок. З'явилися нові прискорювачі, які повністю знецінили колишнього царя детекторів — бульбашкову камеру! Авжеж, раз на десять секунд упродовж однієї тисячної секунди вона дозволяла отримати запаморочливі картинки ядерних реакцій. Проте запам'ятовувати не могла — вмикали її будь-якої випадкової миті, тож для дослідження рідкісних явищ треба було зробити мільйони світлин. А поки там що, фізика негайно потребувала механізмів вивчення мільярдів взаємодій, недоступних для бульбашкових камер. Тож тисячам фізиків у різних куточках світу доводилося об'єднуватись і ділитися врожайми світлин. Це привело до створення блискучого колективу програмістів, завдяки яким ЦЕРН став однією з колісок усвітньої Мережі — принаймні так пише Робер Кайо*: «Озираючись у минуле, я розумію, що ЦЕРН був ідеальним місцем, — а може, й єдиним придатним, — де міг розвинути Інтернет. Тут поєдналися академічна свобода, дух підприємництва та прагматизм, які, досягши бездоганної рівноваги, перетворилися на плідний для успіху ґрунт».

ЦЕРН — крок до майбутнього

Під акронімом ЦЕРН** розуміють надзвичайне місце, де відбувається справжня революція. Народився ЦЕРН з ініціативи кількох європейських політиків-провидців,

* Кайо був першим співробітником Тіма Бернє-Лі, якого вважають винахідником Мережі.

** Первісна назва – Європейський центр ядерних досліджень (Centre européen pour la recherche nucléaire, CERN), нині – Європейська організація ядерних досліджень.

яким підставили плече кількадесят відомих науковців із США та Європи.

Вони не хотіли миритись із занепадом європейської науки після Другої світової війни. Їхні зусилля увінчалися епохальним винаходом нового способу проведення наукових досліджень на нашій глобалізованій планеті. Вони об'єднали тисячі молодих європейських фізиків, розкиданих по сотнях занепалих дослідницьких центрів та університетів, і звели воєдино їхні таланти. Їм пофортунило знайти кошти для зведення небачених за розмірами і ціною приладів недоступних для окремих країн.

Там, біля прискорювачів частинок, науковці навчилися працювати багатонаціональними командами, що об'єднували тисячі інженерів і фізиків з усього світу. Для створення апаратів, які раніше здавалися фантастикою, потрібно було чимало обдаровань.

Керівники зуміли прищепити правила поведінки, які дозволили уникнути гальмування, природного для організацій-велетів промислового спрямування.

Так утворилися геть нові умови життя, що дали можливість світовій фізичній еліті взяти дієву участь у створенні нового центру: теоретики та експериментатори, ще в сяєві слави своїх відкриттів, злітали на унікальний шанс отримати ресурси на кілька років, а може й на все життя. З'явилася можливість посилити університети — адже фізики, які керували тамтешніми групами з дослідження високих енергій, могли залучати до досліджень аспірантів і вести викладацьку діяльність на відстані. Уряди низки країн прийняли рішення створити кілька команд із сотні фізиків та оселити їх у ЦЕРНі, аби вони взяли участь у дослідженнях, зробивши внесок своїми талантами.

Словом, ЦЕРН дозволив Європі піднятися на рівень високорозвинених держав, а в чомусь і обігнати їх. Європа стала місцем, де було зроблено найвизначніші

відкриття в одній з наукових перлин ХХ ст.: Стандартній моделі²⁹. Завдяки авантурі зі зведенням нового прискорювача ЛНС*, потужності якого дорівнювали потужностям усього світу, в майбутнє почали дивитися з надією.

Тепер зрозуміло, чому я вважаю унікальним шансом потрапити до тієї лабораторії та пропрацювати там понад тридцять років, щодня маючи нагоду спілкуватися з фізиками, яких в іншому випадку я просто не міг би зустріти, щодня звертаючись до практично невичерпної матеріальної бази та вільно обираючи теми досліджень. Це дозволило мені звернутися навіть до деяких аспектів біології та медицини.

Поки глобалізація примушує нас шукати розв'язання планетарних проблем, приклад ЦЕРНу, його успіху і законів допомагає нам знаходити способи співпраці, без яких не обійтись у будь-якій науковій галузі.

Газові детектори

Перший значний крок було зроблено 1960 р. з винайденням іскрових камер. Коли таку камеру перетинала будь-яка заряджена частинка, з'являлася цяточка світла. Іскрові камери мали цінну перевагу: здатність залишатися чутливими після утворення вільних іонів частинками в газі — тож час застосування високого тиску, здатного утворити іскру, можна було розрахувати з точністю до однієї мільйонної частки секунди.

Аби отримати детектори, за розмірами не менші за бульбашкові камери — звісно, зі значно меншим просторовим розділенням — з'єднували по кілька таких іскрових камер; упродовж мікросекунди очікування за допомоги об'єднаних надшвидкісних електронних детекторів можна було виявити рідкісні частинки. Саме

* ЛНС – Large Hadron Collider (Великий адронний колайдер).

так команда під керівництвом Джека Стенбергера, Лео-она Ледермана та Мелвіна Шварца відкрила нейтрино другого типу — за це 1988 р. вони одержали Нобелівську премію.

Слід було також визначити розташування іскор — для цього у фізиків були лише очі, а хотілося виявляти їх дуже швидко за допомоги електронної техніки, використовуючи високий заряд іскри. Винайшли чимало способів. Щодо мене, то я ввів у вжиток аж два: перший спирався на поділ заряду іскор між двома електродами, а другий — на запізнення електричного сигналу, у випадку, коли електрод зроблено за принципом лінії затримки.

Однак уже саме факт залежності від іскри був вадою, адже вмикати камеру можна було, лише зачекавши одну мільйонну частку секунди. А розвиток прискорювачів пропонував фізикам нові й нові неймовірні можливості; у теоретичній фізиці з'явилася потреба у вивченні рідкісних явищ — це обіцяло революційний стрибок уперед.

Тоді мені пощастило скористатися з досвіду, набутого під час написання 1954 р. дисертації з визначення частинок. Пропорційні лічильники підтримували швидкість підрахунку в один мільйон імпульсів на секунду. Імпульси, утворювані ними, були надто слабкі й вимагали застосування чутливих підсилювачів з низьким рівнем шуму та поміркованою вартістю. Тоді в усі галузі фізики тріумфально увійшли транзистори, і здавалося цілком реальним створити простір, повний чутливих струн, завдяки яким можна визначити розташування зарядженої частинки.

Такий дослід невдовзі відбувся. Достатньо було натягнути тонкі позитивно заряджені струни, аби притягнулись електрони і утворилися лавини біля одного з позитивних електродів; це дозволило спостерегти, що відбувається, якщо підвищити тиск, помістивши всю

конструкцію до газу, який використовують у пропорційних лічильниках.

Дослід здійснила низка відомих команд науковців. Та коли його повторювали спрощено, ставили натягнуті струни перед одним-єдиним пласким електродом, результат був катастрофічним. На самому початку ампліфікації з'являлась іскра і знищувала сам ампліфікатор, який коштував тисячу доларів. Коли нарешті на арену зважився вийти я, то мав досвід із власноруч збудованими для дисертації лічильниками. Я попросив наших техніків сконструювати камеру з двадцятьма струнами на відстані два міліметри одна від одної, всіяко намагаючись уникнути розрядів, особливо в місцях, де струни з'єднувалися з рамкою.

Пропорційна камера

Наша перша камера складалася з ряду струн товщиною у двадцять мікронів, натягнутих між двома пласкими електродами. Працювала вона бездоганно. Кожна зі струн камери могла самостійно визначати імпульси, що утворювалися під час проходження сусідньої іонізованої частинки. Отже, ми могли натягнути сотні тисяч струн і виявити таким чином траєкторії заряджених частинок. Ми ретельно дослідили шляхи утворення імпульсів, їхнє походження та неймовірну гнучкість газових детекторів зі складною структурою, що дозволяла електронам — навіть ізольованим — повідомити стимульованим імпульсом про свою присутність.

Тоді наша невеличка група, що вдосконалювала іскрові камери, взялася до створення пропорційних камер великих розмірів для фізики високих енергій. Але ми миттю вичерпали, здавалося б, неозоре поле наукової діяльності, яке відкрилося перед нами.

Під час бомбування іонізованими частинками з мінімумом іонізації, що призводило до утворення лавини, кожна струна демонструвала чудові негативні імпульси. Коли одна лавина електронів утворювалась у кількох мікронах від струни діаметром у двадцять мікронів, імпульси, звісна річ, були негативні. Та до лавини призводило не лише притягування до струни лектронів. Вони притягувалися за одну мільярдну частку секунди, а наші прилади не могли вловлювати настільки швидкі імпульси. Позитивні ж іони лавини, навпаки, потрапивши до інтенсивного поля навколо струни, відштовхувалися на достатньо велику відстань, тож існуючим на той час детекторам було нескладно зафіксувати стимульовані сигнали; складалося враження, ніби імпульс спричинено притягуванням електронів.

Позитивні іони, віддаляючись від струни, водночас утворювали низку позитивних імпульсів у сусідніх електродах — зокрема на струнах, розташованих поруч зі струною, на якій утворювалася лавина; ці струни показували позитивні імпульси. Це було справжнє диво, адже спалахи імпульсів тепер були чітко видні. Хоч би якою була відстань між струнами, можна було швидко визначити, на якій з них утворилася лавина.

Тоді ми ретельно дослідили всі механізми, що спричиняють електричні імпульси на тонких струнах, на яких збираються лавини електронів, у різних структурах.

Це одразу дало нам перевагу над науковцями, які також пішли правильним шляхом, скориставшись пропорційними лічильниками з надтонкою струною. Інші використовували звичайну рамку зі струнами. Коли досягали напруги, необхідної для утворення лавини, виникала іскра. Найобережніші розміщували тонкі струни між товстішими, бо, мов чуми, боялися закороток між ними, які вплинули б на точність приладу. Перевага ж нашої розробки полягала в невеличкій відстані між

чутливими струнами. Конкуренти не зауважили, що електричні сигнали на сусідніх струнах були справжнім подарунком, адже ті сигнали були позитивні. Достатньо було лише натягнути чутливі струни з проміжком в 1 мм.

Результати, отримані нами з камерою розмірами $10 \times 10 \text{ см}^2$, вразили всю команду ЦЕРНу; деякі групи дослідників одразу заявили, що наша камера годиться хіба для невеличких площин, підведених під сильне опромінення. Її швидкість у тисячу разів перевищувала швидкість іскрових камер з феритовими декодерами, які тоді використовували для великих експериментів на площах не менших за гектар.

По трьох роках ми позбулись і бульбашкових, і пропорційних камер. Групи вчених зводили величезні пропорційні камери, навчившись натягати надтонкі струни, сплетені з товстими струнами, і отримувати в такий спосіб необхідну напругу між ними. Ці камери — так само, як і бульбашкові — дозволяли отримати зображення складних процесів.

Моя група спробувала розширити поле застосування рамки з надтонкими струнами між двома електродами, продовжуючи співпрацювати з тими, хто волів зводити велетенські детектори для дослідів у фізиці високих енергій.

Ми з'ясували, що за допомоги решіток — звичайних рамок, розставлених між електродами — можна примусити електрони «дрейфувати» та використовувати імпульси, утворені електронами, що «дрейфують» від решітки до решітки. Ми з легкістю вимірювали час дрейфу електрона і одержували відстань, яку він проходив, перш ніж досягнути ділянки посилення. Це дозволило будувати електронно-дрейфові камери, де електрони, перш ніж бути поміченими однією зі струн, мусили подолати десятки сантиметрів. Детектори площею з гектар могли впоратися з великою кількістю електронів,

якщо їх було менше, ніж у місцях взаємодії — це дозволяло залишати між детекторами достатні проміжки та економити залежно від вартості контурів. Спершу ми проводили дослідження з інноваційними структурами — треба було змусити дрейфувати велику кількість електронів і визначити їх на рамці; в такий спосіб, визначаючи час дрейфу електронів і місця взаємодій, ми отримували тривимірні детектори.

Коли 1949 р. я прийшов до лабораторії Жоліо-Кюрі, то був зачарований детекторами, що дозволяли побачити взаємодію частинок.

Достатньо було поглянути на слід, утворений електроном з високою енергією в камері Вілсона, де сліди стають видимими завдяки конденсації краплинок навколо області підвищеної енергії, звільненої проходженням зарядженої частинки. Це ж неймовірно — на власні очі спостерігати взаємодію, яка несе нам стільки цінної інформації! Нині відомо, що часто утворюється чимало різноманітних частинок. Нині, завдяки розвиткові електроніки, можна одразу розшифрувати скупчення тисяч суміщених частинок та ідентифікувати майже кожну. Знадобилися десятки років і нових винаходів, аби прискорювачі помалу навчилися утворювати пучки, багаті на різноманітні частинки.

Часом нові детектори народжувалися випадково, іноді завдячуючи своєю з'явою уяві фізиків, якими рухали нові проблеми, пов'язані з роботою прискорювачів. Хтозна, може, без бульбашок, які виникають, якщо рвучко відкоркувати пляшку з пивом, і які вразили Дональда Глейзера³⁰, не було б винайдено бульбашкових детекторів.

На еволюційній схемі, що показує п'ятдесят років розвитку, бачимо детектори, які дозволили розшифрувати складні структури. Але фізика частинок цим не обмежилася. Проблеми, які виникали у фізиків, підштовхували до творення нових приладів. Саме виникнення фізики

частинок стало можливим завдяки винаходів нових типів детекторів — події майже випадковій.

Те саме було з камерою Вілсона. Своїм виникненням вона завдячує одному шотландцеві, що захоплювався туманом — явищем, звичним для його краю. За п'ятнадцять років досліджень йому поталанило зробити неймовірне відкриття: у деяких туманах, викликаних раптовою зміною рівня тиску, виникають температурні умови, за яких газ перенасичується; накопичення енергії, викликані проходженням зарядженої частинки, спричиняються до появи слідів, а ті, своєю чергою, зумовлюють появу крапель. Тож, коли створено умови для перенасичення, достатньо освітити газ і сфотографувати — таким чином можна побачити траєкторії.

Цінність цих камер було складно перебільшити. Якщо можна керувати часом, за який слід утворює краплину потрібного розміру, освітлення вмикають потрібної миті, до того, поки середовище не потьмяніє через конденсацію пари. Це дозволяє за одну тисячну частку секунди прийняти рішення на випередження. Однак до первісного термодинамічного оброблення газу в камері повернутися можна лише за тривалий час — чекати можна аж годину, якщо камера дуже велика.

Саме в такій камері Жоліо й Чедвік зафіксували перший нейтрон. Тоді про існування нейтронів лише здогадувалися. Чедвік, побачивши світліну, вирішив, що французи, напевно, бачили водневий струмінь газу, зумовленого нейтроном — частинкою, яку вже давно намагалися виявити в лабораторії Резерфорда. Переконливий дослід Чедвіка приніс йому Нобелівську премію.

Іншим знаряддям, яке посідало не меншу здатність розкодувати складні процеси, була густа фотоемульсія. Використовувати могли до кількох сот літрів емульсії — її переділяли на величезну кількість дрібних бляшок; потрібно було кілька років, аби команди фізиків проа-

налізували їх та дослідили події, які з'являлися на них досить рідко.

Один із науковців, які розробили цю техніку, — англієць Павелл відкрив також мезон π у космічних променях, за що одержав Нобелівську премію. Низка премій, якими винагороджували винахідників детекторів, показує, яке величезне значення приділяли відкриттям, що дозволяли збудувати нові прилади, аби спостерігати за ядерними реакціями.

Детектори і зображення

Застосування у біології

Наш винахід пропорційних камер знайшов вельми продуктивне застосування у біології.

Ми помітили, що завдяки лавинам в однорідному полі можна досягти передання світла, що його можна сфотографувати за допомоги підсилювачів світіння. Це дозволяло отримати зображення поверхонь, що випромінюють світло під впливом збудження іонізуючим промінням.

Нині в лабораторіях стоять сотні таких детекторів. Їхня реакція в сотні раз швидша за реакцію фотоемульсії. Вони спричиняються до значних відкриттів. Їм доводиться змагатися з приладами, де молекули позначають нерадіоактивними люмінесцентними речовинами; дуже складно отримати речовини, хімічний склад яких не менш гнучкий, ніж склад молекул, до яких входить тритій позначених тритієм або радіоактивних тіл — тож маємо велике досягнення.

Розшифрування складних молекул

Пропорційні камери набули великого значення, бо дозволяють використовувати пучки рентгенівських променів, заломлених кристалами молекул, використаних

у потужних джерелах синхроциклотрона, та отримати доступ до структури дуже складних молекул.

Одну з варіацій цих камер у ЦЕРНі збудували, аби подолати значний паралакс, викликаний надмірною густиною ксенону, необхідною для поглинання рентгенівських променів напругою в кількадесят кеВ. Ішлося про сферичну камеру, у центрі якої розташовувалися кристали досліджуваної речовини. Камеру використовували впродовж десятка років як обладнання лінії пучків синхроциклотрона в Інституті ядерної фізики в Орсе³¹.

Після тривалої чесної служби прилад замінили — для нового європейського прискорювача SOLEIL (від франц. «soleil» – сонце) в Орсе — на тверді детектори. Коштують вони дорожче — три мільйони євро за один детектор розмірами 30x30 см². Я переконаний: завдяки газовим детекторам, винайденим частково задля підвищення точності та швидкості, які бачимо нині в нових прискорювачах, пощастило досягти прогресу, який з часом поверне нас до використання газорозширювальних камер, — адже коштують вони набагато менше.

Ми бачили, як пропорційні камери намагалися використати у найменш очікуваний спосіб, наприклад, для відхилення пучків частинок надвисокої енергії кристалами заради точності вимірювань у камерах траєкторних вимірів, створених для відхилення пучків викривленими кристалами на надкоротких відстанях.

Розвиток рентгенографії

Одне з перших значних практичних застосувань пропорційної камери для візуалізації рентгенівських променів у медицині винайшла група вчених із Новосибірська. Члени групи хотіли скористатися з переваги чутливості, якої можна було досягнути, використавши рентгенівські фотони для індивідуальної фіксації. Вони

оприлюднили разючі світлини новонароджених перед матковим вічком, завузьким для виходу назовні — отже, виникала необхідність у кесаревому розтині, діагностувати яку можна було завдяки світлинам, отриманим за використання ксенону та камер, що фіксували рентгенівські промені напругою в кількасот кеВ. Вони запровадили цікаву інновацію — не паралельні струни-детектори, що сходилися біля джерела. Так учені зуміли подолати паралакс дуже густого газового детектора.

Згадаю і рентгенографію автомобіля за допомоги приладу, створеного компанією «Шлumberger»³² — у ньому використовувалися гамма-промені напругою близько десяти МеВ. Цей прилад робив світлини дуже великих об'єктів — наприклад, контейнерів заввишки шість метрів. Інженер змогли пристосуватися до великих розмірів.

Доктори Ів Шарпак та Філіпп Деманж³³ вирушили до Новосибірська, помилувалися цим дивом і згодом переконали лікарів Каліфу й Дюбуссе поставити новосибірську розробку в їхній лікарні. Втім застосувати прилад не довелося, бо використання рентгенівських променів у чутливих тканинах зародка вважалося неприпустимим.

На той час доктор Дюбуссе працював у лабораторії біомеханіки Національної вищої школи мистецтв і ремесел над оптимізацією рентгенівських світлин хребта людини у фас і профіль для отримання тривимірного зображення спинного мозку. Цілком природно виникла думка здійснити стереорентгенографію, значно знизивши кількість променів, потрібних для отримання зображення. Тож завдяки цифровій стереорентгенографії та роботі інженерів-біомеханіків було отримано віртуальне зображення хребта без використання тривимірних даних.

Поєднання ідей доктора Дюбуссе, розробок учених із лабораторії вищої школи мистецтв і ремесел та таланту інженерів компанії «Шлumberger», які допомогли вста-

новити першу в Парижі камеру та винайшли ксенонову пропорційну камеру, пристосовану для фіксації розсіюваних пучків, дозволило створити прилад, що хутко набув популярності.

Цей апарат, що сканує пацієнта, який стоїть, з голови до ніг, дозволяє вивчити певну ділянку кістяка відносно інших у просторовому вимірі. Він також дає можливість точно вирахувати найбільш рівноважну позицію піддослідного, визначаючи наявні вади та відхилення. Завдяки цьому було досягнуто значного прогресу у визначенні готовності до деяких видів хірургічних операцій, як-от: установлення протеза кульшового суглоба чи коліна, визначення рівня та кількості виправлень і хірургічних фіксацій, необхідних для лікування викривлень хребта.

Варті згадки й корекції, отримані не лише у двох, а й у трьох вимірах у позиції стоячи — себто у зручній позі, — це не вимагало звичних реконструкцій у 3D, що їх отримували проведенням комп'ютерної томографії в позиції лежачи. Лише це уможливило перехід від горизонтальної позиції кістяка пацієнта до вертикальної, що зумовило новий погляд на фізіологію людини та патології як росту, так і старіння.

Отже, випадковий збіг дуже різних здібностей привів до розвитку ідей, сперш ніяк не пов'язаних між собою. Було зроблено рішучий крок уперед, адже прилад, безперечно, значною мірою розвиватиметься.

Успіх цього детектора заслуговує на особливу увагу, бо справді ілюструє здатність винахідників розширювати поле використання знахідок завдяки міждисциплінарній співпраці.

Отже, вплив пропорційної камери був значно більшим за звичайну візуалізацію іонізованої частинки у газі. Спостереження дали можливість зробити стрибок уперед у розумінні кількох фундаментальних властивостей вільних електронів у газі та чи не відкрити надвисоку

чутливість? Досягти гнучкості детекторів тоді стало можливо завдяки нашим дослідженням.

Хоча спершу призначення газових детекторів обмежувалося використанням ампліфікації між двох електродів, яка приводить до утворення невеличких лавин або іскор, деякі групи дослідників довели, що завдяки збільшенню кількості вільних електронів у газі для нас відкривається безліч нових можливостей. Використання лавин у мікроструктурах і перенесення електронів у таких невеличких просторах, як мікрорурки (детектор GEM) або ж у просторах, обмежених вузькими перетинками (детектор Micromegas), сприяло розвитку нових детекторів, продуктивність яких дуже різнилася від продуктивності пропорційних камер*.

Ми отримали феноменальні коефіцієнти посилення — адже вільна середня траєкторія руху фотонів, геометрично звужена, повністю змінює межі досяжного. У нанометричних межах існує обмеження на можливість досягнення переваги суто пружними зіткненнями — при цьому розмір атомів визначає природну межу перерізу зіткнення.

Нові газові структури дозволили, наприклад, розробити нове покоління лічильників Черенкова³⁴. Принцип дії останніх ґрунтується на випромінненні фотонів частинками, які перетинають випромінювачі та швидкість яких є вищою за швидкість світла у тому ж середовищі. Фотони випромінюються в коло, діаметр якого залежить від швидкості частинок. Діаметри світлових кілець залежать від імпульсу частинок та займають простір великих детекторів ЦЕРНу. Вони дозволяють визначити частинки, утворені під час зіткнень важких іонів, аж до амплітуди прискорення близько 30 GeV/c.

* Загальні уявлення про нове покоління детекторів можна знайти у збірці праць Брескіна та ін., оприлюднених під час колоквиуму в Нанті.

Фоточутлива поверхня йодиду цезію площею більше десяти квадратних метрів випромінює фотоелектрони, згруповані в кільця, розміщені на газових детекторах. Цей дослід свідчить про збільшення потужності газових детекторів завдяки гнучкості інструментів, які дозволяють одержати їх. Мінливість приводить до того, що значну кількість приладів, у яких застосовуються газові детектори, можна побачити під час проведення багатьох експериментів у фізиці високих енергій.

Саме так побачила світ величезна кількість різноманітних новітніх детекторів, призначених для візуалізації нейтронів. Серійне нашарування детекторів GEM дає значні переваги, — адже вони захищені від вторинного випромінення, що утворюється в лавинах поглинанням під час переходу з одного шару на інший.

Розділ другий

Чи існують викопні звуки?

Жити в ЦЕРНі не означає бути відрізаним від світу і його проблем.

Свободи у виборі тем досліджень і компанія обдарованих фізиків постійно штовхали мене на авантури, такі як, скажімо, пошуки звуків, похованих багато тисяч років тому, дослідження центру земної кулі та — разом з моїм приятелем Гарвіном³⁵ — дон-кіхотська спроба використати забобони щодо впливу опромінення на живих істот.

Викопні звуки

Ці приклади чудово ілюструють нашу свободу братися до химерних дослідницьких проектів без жодного шансу на якийсь результат.

Разом із кількома колегами ми занурилися у вивчення викопних звукових сигналів*.

Цілком може бути, що існують умови, за яких передавання звуку здійснюється у спосіб зміни довколишнього середовища, що згодом дозволяє віднайти загальні риси цих звуків. Способи запису, які використовуються нині, вказують на один із можливих напрямків дослідження. Риси, миттєво закарбовані на стародавніх предметах,

* Наступний текст написано у співавторстві з Мат'ясом Фінком, Венсаном Жиб'я та Франсуа Жиром.

можливо, містять у собі модуляцію, викликану вібрацією предмета, підпори предмета або підпори зонда.

Звичайний візит до будь-якого музею виявляє безліч предметів, які можуть виявитися носіями потрібної інформації. У Луврі, наприклад, ми бачили вироби з глини та смоли (їхня механічна природа близька до природи воскових дисків) віком у кілька тисячоліть, з надписами, зробленими вручну, прямими та кривими рисками. На горщиках великого діаметру видніли округлі риски. На багатьох предметах можна було побачити поспіхом залишені знаки.

Сьогодні можна створити апарат, побудований на оптичній взаємодії зі зморшками на поверхні. Він дозволив би — після відповідного оброблення сигналу — вивчити шум, який звучав під час ліплення. Авжеж, це не єдиний можливий напрямок досліджень. Випадкові записи звуків можуть залишатись і на інших носіях. Будь-який напис — ручний або машинний — на будь-якому носії заслуговує на окреме розслідування.

Обладнання повинно містити оптичну голівку для зчитування (що точно розпізнає об'єкти), яку тривимірна система наводить уздовж зморшки — це дозволяє «прочитати» мікрорельєф на її боках або дні. Об'єкт, що вивчається, лежить на столі прокрутки, обладнаному необхідними ступенями свободи. Усе разом дуже нагадує аналоговий зчитувач оптичних дисків.

Із таким приладом можна дослідити чимало рисок — серед них нанесені спеціально для експерименту! — у пошуках ділянок, які можуть нести потрібну інформацію. Сигнал фіксується та обробляється задля оброблення звукової інформації — якщо така існує.

Хоча подібний експеримент має небагато шансів на успіх, надія почути звук, що лунав на світанку людства, а також можливий вплив на розвиток технологій виправдовують нашу широку зацікавленість у досліді та прагненні здійснити його.

Задля цього експерименту ми здійснили захопливий візит до підвалів Луврського музею, де шукали об'єкти, морфологію яких у далекі часи могло бути змінено під впливом певних звуків.

Ми не знайшли ні потрібних коштів, ні аспіранта, готового присвятити кілька років своєї юної кар'єри на химерію. Втім, ми змогли привернути увагу археологічних журналів*.

Один кмітливий фізик привернув увагу до нашого попередника у вивченні цього явища — славетного Рабле. Адже автор «Пантагрюеля» каже про слова, зойки та гарматні постріли, які замерзли «на березі крижаного моря» під час бійки між аримаспійцями (північанами, яких Рабле частково запозичив у Геродота) та нефелібатами («їздцями на хмарах»). Це у Четвертій книзі «Пантагрюеля», у розділах 55 та 56³⁶.

Тож до пастки химерної, але вишуканої ідеї потрапили не лише ми.

Самородки чорного золота

У 1983 р. зібралося кілька фізиків, які бажали досліджувати земні глибини. Пригадую, як цей дивовижний проект було накреслено на обрусі в їдальні**.

Ми винайшли спосіб сканування земної кулі з метою виявлення її структур і ресурсів, таких як нафта і мінерали.

Головним нашим знаряддям став пучок нейтрино, випущених під різними кутами з сопла, що відхиляло

* *Archeologia*, березень 1992, №277, “Reproduction of the sounds from old wax phonographic cylinders using a laser beam reflection method”; ICASSP 1986, Tokyo; *Applied Opus*, 1986, 25, №5, “Laser reproduction of cylinder sound recording”, Нью-Йорк, 1980.

** Див.: R. De Rujula, S.L. Glashow, P.A. Wilson, G. Charpak, “Physics reports”, *Review Section of Physics Letters*, 1983, 99, #6, p. 341—396.

донизу потік з прискорювача енергетичних частинок. Уловлення пучка — неширокого через релятивістське звуження — базувалося на кількох методах: уловлення мюонів, випущених нейтрино, та акустичні шуми, утворені внаслідок поглинання потужного концентрованого потоку нейтрино.

Ідея була просто чудова, тож ми почали уявляти, як прискорювачі долають моря пучками під різними кутами понад водяною поверхнею.

Після ретельного вивчення проблем, які виникали під час здійснення задуму, ми представили свій проект директорові компанії Shell, який заявив, що коштуватиме це забагато.

Проте ми не пошкодували про витрачений на мрії час. Хтозна, можливо, років за п'ятдесят одне з міжнародних об'єднань, втомившись виробляти безглузді авіаносці, не дешевші за наш прискорювач, зрозуміє всі переваги нашого винаходу, і після першого ж знайденого родовища нафти нас посмертно нагородять якоюсь медаллю.

Полювання на забобони

Складне спілкування на серйозному рівні з деякими непримиренними ворогами ядерної енергетики розчарувало нас із Річардом Гарвіном — адже ми прагнули змінити систему одиниць, використовуваних науковими комітетами, для спрощення розуміння. Тож ми склали такий текст*.

Колись дуже давно, приблизно за 5 млрд. років до виборів чинного президента Французької республіки 2002 р., існувала величезна маса газу і пилу.

* За: Bull. Acad. Nat. Med., 2001, 185, #6, p. 1087—1096, засідання 19 червня 2001 р.

Вона займала вельми незначну частину Всесвіту, що утворилася протягом 10 млрд років розширення після великого вибуху, пряме відлуння якого у виборах президента видається надто мізерним, аби брати його до уваги в цій статті, навіть якщо фахівці з астрології вміють із великою для себе користю пов'язувати невидимі космічні події та різні казуси в історії людей.

Тисячі мільярдів зірок борознили космічний простір. У них відбувалися термоядерні реакції, що споживали первинне пальне — водень — і виробляли відходи, серед яких були — у дуже великій або вельми незначній кількості — всі стійкі або радіоактивні елементи, відповідно до законів ядерної фізики, що про них людство довідалося впродовж століття після відкриття радіоактивності у 1896 р.

Куля з газу і пилу — власне, цікавить нас саме вона — була продуктом горіння та фінального вибуху однієї з зірок. За формою вона нагадувала диск і містила вихри, обертання яких становило пам'ять про первісну зірку.

Але попереду на пил чекало іще чимало пригод. Усі порошини поєднувала сила гравітації — та сама, що притискає нас до планети і яка то потужніша, що більша маса тіла. А сукупна маса порошин у мільйони разів перевищувала масу Землі та була набагато більшою за масу Сонця.

А поки там що, порошини, «падаючи» одна на одну, спричиняли величезний тиск і височенні температури та зближались настільки, що між атомами відбувалися ядерні реакції, від чого температура піднімалася ще вище й виникали ланцюгові реакції, які доводили температуру матерії до мільйонів та десятків мільйонів градусів.

Хоч ядерних реакцій, що відбувалися під час утворення порошин, було достатньо для спалення цілої зірки, все ж таки згорало не все. Це нагадувало недосконалу грубу, де серед попелу лишається багато шматків вугілля.

Так народилося сонце — недовговічна куля, яка за кілька мільярдів років вичерпає ядерний запас.

Порошини, розкидані по краю диску, що обертався, злипались у його центрі, утворюючи планети, що кружляли навколо Сонця.

Серед тих планет була і Земля — вона складалася з пилу з мертвих зірок, в якому завдяки ядерним реакціям поєдналися елементи, з яких складається наш світ — живий і мінеральний. Деякі з елементів виявилися доволі стійкими. Інші ж були надто радіоактивні, та після радіоактивного розпаду перетворилися на стійкі. Вижили ж елементи, середня тривалість життя яких відповідала часові формування та існування Землі, тобто близько 4,5 млрд років. Вони відіграли — і досі відіграють — визначальну роль в існуванні людства. Саме енергія, яка походить від радіоактивності цих елементів, підтримує жар у «печі» та метали, з яких складається куля, в розжареному стані; діаметр цієї розпеченої кулі — 3500 км, і вона займає більшу частину центру Землі. Цей жар не дозволяє Землі охолонути. Він дорівнює енергії, що її виробляють 40 тис. сучасних атомних АЕС, хоча на сьогодні існує лише 400 подібних діючих станцій.

Звісна річ, цей жар — ніщо порівняно з енергією, яка доходить до нас із Сонця і перевищує його приблизно в 10 тис. разів. Сонячна енергія є джерелом життя. Її ми зобов'язані не лише в середньому 15 додатковими градусами, а й теплом, потрібним рослинам. Отож, люди цілком слушно шукають способів удосконалення використання сонячної енергії та мріють перетворити її на основне джерело енергетичного підживлення.

Викопні радіоактивні залишки

Дуже важливо усвідомлювати, що, коли радіоактивні залишки горіння первісної зірки, ядерний вибух якої дав нам життя, грають визначальну роль у підтримці на планеті помірної температури, то, на думку деяких фахівців, вони визначають і виживання людства, яке 2050 року налічуватиме 9 млрд осіб, у прийнятних умовах.

Деякі з цих викопних радіоактивних залишків — уран, торій і калій — відіграють важливу роль у збереженні теплової рівноваги на планеті, адже найбільше сприяють її внутрішньому розігріву.

Первісні радіоактивні залишки є всюди. Середня тривалість життя калію-40 — одного зі складників природного калію — складає 1,3 млрд років. Ним насичені всі живі організми; людина вагою 70 кг завдячує йому радіоактивністю близько 6000 Бк, тож щосекунди в тілі розкладаються 6000 радіоактивних атомів калію.

На калій багата й переважно гранітоподібна поверхня континентів — калію в ній 1%; тож, на щастя для розвитку життя на Землі, радіоактивний елемент є лише однією тисячною її обсягу.

А звідси й радіоактивність граніту — близько 1 Бк на грам.

Граніт — дивовижна радіоактивна скеля

Якщо калій є базовим елементом радіоактивності граніту, то часом останній має значно вищий рівень радіоактивності — розповсюджена вона неоднорідно, залежно від походження скель, і часом спричинена наявністю домішок урану й торію.

В області Лімузен і на Корсиці радіоактивність граніту досягає рівня 3,5 Бк/г. У Бретані — 6 Бк/г. Плита площею

1м² і завтовшки 4 см має радіоактивність близько 600 тис. Бк.

Розуміння можливого ступеня природної радіоактивності ґрунтів є важливим для належного сприйняття деяких випадків, що отримують гостру оцінку, коли йдеться про штучну радіоактивність, викликану ядерною енергетикою.

Таке місто, як Париж, де всюди гранітні бордюри, отримує опромінення в мільярди бекерелів. Переходячи на інший тротуар чи до іншого кварталу, перехожий неминуче стикається зі зміною радіаційного фону. Невже хтось насмілиться стверджувати, що це хоч якось впливає на здоров'я! При цьому віднедавна ми постійно бачимо критику випадків, радіоактивний вплив яких у сотні разів менший за зміни радіоактивного фону під час прогулянки Парижем. Чи варто казати, що паризьке довколишнє середовище рясніє небезпеками набагато серйознішими.

Уран — дуже поширений елемент, з нього складаються близько чотирьох мільйонних часток земної кори. Його присутність у майже всіх скелях значною мірою впливає на природне випромінювання людей — зокрема через газ, який він утворює, радон.

Енергія та безпека населення

Після винайдення ядерної енергії уран набув особливого значення. З урахуванням енергії, пов'язаної з поділом урану, та вмісту урану в земній корі кожний об'єм цієї кори може продукувати стільки енергії, скільки й такий самий об'єм вугілля.

Звісна річ, вартість виокремлення урану з неочищених руд завелика, а кількість рентабельних родовищ обмежена. Проте дослідження показали можливість

отримання урану з морської води — такий уран коштуватиме у п'ятнадцять разів більше, ніж уран із родовищ, які живлять атомні станції; утім, це доводить практично необмежений запас цього енергоносія.

У майбутньому, позначеному загрозою вичерпання енергетичних запасів, основаних на нафті й вугіллі, великі надії покладатимуться на атомну енергію. І це нормально. Але масове виробництво штучних радіоактивних речовин, яке супроводжує цей тип енергії, викликають нині низку запитань і тривогу щодо наявної небезпеки масового використання цього джерела енергії майбутніми поколіннями.

На атомній станції вартість пального складає 20% від загальної вартості виробництва. Отже, для перетворення морської води на конкурентоспроможне джерело урану необхідно зробити ще низку винаходів. Проте існує значна кількість неочищених руд, вартість екстракції з яких іще менша. Тобто, можна бути впевненим — упродовж наступних століть запаси урану не вичерпаються.

Рентабельність їх використання варіюється відповідно до енергетичного багатства країни, однак залежить також від реалістичної оцінки загроз та вад різноманітних замінників, доступних людям. Часом рентабельності складно досягти через ірраціональні суперечки навколо свідомого чи несвідомого впливу на людей іонізуючого випромінювання різного походження.

Нині найголовніше завдання атомної промисловості — довести, що вона здатна успішно давати раду радіоактивним залишкам з атомних станцій та стримувати ризики катастрофи, подібної до Чорнобиля. Гарвін переконаний, що досягнути цієї мети — цілком реально.

Вимірювати радіоактивність — легко

Аби переконатись у правильності запропонованої стратегії, варто врахувати випромінювання, під яке потрапляють люди, попри випромінювання від об'єктів атомної промисловості. Отут і виникають перші «пастки».

Вимірювання рівня радіоактивності — вельми чутливий процес. Можна виявити один-єдиний атом, що розпадається, тоді як для зрушення найчутливішої рівноваги потрібна вага мільйонів мільярдів атомів. Саме ця особливість дозволила радіоактивності сприяти розвиткові багатьох наук — біології, медицини, археології, — надаючи їх незамінні знаряддя.

Можна вирізнити радіоактивні забруднення значно слабші за ті, що були спричинені природними викопними радіоактивними речовинами, якими насичено і нашу планету, і тканини нашого тіла, від чого ми весь час ніби плаваємо у невідчутних хвилях радіації. Це не заважало живій матерії розвиватися впродовж трьох останніх мільярдів років і не має жодного впливу на наше здоров'я.

Написавши останнє речення, я зрозумів, що наштовхнувся на переконання деяких політичних угруповань, які вважають за необхідне позбутися атомної енергетики. Проте усвідомлення того факту, що людству не уникнути певного рівня радіації, необхідне для розвінчання забобонів і страхів, присоромлення нечесної пропаганди та обґрунтування остраху катастроф і нещасних випадків, якими супроводжується використання джерел випромінювання у промислових або медичних цілях.

Умовна важливість джерел природного випромінювання — внутрішніх і зовнішніх

Випромінювання природних радіоактивних елементів у тканинах наших тіл, яке не залежить від роду діяльності людини, видається мені еталоном оцінювання шкоди від штучних радіоактивних джерел. Наївно хвилюватися через будь-який інцидент, пов'язаний з незначним випромінюванням. Внутрішнє випромінювання середньостатистичного француза в десять-тридцять разів нижче за випромінювання зовнішніх природних джерел, переважно скель та космічних променів.

На розбіжність впливає географія. У скелях, розташованих у різних пунктах Землі, викопні радіоактивні тіла — уран, торій та калій — розташовані дуже нерівномірно.

І хоча саме по собі зовнішнє випромінювання є вкрай незначним, значна увага до засобів безпеки в атомній промисловості підштовхнула законодавців установити обмеження на випромінювання об'єктів ядерної енергетики на рівні третини природного випромінювання у Франції. Радіоактивне забруднення, пов'язане з цією промисловістю, в середньому нижче за одну соту природного випромінювання — і саме через нього виникають суперечки, з якими звичайному громадянину годі дати раду. Причин на це чимало: плутанина з одиницями виміру, що дозволяють визначити рівень забруднення, невпевненість науковців щодо впливу випромінювання і, нарешті, політична кон'юнктура.

Тож ми пропонуємо ввести нову одиницю випромінювання, яка дозволить миттєво під час будь-якої аварії або катастрофи, пов'язаної з забрудненням, визначити рівень тяжкості.

Така одиниця — дарі (річна доза внутрішнього випромінювання). Справді, найстабільніший еталон для

людей — неперервне випромінювання у тканинах наших власних тіл.

Радіоактивні тіла в нашому тілі — це калій-40 та вуглець-14. Про перший я вже писав — це залишок зоряних ядерних багать, що з них постала земна матерія. Вуглець-14 утворюється внаслідок ядерних реакцій, викликаних у повітрі космічними променями. Останні безперестанку линуть на Землю; космічні промені — це, зокрема, результат ядерних реакцій енергетичних протонів із різних частин галактики у високих шарах атмосфери. Потужність космічних променів залежить від висоти. Вони спричиняють у повітрі перетворення азоту в радіоактивний вуглець — вуглець-14, період напіврозпаду якого становить 5 тис. років і який зберігається у вигляді вуглекислого газу. Завдяки внутрішньому обмінові речовин в організмі людини він просякає тканини тіла і, разом із калієм-40, є основним джерелом внутрішнього випромінювання. У людині вагою 70 кг він призводить до 4 тис. розпадів на секунду, тобто 4 тис. Бк; разом із калієм-40 це дає 10 тис. Бк. Але через особливості цього випромінювання вуглецю-14 він має вдєсятеро менший вплив на тканини, ніж калій.

Визначення бекереля досить просте, адже йдеться про активність джерела, один атом якого розпадається за секунду. А отже, можемо використати його, враховуючи, що йдеться про неймовірно слабку радіоактивність. При цьому ми можемо зігнорувати всі інші повсюдно використовувані одиниці, не зрозумілі для нефакхівців. Кому відомо про зиверт³⁷ — одиницю випромінювання, один джоуль на кілограм тканини, врівноважений коефіцієнтом, що бере до уваги природу органу походження випромінювання? Наведена нижче табличка виявляє відносне значення декотрих джерел випромінювання.

Відносне значення деяких розповсюджених джерел випромінювання

1 дарі	Річне випромінювання людини вагою 70 кг. внаслідок вмісту природних калію та вуглецю у тканинах тіла.
0,1 дарі	Середнє річне опромінювання француза під впливом атомної енергетики.
5 дарі	Ґрунт у регіоні Іль-де-Франс, річна доза.
10 дарі	Ґрунт у регіоні Бретань, річна доза.
5 дарі	Космічне випромінювання на рівні моря, річна доза. Приріст 1 дарі на 50 м зі зміною висоти.
5 дарі	Медична рентгенологія, у середньому на рік.
40 дарі	Рентгенограма.
6 дарі	Законодавче обмеження для атомної промисловості, річна доза.
500 дарі	Максимальна річна доза впродовж п'яти років для працівника атомної промисловості.
30 тис. дарі	Смертельна річна доза.
450 тис. дарі	Рентгенотерапія, місцеве опромінювання.

Може видатися, буцім дві останні цифри суперечать одна одній. Але подумайте на вплив сонця на руку: він може бути доброякісним, а проте, якщо сконцентрувати промені в лінзі, то можна спалити тканини тіла.

Забудьмо про цифри! Приймати ванну з водою температурою 30 градусів — приємно. Ванна температурою 90 градусів — смертельно небезпечна. Ефект від підвищення температури на одну тисячну градуса непомітний — це не те саме, що підвищенням на 30 або 90 градусів. Нас хочуть залякати випромінюванням, еквівалентним підвищенню температури на одну тисячну градуса.

Авжеж, між ефектом підвищення температури та підвищенням рівня випромінювання є велика різниця.

Адже механізми розвитку раку коряться випадковим чинникам, тож завжди можна сказати, що шкідливий вплив — хоч би яким мізерним він був — небажаний. Це, звісно, так. Проте порівняння справжньої катастрофи з випромінюванням природних радіоактивних тіл, що їх кожен з нас має всередині себе, дозволяє збагнути, чи справді йдеться про значну шкоду, або ж посміхнутися, коли пропаганда перебільшує ризик.

Якщо ми почнемо звертати увагу на загрози природної радіації та поширювати хворобливий страх на всі джерела такого ж рівня небезпеки, то паралізуємо більшу частину життя людей.

Доведеться зносити стіни, уникаючи водночас бордюрів, більш радіоактивних, ніж ґрунт у Гаазі! Доведеться також скорочувати поїздки до гір, адже що вище, то інтенсивніші космічні промені! Доведеться, без сумніву, нагнати курців, а також тікати з міст, де з вихлопних рур вириваються частинки, канцерогенний вплив яких вбиває тисячі людей на рік! При цьому в 2050 р. дві третини мешканців планети житимуть у містах.

Ще не так давно сперечалися щодо випадкового випромінювання, меншого за одну соту дарі; йшлося про зростання опромінювання, викликаного збільшенням споживання м'яса, адже один кілограм м'яса випромінює близько 130 Бк.

Зокрема, мене вразило гучне засудження радіоактивності скловолокна, що його виробляв новий завод у Сен-Гобені³⁸; його природна радіоактивність призводила до випромінювання рівнем близько однієї соті дарі. Нещодавне відкриття радіоактивності піску на середземноморських пляжах в Еспігетт та Гро-дю-Ру³⁹ взагалі перетворилося на фарс, коли з'ясувалося, що ця радіоактивність — природна і з'явилася з піском, занесеним туди вітром. Відкриття радіоактивності такого самого рівня, але штучної та цілковито безпечної,

викликало б майстерно керовану паніку, що призвела би до банкрутства курорту.

Визнання дарі як одиниці повністю позбавило би нас суперечок навколо проблем, пов'язаних з проголошенням різних катастроф, роздутість яких у ЗМІ та в промовах політиків незрівнянно більша їхнього справжнього впливу на здоров'я громадян. Це дозволило би зосередити обговорення майбутнього енергетики навколо таких основних питань:

— Які загрози становлять різні джерела енергії, нині доступні людству?

— Які можливі варіанти після вичерпання запасів вугілля, нафти й газу, що відбудеться за кілька століть, а то й десятиліть?

Сьогодні нас 6 мільярдів, а до середини поточного століття стане 9 мільярдів. У промислово розвинених країнах більше 20% людей вмирають від раку. Частина відомих на сьогодні причин хвороби лежить у площині людської діяльності: тютюнопаління, канцерогенні продукти, використовувані в промисловості, викиди автомобілів, кепське харчування, стрес тощо. Не варто вважати максимальний рівень випромінювання, встановлений для працівників атомної станції, та споживання п'яти цигарок на тиждень однаково небезпечними чинниками.

Сьогодні на всіх політиках лежить страшенна відповідальність — пошуки майбутніх джерел енергії примушують їх раціонально оцінювати загрози, відкидаючи пропаганду. Наївно вірити, буцімто незліченні народи й цілі континенти, позбавлені нафти й залежні від використання атомної енергетики, пожертвують собою і погодяться, аби багатші держави обрали брудніші, але приємніші для своїх виборців джерела енергії. Усі ми — пасажери корабля «Земля», курс якого проліг через рифи серйозніші, ніж випадкова радіація, що залишається на рівні випромінювання граніту чи викопних радіоак-

тивних залишків, злитих із нашим тілом і залишених нам зіркою, яка кілька мільярдів років тому вибухнула після тривалого ядерного горіння.

Чорнобильська катастрофа, інші аварії та катастрофи, які позначили початок ядерної доби, їх безсовісне та упереджене використання особами, для яких вони — лише важіль у політичній грі, неухильно ведуть до перегляду відносин між керманічами і народом. У Відні під егідою ООН уже діє міжнародна агенція, яка контролює ядерну промисловість майже в усіх країнах світу, за винятком тих, що намагаються розвивати ядерну зброю⁴⁰. Повноваження цієї агенції треба розширити, аби вона мала сили впливати на упертюхів. І саме тут політикам варто виявити пильність.

Ядерна промисловість досягла рівня розвитку, що унеможлиблює новий Чорнобиль. А й справді між чорнобильським реактором і франко-німецьким, вивчення якого профінансовано Європою, різниця така ж, як і між рахівницею та сучасним комп'ютером. Звичайно, наївно гадати, буцімто ризик нульовий і що відкидається будь-яка аварія. Та варто лише порівняти наслідки такої аварії з наслідками аварій на джерелах альтернативної енергії або ж тих, що неминуче з'являться після зникнення ядерної енергетики.

Зрештою, зняття тавра з радіації, якою людство широко користується для рентгенівських обстежень, — лише справа освіти. І саме в цьому річищі лежить наша пропозиція ввести нові одиниці виміру.

Треба навчитися керувати ядерною енергією, розуміючи, що людська дурість, помножена на пропаганду, може призвести до катастрофічних наслідків — скажімо, як у випадку з вогнем, який застосовують зі злими намірами.

На жаль, усім нам добре відомо, що суспільства рясніють подібними можливостями. Майбутнім поколінням

доведеться долати численні президентські вибори, уникаючи страхів, зручних для маніпуляторів і здатних трагічно обмежити запаси 9 мільярдів людей у 2050 р.

Ми не спромоглися примусити органи влади прийняти нашу пропозицію щодо нових одиниць виміру радіації. У наступному розділі ми побачимо, що це — одна з головних причин, через яку ми з Гарвіном не складаємо зброї. І ми приречені виграти це змагання задля виживання нашої планети.

Частина друга

ФІЗИК

*Жорж Шарпак
і Франсуа Вануччі та Ролан Омнес*

На цьому моменті своєї оповіді я злякався, що перебільшив значення рідних мені газових детекторів. Мені пощастило — більша частина моєї наукової кар'єри відбулась у ЦЕРНі; впродовж кількох десятиліть я міг долучатися до розвитку фізики частинок. Успіх цієї галузі став можливим завдяки десяткам чудових вчених, які винайшли нові прилади та створили уявлення, що допомогли зруйнувати звичні погляди, скажімо, на теорію відносності та квантову механіку.

Моя власна праця — поміж тих, які позначили фізику частинок; роботу над детекторами слід пов'язувати з прогресом, який став можливий завдяки ним. Мені здалося доречним залучити колег до дослідження відкриттів, що визначили різні етапи утворення сучасного уявлення про Стандартну Модель.

Один фізик-практик, видатний ерудит Франсуа Вануччі зголосився на цю роботу. Він брав участь в історичному досліді у Сполучених Штатах, що спричинився до двох нобелівських премій: Берту Річтеру за кварк та Мартінові Перлу за лептон τ . Після ейфорії він повернувся до ЦЕРНу до групи Сема Тінга — того самого, який винайшов частинку J ; згодом Франсуа Вануччі почав самостійно досліджувати нейтрино. Він запропонував один дослід у пучку, який існував у ЦЕРНі, проте за межами території центру, за горами Юра⁴¹.

Коли Вануччі попросив у ЦЕРНа кошти на свій дослід, керівництво відрядило гурт геометрів вивчити топологію місцини. Потік нейтрино з прискорювача перетинав ліс, тож перелякані геометри питалися, чи це, бува, не шкідливо. Насправді нейтрино, що походять від ядерних реакцій на Сонці, набагато потужніші за нейтрино з ЦЕРНу. Одначе, *під політичним тиском екологів ЦЕРН відмовився від дослідю; до того ж, було знайдено привід* — хай навіть надуманий — заборонити будівництво прискорювачів за межами ЦЕРНу. Вирішили пожертвувати дослідом.

Вануччі — незалежний дослідник, який завжди береться за амбітні проекти. *На мій погляд, він, як ніхто інший, здатен дати загальний погляд на дослідження, що привели до появи Стандартної Моделі, та змалювати велетенські кроки, що їх робили автори епохальних відкриттів.*

Дуже часто ці відкриття супроводжувались — або й викликалися — прогресом теоретичної фізики. Мені здалося важливим, щоби концепції, які супроводжували прогрес, висвітлював фізик-теоретик. Ролан Омнес пристав на мою пропозицію.

Розділ перший

Золота доба частинок

Фізика частинок — радикальна галузь, яка взяла собі за мету збагнути структуру матерії в її найдалших закраїнах. Упродовж другої половини минулого століття ця галузь зазнала бурхливого розвитку. Саме цю епопею ми й переживемо, зберігаючи, при цьому, її людське обличчя: адже найскладніші завдання у фізиці здійснюють люди, що працюють і переймаються різноманітними відчуттями.

Відкриття, про які йде мова, тісно пов'язані з існуючими засобами виявлення. Мета наша буде незмінною: знайти якнайшвидше, якнайточніше і якнайпотужніше на певний момент знаряддя для «бачення» частинок. Ці властивості описуються відповідними величинами — «тимчасова роздільність», «просторова роздільність» і «мертвий час».

Кожне відкриття потребує пристосованого детектора. Для поточних явищ — скажімо, радіоактивності — достатньо відносно грубих детекторів. Нині ж ми стикаємося з дослідженням вельми рідкісних явищ (наприклад, «чи існує бозон Гігза?»), які вимагають досконалих детекторів.

У витоків майже всіх засобів виявлення знаходимо явище іонізації. Воно ж виникає з сили електрики, що з'являється під час проходження крізь матерію зарядженої частинки. Тож у давніх катодних рурках потік

електронів ставав видимим завдяки світлу на його шляху. Електрони ж із катодного променя, прискорені електричною напругою, мали достатньо енергії, щоби притягти до себе атоми газу. У цей час електрони цих атомів змінюють орбіти, а коли, зрештою, повертаються на свої первісні орбіти, то зберігають надлишкову енергію, випромінюючи характерне світло в газі, який перетинають. Це називають флюоресценцією. Промінь можна бачити простим оком. Якщо густина залишкового газу вища, атоми й далі притягатимуться один до одного і спалахне весь об'єм газу.

Жорж Шарпак поклав життя на нескінченне вдосконалення способів виявлення. Для нас він буде за проводиря, на взірєць Вергілія, який вів Данте легендарними стежками, що й досі не доступніші для профанів, ніж ті, якими вирушимо ми.

Але спершу познайоммося з ним ближче. Багато років тому я вмовив його відповісти на знамениті Прустові запитання⁴². Він дав відповіді лише на частину питальника, упередивши таким текстом:

«Я міркував над питаннями тривалий час. Не маю жодного сумніву, що Пруст — добрий письменник, адже дехто з моїх вельми поважних друзів незрідка зазирає в його твори.

На мене ж він не справив враження — адже великою мірою мої смаки сформувались у підлітковому віці, а юний емігрант, що пожадливо прагнув пізнати Францію, не дуже тягнувся до буржуа, якими рясніють романи Пруста».

Отже:

Ваші улюблені колір і квітка?

Волошки та маки, бо саме вони забарвлювали луки мого дитинства — вони мені до вподоби більше, ніж кручені та позбавлені пахощів квіти тутешніх крамниць.

Якби Ви були кимось іншим, ким Ви хотіли би стати?
Фізиком-теоретиком, і таки став би, якби два роки полону не обрізали мені крила — принаймні в тому, що стосується навчання.

Ваші улюблені прозаїки?

Стендаль, Достоевський, Мартен дю Гар⁴⁵ і ще чимало.

Ваші улюблені поети?

Превер. Він такий примітивний!

Ваші герої в реальному житті?

Нельсон Мандела. Великий політик.

Найменш приємні Вам історичні постаті?

Ідеологи, фундаменталісти, диктатори.

Ваше гасло?

Кваплюся сміятися з усього, адже боюся, що доведеться заплакати.

Який хотіли би мати дар від природи?

Шкодную, що не вмю співати.

А проте, саме Жорж Шарпак відбиватиме такт у нашому «співі про частинки».

Декорації

Перш ніж наша вистава розпочалася на поважних сценах великих лабораторій, фізики розробляли первні фізики нескінченно мало. Втім, навіть не усвідомлюючи цього — так само як месье Журден вправлявся у прозі⁴⁴, хоча цього і не знав — вони започаткували фізику частинок.

Пригадаймо кілька результатів, що позначили генезу цієї галузі ще до щедрих урожаїв великих прискорювачів.

Термін «нескінченно мале» не є абсолютним. Величини, які вимірюються, залежать від засобів вимірювання і пов'язані з наявною енергією; отже, наприкінці ХІХ ст. «нескінченно мале» зводилося до атома. Саме по собі

це було надзвичайне досягнення, адже розміри атома зводяться до якихось 10^{-10} м. Тобто, щоби склався метр, треба покласти поруч 10 млрд атомів, і побачити атом не можна ні простим оком, ні у мікроскоп. Але вже тоді було відкрито першу справді елементарну частинку — хоча про це й не здогадувалися — електрон. З 1897 р. — задовго до інших частинок — його виявляли в катодному промінні. Звісно, у світі елементарних частинок іще панувала глупа ніч, та вже з'являлися перші просвітки.

Першу Нобелівську премію з фізики присудили Вільгельмові-Конрадові Рентгену за відкриття у грудні 1895 р. «надзвичайних променів, що отримали його ім'я». Потім залп із лауреатів, які впливали один із одного — так, 1903 р. прийшла черга Анрі Беккереля за відкриття спонтанної радіоактивності. Беккерель здійснив його навесні 1896 р. в пучку рентгенівського проміння, а отже, воно стало прямим наслідком винаходу Рентгена. П'єр та Марі Кюрі премію одержали за дослідження радіоактивних явищ, відкритих Беккерелем. У 1905 р. Філіпп Ленар отримав премію за вивчення «катодних променів», наступного року — Джозеф Джон Томсон за «теоретичні та експериментальні дослідження здатності газу проводити електричний струм». Насправді саме він остаточно визначив: катодні промені — це як потоки електронів.

Аби осягнути ці результати, варто придивитися до застосованих способів. Що ж це, зрештою, за катодні рурки, які зібрали такий врожай відкриттів?

Відомі вони з середини XIX ст. Йдеться про скляні рурки видовженої форми, з яких за допомоги спеціальних pomp крізь отвори певного діаметра викачують повітря. Дві металеві пластини утворюють електроди, пов'язані з полюсами електрогенератора, і дозволяють підтримувати різницю потенціалів. Якщо остання досить висока, розріджений газ перетворюється на провідник, і рурка світиться.

У подібному приладі 1879 р. Вільямові Крукзу, який доводив вакуум до максимуму і підвищував тиск, поталянило отримати тоненькі потоки з катода — катодне проміння, що містить легкий електричний струм. Біг струму оприявнюється через флюоресценцію у збуреному газі в рурці. Якщо піднести магніт, можна побачити, як траєкторія відхиляється. Отже, вплив магнітного поля такий самий, як і в електричного струму, ніби випромінювання складається з крупинок електрики. Однак, якщо прикласти поперечне електричне поле, воно не спричиняє жодних змін, на відміну від струму, що відсунуло висновки щодо досліджуваного явища на пізніший час.

Внесок Томсона — у поліпшенні порожнього простору в рурці. Справді, присутність залишкового газу викликає іонізацію, що екранує зовнішнє електричне поле, і воно стає неефективним. Щойно досягнувши достатньо зниженої густини газу, Томсон зміг детально дослідити поведінку катодних променів. Він показав, що промені відштовхуються від негативно зарядженої пластини і, навпаки, притягуються позитивно зарядженою пластиною. Так 30 квітня 1897 р. йому пощастило виявити електрон та оцінити його масу як приблизно одну двотисячну маси атома водню.

Роберт Ендрюз Міллікен експериментально доведе, що всі електрони мають однаковий заряд — $1,6 \cdot 10^{-19}$ Кулона. Це — елементарний заряд, найменша вільно існуюча кількість електрики. Для відповідності давнішому протиставленню позитивного й негативного зарядів, прийнятих в електростатиці, йому приписують негативне значення. 1923 р. Міллікен також отримає Нобелівську премію — за «роботу над елементарними електричними зарядами та фотоелектричним ефектом».

Електрон — найменша частинка електрики, себто найменша кількість матерії, яка несе електричний заряд.

Порівняно з масою найлегшого з атомів — водню — його маса дуже низька. Його легко виокремити. Щоби вирвати електрон з його атомної орбіти, достатньо електричної напруги. Саме так створювали катодні промені, саме так працюють рурки у кінескопах — їх використовували до появи пласких екранів.

Одразу виникає запитання: якщо матерія здатна випромінювати електрони, заряджені умовно негативно і якщо загалом матерія нейтральна, то, певно, треба подумати і про протилежний заряд — позитивний, який також мусить міститись у матерії. Як вони розподіляються? Можливі два варіанти. Або ж матерія подібна до нуги, де позитивні заряди заповнюють весь об'єм, а електрони стирчать подекуди, мов родзинки. Або ж позитивні заряди скупчуються у певних точках. Доведення правильності другої гіпотези стало внеском лорда Ернеста Резерфорда та його учнів Ганса Гайгера й Ернеста Марсдена: позитивний заряд несуть частинки, названі «протонами», які збираються в малесенькому ядрі в осередді атома.

Цим відкриттям ми зобов'язані неодноразово застосованому методові: коли, використовуючи частинку-мішень, ми досліджуємо рух пробної частинки. У випадку команди Резерфорда було використано найенергетичніші на той момент частинки — α -частинки природної радіоактивності. Мішенню була тонка золота пластинка — адже золото можна розкочувати у надтонкі пластини з мінімальною кількістю атомних шарів. Було відомо, що α -частинки заряджені позитивно, як і гіпотетичні розшукувані ядра. Дослід полягав у відстеженні напрямку виходу α -частинок після того, як вони перетнуть золоту пластинку.

Якби йшлося про «матерію-нугу», то вона навряд сприяла би розсіюванню α -частинок — навпаки, вони пройшли би більш або менш прямою лінією аж до цен-

тральної плями на контрольних екранах. А ядро, в якому зібрано всі позитивні заряди, повинно відштовхувати α -частинки з то більшою силою, що вони ближче. Результат підтвердив останнє припущення: α -частинки, які проходили далеко від ядра, не відхилялися, інші ж сильно відхилялися, а деякі навіть відскакували. Пояснення з'явилося миттєво: їхня траєкторія збігалася з розташуванням ядра. Цей дослід дозволив уперше визначити приблизні розміри ядра: кілька 10^{-15}м .

Резерфорд 1908 р. одержав Нобелівську премію — ще до свого фундаментального дослід у 1911 р. Отримав він премію не з фізики, а з хімії — за «дослідження дезінтеграції елементів та хімії радіоактивних речовин».

Відтоді почали говорити про «планетарну модель атома», що складається з ядра з усіма позитивними зарядами та хмари протилежно заряджених електронів довкола.

У період 1920—1930-х років учені зосередилися на дуже точному вимірюванні різноманітних щойно відкритих форм радіоактивності. Радіоактивність — це вияв ядерних явищ, вона народжується на рівні атомних ядер. А саме існування ядра ставило складну проблему. Електростатична стабільність ядра вже не була очевидною, адже позитивно заряджені протони всередині нього мали би шалено відштовхуватися одне від одного під дією електричної сили. Аби зрозуміти стабільність цілого, треба було ввести в гру нову взаємодію — «сильну» або «ядерну». Ця сила притягання здатна компенсувати відштовхування зарядів. Так передвістили новий тип частинок — нейтрони; вони нічим не відрізняються від протонів, але мають нульовий заряд. Замість того, щоби відштовхуватися, нейтрон притягується і сприяє стабільності ядра.

Нейтрон відкрив 1932 р. Джеймс Чедвік. Він вивчив розсіяння різних продуктів нейтрального випроміню-

вання бериллової пластини, обстріляної α -променями. На той час це випромінювання було енергетично найпотужнішим. Результат трактувався як розповсюдження нейтральних частинок, масою близьких до протона — їх назвали «нейтронами». У 1935 р. Чедвік одержав Нобелівську премію за «відкриття нейтрона».

Продовження цих досліджень принесло Нобелівську премію 1938 р. Енріко Фермі за «доказ існування нових радіоактивних елементів, утворених шляхом випромінювання нейтронів, і відкриття ядерних реакцій, спричинених повільними нейтронами». Ім'я Фермі не раз спливає у тріумфальному поступі фізики частинок. Згідно зі свідченнями, це — останній фізик, який так вплинув і на теорію, і на експеримент. Після нього теоретики та експериментатори переділилися на два цілком окремі клани.

Отже, тоді будова матерії здавалася досить простою: з одного боку, ядро з нуклонів — таку загальну назву дали протонам і нейтронам — розміром приблизно в кілька 10^{-15} м, зліплених до купи завдяки ядерній силі; з іншого — електрони, що обертаються навколо ядра завдяки електромагнітному притягненню.

Три частинки та дві сили (на рівні частинок дія гравітації заслабка) для відтворення всієї матерії — як земної, так і небесної: фізики запропонували найстисліший із можливих рецептів. Утім невдовзі все мало значно ускладнитись.

Промені з далеких світів

Відкриття, що про них ішлося досі, робились у лабораторіях завдяки винахідливості кількох особистостей, яких у ті часи називали «вченими». Вони обмежувалися вимірюванням ядерних явищ, користуючись випромі-

нюванням природних джерел — по чергово то електронів, то α -частинок, то нейтронів.

Проте фізики швидко збагнули, що в діло можна пустити й інше випромінювання — космічне. Порівняно з радіоактивним це випромінювання мало одну чималу перевагу — адже давало енергії значно більше і забезпечувало набагато ефективніше бомбардування матерії. Космічні промені відкрили новий розділ у дослідництві.

Спершу 1912 р. їх виявив Віктор Гесс: він сміливо заліз до повітряної кулі, аби довести, що просто з неба на нас падають нові промені. Гесс помітив: навіть якщо електроскоп перебував під скляним ковпаком, з плином часу він усе одно розряджався. Це пояснювали наявністю у просторі заряджених частинок, які нібито перетинають усе навкруги. Проте було й інше пояснення. Випромінювання могло походити з глобальної радіоактивності Землі — або з космосу. Пролити світло на проблему мав дослід.

Гесс підняв кулю на висоту 5 тис. м. Він спостерігав, як поступово розряджається електроскоп. Що вище — то швидше. Це доводило, що потік частинок тут жвавіший, ніж на поверхні Землі. З неба лилися промені. Це відкрило перед дослідниками частинок Усесвіт.

Нині відомо, що космічні промені над атмосферою складаються переважно з протонів — частинок, що їх можна знайти всередині атомів. Не дивно, адже вся звична для нас матерія пояснюється набором тих самих елементарних складників.

Однак протони, що їх називають також «первісними космічними променями», не можуть дійти неушкодженими до земної поверхні. Вони дуже швидко взаємодіють, щойно потрапляючи до зовнішніх шарів атмосфери, і утворюють пасма вторинних частинок — тих, що їх пізніше вивчатимуть у прискорювачах. Цих нових частинок було значно більше, ніж три складники, з яких буцімто складалася матерія.

Аби дослідити інтенсивність випромінювання на різних висотах, фізики перетнули світ. Вони дряпалися на гори, запускали кулі, щоби «промацати» таємничі промені. Це привело до значних відкриттів. По-перше, 1932 р. Карл Д. Андерсон знайшов у космічному випромінюванні частинку низької маси — як в електрона, проте з позитивним зарядом. Аби збагнути це фундаментальне відкриття, треба зробити невеличкий екскурс у теорію. Рівняння Дірака дає загальний математичний опис електрона в рамках одночасно квантових і релятивістських. Але рівняння допускає два розв'язки: один описує електрон дуже точно. Другий же може видатися зайвим — він відповідає негативним енергіям, погодитися з чим складно. Дірак геніально розтлумачив це як дзеркальний розв'язок, що описує частинку, ідентичну електроніві в усьому, окрім заряду.

Більшості фізиків тієї доби це здавалося лише математичним вивертом, уявним віддзеркаленням, проте відкриття Андерсона виправдало наполегливість Дірака. З'ясувалося, що й справді існує позитивно заряджений еквівалент електрона. Відкриття позитрона відбулося завдяки камері Вільсона, в якій можна простежити траєкторії заряджених частинок. Заряд установлюється за кривою, на яку впливає зовнішнє магнітне поле.

Спосіб виявлення у камері Вільсона спирається на конденсацію пари, себто перехід від газу до рідини. Явище спостерігається там, де є електричні заряди. Рух однієї зарядженої частинки приводить до місцевої іонізації впродовж його траєкторії. Іонізація дозволяє притягнути краплини конденсації. На практиці в огороженому просторі, заповненому повітрям і парами алкоголю, підтримується постійний перепад температури. Іони, що утворюються з проходженням частинок, складають щось на кшталт зародку конденсації. «Туман» з'являється там, де є заряди. Нині такий тип детекторів

уже не використовують, але в наукових музеях можна побачити їхні сучасні версії.

Нобелівський комітет відзначав цей спосіб двічі. 1927 р. — Чарлза Томсона Різа Вілсона за «метод візуалізації слідів заряджених частинок через конденсацію парів» — тоді Нобелівську премію вперше присудили за технічний винахід; а 1948 р. Патріка Мейнарда Стюарта Блеккета відзначили за «вдосконалення камери Вільсона та зроблені завдяки цьому відкриття в ядерній фізиці та космічному випромінюванні».

Ще одне фундаментальне відкриття є наслідком дослідження космічних променів — відкриття мюона. І знову це стало результатом взаємодії теорії та практики. На відміну від випадку з позитроном, коли теоретичне передбачення не набагато випередило експериментальне підтвердження, на з'ясування ролі мюона знадобилося ціле десятиріччя.

На землю неперервно падає злива електрично заряджених частинок — щосекунди сотня частинок вкриває кожен квадратний метр. Маса частинки, знайденої у 30-х роках, була проміжною між масами електрона і протона, за що й дістала назву «мезона». Мезон здатен з легкістю пройти крізь товсту пластину заліза, зупинитися в ній та розпастися впродовж кількох мікросекунд. Для виявлення було використано «електричний детектор», уперше устаткований схемами випадкового збігу. На першому такому детекторі використовувалася руркова батарея Гайгера. Рурка Гайгера заповнена газом, що легко іонізується, переважно аргоном. У її центрі — дріт під високою напругою, тоді як стінки заземлено. Коли заряджена частинка пролітає крізь газ, відбувається іонізація. Оскільки між дротом і стінками прикладено електричне поле, з проходженням частинок електрони вириваються з атомів газу, тож залишаються позитивно заряджені іони. Вільні електрони притягаються пози-

тивно зарядженим дротом, а іони мігрують до стінок. За достатньої напруги електрони швидко розмножуються поблизу центрального дроту, де існує сильне електричне поле — тож на дроті можна зафіксувати електричний сигнал. Рурка може бути до десяти сантиметрів у діаметрі, а напруга досягати кількох кіловольт.

Досліджуючи космічні промені, Джузеппе Окк'яліні і Сесіл Френк Павелл спостерегли два цікаві явища в ядерних емульсіях, виставлених на велику висоту; ці явища прямо показали, що мюон утворюється під час дезінтеграції іншої частинки з проміжною масою. Цей «первісний мезон» дістав назву мезона π -піона — і це та сама частинка, існування якої передбачив Юкава, намагаючись пояснити сильне притягнення між нуклонами внаслідок ядерної взаємодії. Нині лише фізики дуже поважного віку використовують назву «мезон» на позначення мюону.

Спосіб виявлення за допомоги емульсії широко використовувався для дослідження космічних променів. У 1950 р. Павелл одержав Нобелівську премію за «вдосконалення фотографічного методу вивчення ядерних процесів і відкриття, зроблені завдяки цьому методу та стосовні мезонів». Спосіб ґрунтується на тому факті, що заряджені частинки, перетинаючи фотопластинку, іонізують атоми, що їм трапляються. Плівка відіграє роль гелю, іони зберігають заряд і розрізняються під час проявлення емульсії. Щодо отриманого просторового рішення цей спосіб — незрівнянний: траєкторію частинок можна виміряти з точністю до мікрона, тож його використовують, коли потрібні дуже точні сліди. Але щодо аналізу отриманих результатів цей метод надто складний, а ще — пасивний, адже він не дає жодної інформації про час. Нині цей спосіб переважно замінюють швидкими методами, що дозволяють за короткий час зібрати різноманітні дані.

Що ж це за нова частинка — мюон? Вона може мати як негативний, так і позитивний заряд. За властивостями вона нагадує електрон — окрім маси, яка в 200 разів більша. І це пояснює, зокрема те, чому мюон розпадається, а електрон лишається стабільним. Своїм відкривачам мюон видався надто громіздким для будови матерії. «Хто замовляв таке?» — здивувався фізик Рабі, і це мало означати: «Нащо воно?»

Насправді ж мюон — «перший дзвіночок» другої родини елементарних частинок, які, справді, можуть видатися безглуздими в аспекті будови матерії, адже не беруть участі в утворенні відомих елементів. Розвиток фізики частинок приведе до відкриття інших частинок, значення яких ще не до кінця зрозуміле.

Мюон має властивість перетинати значні товщі матерії, не зупиняючись. Можливо це завдяки тому, що він не відчуває на собі сильної взаємодії. У космічному випромінюванні його можна виявити на поверхні Землі, хоч інші частинки розпадаються або ж поглинаються під час проходження крізь атмосферу. Цю здатність мюонів усюди проникати використали для зондування єгипетської піраміди. За допомоги лічильників, що вимірювали кількість мюонів, які потрапляли до верхньої камери піраміди, зондування в різних напрямках дало дуже цікаву світлину, що не виявила жодної дивної структури.

Отже, космічне випромінювання зробило вирішальний внесок у розвиток фізики частинок, спершу — відкриттям антиматерії, згодом — відкриттям першої частинки з другої родини. Відкрило воно й другий фронт для досліджень: дивності. Адже в космічних променях знайшли цілу родину нових частинок з «дивними» властивостями. Аби дослідити їх, фізики встановлювали детектори на гірських вершинах, адже це відтворює процес розгортання атмосферного пасма. Загальновідомою є станція на вершині Південного піка в Піренеях⁴⁵.

Ці частинки отримали назву «каонів», або «К-мезонів». З'являються вони у кількості не меншій, ніж π -піони, але «живуть» набагато довше. Каони бувають нейтрального типу і зарядженого типу. Аби збагнути цю загадку, знадобилося послатися на «правило збереження», яке застерігає від надшвидкого розпаду. Згодом фізика К-мезонів стане вельми активною віссю досліджень у прискорювачах. Досліди з метою з'ясування властивостей цих частинок відбуваються й досі.

Перший фантомний гість

До відкриття мюона здавалося, що трьох дійових осіб, уже присутніх на сцені — протона, нейтрона і електрона — достатньо для пояснення будь-яких змін звичайної матерії, адже з них складається більшість природних елементів. Різниця між атомами залежить від різної кількості протонів у ядрах. Кількість електронів відповідає кількості протонів задля підтримки загальної нейтральності матерії. Цілісність ядер і природна радіоактивність пояснюються більш або менш великою кількістю нейтронів поруч із протонами. Тож усе пояснити доволі просто. Однак цю відносну простоту захмарювала невідповідність, тож довелося для з'ясування стосунків між головними дійовими особами залучити й статистів.

В-радіоактивність — спонтанне випромінювання одного електрона — була великою проблемою. На відміну від α - та γ -радіоактивностей, вона не зберігала енергії. А золоте правило фізики — під час будь-якого процесу утворюється енергія, навіть якщо набирає при цьому незвичних форм, обертаючись по чергово то в кінетичну, то в потенційну, то в теплову, то в хімічну, то — як побачимо згодом — ядерну енергію. Енергія, присутня певної миті, наступної миті обов'язково повинна виявитися, коли ретельно враховано всі можливі форми.

У разі β -дезінтеграції одного з елементів, скажімо, вуглецю-14, що використовується для датування доісторичних залишків, енергія електрона могла бути різною, і дилема тяжіла роками, аж поки Вольфганг Паулі у грудні 1930 р. у своєму знаменитому листі не натякнув на існування нової частинки, що випромінюється одночасно з електроном, але не дає виявити себе. За цією гіпотезою варто помислити про специфічні властивості, які роблять цю частинку майже невидимою. На думку вченого це — лише одне з багатьох розв'язань, «найбільш відчайдушне». Проте ця *a priori* скромна думка настільки добре все пояснювала, що її миттю прийняли. У 1933 р. Енріко Фермі розробив теорію поведінки нової частинки. Саме він вигадав назву «нейтрино» — себто «маленького нейтрона». У листі ж Паулі гіпотетична частинка ще мала назву «нейтрона», хоча відомий нам нейтрон іще не було відкрито.

Разом із нейтрино треба було розробляти ідею нової сили — «слабкої сили», яка пояснювала би слабку ймовірність взаємодії нової частинки. Кількість сил, які діють у природі, досягла свого максимуму — чотирьох: гравітація, що панує в механіці великих предметів, але незначна у субатомному світі, де переважають три сили: «сильна», електромагнітна і «слабка». Нині намагаються не відкрити нові сили, а, навпаки, зменшити їхню кількість. Так, електромагнітну та «слабку» сили об'єднали в електрослабку силу, а згодом сподіваються вкинути до загального місива і «сильну».

Нейтрино — аж ніяк не повністю невидима частинка, інакше в нас не було би прямих доказів його існування. Повністю невидима частинка не мала би контактів із матерією, а нейтрино таки має легку взаємодію. Проте безпосередньо виявити його поталанило лише 1956 р. на реакторі в Саванна-Рівер, через понад чверть століття після теоретичного передбачення нейтрино. Це доводить

складність і непередбачуваність виявлення нейтрино. Відкривачеві — Фредерікові Рейнзу своєї Нобелівської премії 1995 р. доведеться чекати аж сорок років.

Детектор ґрунтувався на техніці коливання. На той час це був велетенський прилад об'ємом не менше 8 м³. Він містив велику кількість рідини, що коливалася; вона складалася з власних молекул і домішок. Цей тип детектора впродовж усієї історії дослідження нейтрино неодноразово копіюватимуть. І досі будуються прилади, основані на тому ж методі.

Коли нейтрино з реактора вступає у зв'язок із протоном, утворюються позитрон і нейтрон. Позитрон іонізує рідину, в якій утворився, а енергія, що виділяється при цьому, обертається на світло. Мерехтливе світло — того ж походження, що й флюоресценція катодних рурок: намагнічені атоми розмагнічуються і світяться. Можливість взаємодії між нейтрино — дуже слабка: щоби збільшити шанси на піймання нейтрино, потрібна масивна ціль. Газ не годиться. Мерехтлива рідина — дуже практична альтернатива: великий об'єм за невисоку ціну. Рідина — прозора, тож світло розповсюджується до найвіддаленіших закутків ємності. А там розміщено фотоелектронні рурки-помножники, які вловлюють світловий сигнал.

Фотоелектронні рурки-помножники — головний елемент експериментальних приладів. Він складається з фотокатода, що містить шар лужного металу, де зіткнення фотонів призводить до фотоелектричного ефекту. Таким чином фотони відривають від металу електрони, а їх зтягує до рурок високою напругою на різноманітних динодах, розташованих кількома поверхами. Кожен динод, отримуючи один електрон, випускає кілька, а помноження дозволяє на виході з рурки зафіксувати електричний імпульс, достатньо широкий для вловлення електромережею. Цей імпульс — дуже швидкий. Фотое-

лектронні рурки-помножники дозволяють отримувати інформацію про проходження частинки приблизно за одну наносекунду.

На сцену виходять кварки

До того, як у дію вступають прискорювачі, резюмуємо те, про що дізналися вище. Матерія складається з атомів, чие ядро об'єднує протони і нейтрони, навколо яких обертаються електрони. Крім того, для розуміння зв'язку між нуклонами і електронами не обійтися без дивної частинки — нейтрино. У променях, що доходять до нас із неба, виявлено присутність нових частинок, сенс існування яких ще не зрозумілий: з одного боку — антиелектрона та мюона, з іншого — ще химерніших частинок. Залишається об'єднати всі ці знання.

Космічні промені створювали умови для дослідів з енергіями, набагато потужнішими за радіоактивність. Але сподіватися на них марно, бо контролювати їх неможливо. Умови, що виникають, сприяють виявленню кількох нових видів частинок, проте їх недостатньо для систематичного вивчення їхніх властивостей. Щоби піти далі, слід вигадати новий метод.

Величезна перевага прискорювачів — у тому, що вони в достатній кількості утворюють потужні потоки частинок, на природі яких ми знаємося та енергію яких можемо змінювати за потреби. Так, завдяки дослідом, умови проведення яких легко змінювати, можна влаштувати цілі кампанії зі зміряння.

Визначмося з одиницями вимірювання енергії. У класичній механіці енергію вимірюють у джоулях (Дж). Це — енергія, яка виробляється на 1 кілограм, що падає з висоти 10 см у земному гравітаційному полі. В електриці 1 Дж — це енергія, яку отримуємо за заряду в 1 кулон (Кл), що перетинає різницю напруги в 1 вольт (В).

Один джоуль — завелика енергія для опису елементарних частинок. Однак нещодавно виявили надзвичайно рідкісні космічні промені, енергія яких перевищує 10 Дж, і нині дослідним способом вивчаються їхні властивості.

Представники субатомної фізики запропонували іншу, зручнішу одиницю — електронвольт (eV). Як указує назва, 1 eV — це енергія, якої набуває електрон, прискорений різницею напруги 1 В.

Якщо елементарний заряд електрона досягає $1,6 \times 10^{-19}$ Кл, то виникає відповідне рівняння $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Дж}$. Отже, електронвольт (eV) позначає мінімальну кількість енергії; це енергія, яку несуть видимі фотони, що доходять до нас із Сонця та збуджують сітківку ока. Якщо точніше, то видиме світло заповнює енергетичний проміжок від 1,3 eV (червоне) до 3 eV (синє).

Теорія відносності укладена формулою Айнштейна $E = mc^2$ пов'язує масу та енергію однієї частинки. Тоді використовують похідні від електровольта: keV (кіло), MeV (мега), GeV (гіга), TeV (тера)... Промені, відкриті Рентгеном, переносять енергію порядку кілоелектровольт — до 100 keV. Типовий для радіоактивності рівень енергії — близько 1 MeV. У середині 1950-х років прискорювачі досягали порядку гігаелектровольт, а нова межа сягає кількох тераелектровольт, себто кілька тисяч мільярдів електровольт. Отже, маси повинні описуватися відношенням eV/c². Так, маса електрона складає 511 keV/c², а протона — 935 MeV/c².

Що таке прискорювач? Це прилад, що дозволяє збільшувати енергію частинок. Для цього слід пустити частинку до електричного поля якомога вищої напруги. Так можна прискорити заряджені стабільні частинки. На практиці ж у перших прискорювачах досліджували протони та електрони. Згодом техніка дала змогу взятися до антипротонів і позитронів, а також до атомних ядер. Нині ж можна говорити про дослідження мюонів, хоча

мюон — нестабільна частинка; втім, здійснення таких досліджень ще потребує серйозних доопрацювань.

Що вища напруга поля, то більше енергії вивільниться. Спершу з'явилися прискорювачі електростатичного типу Ван де Граафа — вони могли сягати 10 м завдовжки та прискорювати до кількох мегаелектровольт. Отже, треба мати в розпорядженні потенціал у кілька мегавольт — і проблеми з пробоем швидко вирішуються.

У 1939 р. Ернест Орландо Лоренс одержав Нобелівську премію за «винахід і вдосконалення циклотрона і результати, отримані за його допомоги». Лоренсові спала на думку ідея примусити частинки багаторазово перетнути область, де є електричне поле. Тож електричне поле може мати середню напругу. Але цей спосіб вимагає наявності магнітного поля, здатного вигинати траєкторію частинок і відкидати їх до порожнин прискорення. Саме в цьому полягає принцип дії циклотрона — круглястої порожнини, зануреної в магнітне поле. Останнє не прискорює частинки — тобто не підвищує її швидкості. Треба лише змінити напрямок руху, що дозволить замкнути траєкторію частинок таким чином, щоб вони перетнули поле прискорювача багато разів. Що вища енергія, то більший радіус траєкторії, а отже, енергія відповідає діаметрові приладу.

Завдяки прискорювачам уможлиблюється систематичне вимірювання зіткнень. Джон Даглес Кокрофт і Ернест Томас Волтон 1951 р. отримали Нобелівську премію за «перетворення атомних ядер за допомоги штучного прискорювача». Ще раз прискорювачі вшанували 1959 р., коли Еміліо Сегре та Овена Чемберлена відзначили за «відкриття антипротона». Цей випадок — унікальний і заслуговує на розповідь.

Отже, античастинки існують. Але це — дуже рідкісне явище. Адже частинка і античастинка, стикаючись, мають властивість взаємознищуватися, себто зникати,

утворюючи фотони або інші частинки, якщо енергії достатньо. Звідси — скороминуще існування античастинок на землі та й взагалі у всесвіті. Хоч античастинки теоретично існують так само, як і частинки, утворені в ході реакцій з виділенням високих енергій, все ж вони швидко зникають із довкілля, бо обов'язково стикаються з частинками і взаємознищуються.

Експеримент у Берклі дав привід іще більше зацікавитися прискорювачами: фізики залишили космічні промені та кинулися до великих лабораторій, які щойно почали обладнувати. Кожен прагнув отримати якнайбільше енергії. Певний час рекорд зберігався за лабораторією в Дубні, що неподалік Москви, де змогли досягнути рівня у 10 ГеВ, потім ЦЕРН у Женеві та Брукгейвен біля Нью-Йорка збудували синхротрони на 30 ГеВ. Ці два апарати забезпечили найплідніші в історії фізики 20 років. Синхротрон — це розвиток циклотрона, де підтримується постійна орбіта частинок, що обертаються. Тоді магнітне поле повинне збільшуватися відповідно до прискорення. Обидва апарати мають обвід у 600 м.

Потоки протонів, прискорені приладами, тоді досягали 20—30 ГеВ. Це дозволяло утворити різноманітні пучки: піонів, каонів, фотонів, мюонів, нейтрино. Франція могла пишатися двома національними центрами: в Орсе, де містився прискорювач електронів, і в Сакле — прискорювач протонів.

Найзначнішим результатом було відкриття великої кількості нових частинок. Кількість частинок, що їх ми називаємо елементарними, швидко зросла до 200. Деякі з них, поіменовані резонансами — це тільки стани, які існують лише якихось 10^{-23} секунди. Це — різновиди більш звичних станів збудження частинок.

Втратилася простота будови матерії з обмеженою кількістю «цеглинок». Тоді Меррей Джелл-Манн і Джордж Цвайґ висловили припущення щодо існування нового

рівня елементарності: рівня кварків. Протони і нейтрони, так само як і мезони, не є елементарними. Вони складаються з більш фундаментальних компонентів. Аби пояснити всі частинки, відкриті у той період, достатньо трьох типів кварків. Відштовхуючись від цих трьох складників, можна відтворити дві категорії частинок, що відповідають двом типам об'єднання кварків:

— поєднання кварк-антикварк, що утворює родину мезонів;

— поєднання трьох кварків, що утворює родину баріонів.

Необхідні на той момент три кварки дістали назви *u*-, *d*- та *s*-кварків. *S*-кварк (від англ. *strange* — дивний) характеризує дивні частинки. До трьох кварків варто додати групу з трьох антикварків.

Кварки мають цікаву властивість нести заряд, не більший за елементарний: *u*-кварк несе заряд $+2/3$, тоді як *d*- і *s*-кварки несуть заряд $-1/3$.

Що стосується нуклонів, то протон відповідає поєднанню *u-u-d*, а нейтрон — *u-d-d*. Це відновлює загальний заряд $+1$ у протона та 0 у нейтрона. Склад антинейтрона — анти-*u* — анти-*u* — анти-*d*. Його заряд лишається нульовим, однак за складом він усе ж таки відрізняється від заряду нейтрона.

Щодо третього типу — *s*-кварка з зарядом $-1/3$, то за його допомоги можна побудувати низку нових баріонів (від грец. *βαρός* — важкий). Скажімо, поєднання *u-d-s* із зарядом 0 відповідає Λ -баріонові, а *u-u-s* із зарядом $+1$ — Σ -баріонові.

Усі дивні баріони було вже відкрито, коли з'явилася кваркова модель — за винятком поєднання *s-s-s* із зарядом -1 , названого Ω -баріоном. Це відкриття стало свого роду вінцем моделі. Провіщена частинка довго чекала свого часу. Вона побачила світ 1964 р. в Центрі Брукгейвена, у бульбашковій камері з рідким воднем,

відомою як «80 дюймів». Це була та сама, відсутня ланка в розподілі частинок, передбачена кварковою моделлю.

Бульбашкова камера — вельми мінливий прилад, проте її технологія дозволила зібрати врожай відкриттів. Бульбашкова камера була дуже популярною в 1950—1970-ті роки, це — «робоча конячка» тієї доби. Її принцип дії подібний до принципу дії камери Вілсона, проте зміна фази позначається не лише на парі, яка конденсується, а й на рідині, що кипить. Камера складається з резервуара, заповненого рідиною, близькою до rischi кипіння. Кипіння викликає толоч, що послаблює тиск у вирішальну мить проходження частинок. Перехід із газового стану до стану рідини починається навколо іонів, які слугують запальниками. Тож на шляху заряджених частинок утворюються бульки. Камера робить світлини, за якими можна скласти уявлення про траєкторії. Можна простежити за всіма змінами заряджених частинок від точки взаємодії, а оскільки камера перебуває в магнітному полі, можна виміряти їхню енергію. Бульбашкова камера зберігає відбиток взаємодій, які відбулися всередині неї. Отримані світлини — дуже точні, кожну бульку визначено до 1/10 мм.

У 1960-х роках половина фізиків частинок уважали за своє головне завдання дослідження отриманих світлин і тлумачення результатів. Цей метод добре пристосовано до відносно рідкісних явищ. Бульбашкові камери існували до 1980-х років, зокрема їх використовували для вивчення взаємодій нейтрино внаслідок кількох актів. Проте бульбашкові камери мають значну ваду — у часовому вимірі. Механічний толоч може вмикатись у середньому раз на секунду, тож камері бракує швидкості. За кілька місяців у бульбашкових камерах таланило зробити від десяти до ста тисяч світлин. Цієї статистики недостатньо для тлумачення проблем, що постають згодом, коли для незвичайних випадків потрібні міль-

йони, ба навіть мільярди актів. Нині від методу відмовилися, проте він зробив потужний внесок у розвиток галузі, явивши світу безліч мезонів та баріонів — що підтверджує відкриття Ω -баріона. «Сканувальниці», відповідальні за опрацювання світлин, перейшли до рангу звичайних секретарок.

Поступ, здійснений завдяки цій технології, був такий, що за нього дали аж дві Нобелівські премії. Спершу 1960 р. Дональд Артур Глейзер одержав премію за «винахід бульбашкової камери». Згодом, 1968 р. прийшла черга Луїса Волтера Альвареса за «внесок у фізику елементарних частинок, що став можливим завдяки водневій бульбашковій камері». Бульбашкова камера на рідкому водні мала величезну перевагу — ціль, яка складалася практично з самих протонів. Взаємодії, які в ній виникали, можна було тлумачити одразу, не озираючись на ядерні перетворення.

У ті часи наукова спільнота переділялася на дві групи, приблизно однакові за чисельністю — «бульбашистів» та «електронників». Останні розвивали нові технології фіксації частинок. Вони будували прототипи, калібрували їх, а коли дослід нарешті набував форми, складали інформаційні коди, здатні переводити сигнали у фізичні дані. Технологія ж бульбашкової камери, натомість, була незмінною, а інженери зводили дедалі більші резервуари. Аналіз світлин здійснювали тендітні ручки «сканувальниць». Тож фізикам лишалося більше часу на тлумачення результатів. Вони занурювались у феноменологію. Для декого з них перехід до електричних технологій був надто болісним.

Другий привид

Наприкінці 1960-х років фізики постали перед новою дилемою. Нейтрино, вигадане, аби пояснити β -промені, завжди супроводжує електрон. Нейтрино відкрили 1956 р., і його взаємодія справді, як і передбачали теоретики, породжувала новий електрон. А точніше — позитрон, адже реактор породжує антинейтрино. Отже, існував вузький зв'язок між нейтрино та електроном.

До речі, тоді вже було відомо, що частинка, виявлена в космічному випромінюванні та описана Окк'яліні та Павеллом — піон — розпадається на мюон і щось таке, що забирає певну енергію. Як у випадку розпаду β -променів, цю енергію намагалися пов'язати з невидимою частинкою, утвореною разом із мюоном, але яку не пощастило зафіксувати. Ішлося *a priori* про нейтрино. До того ж мюон також розпадався на електрон, виявити який нескладно, і щось таке, що забирає енергію. Отже, виникла потреба ще раз згадати про нейтрино.

Було відомо про три види розпаду, що характеризувалися зникненням енергії, а проблема полягала в тому, щоби дізнатися, чи у трьох випадках ішлося про один і той самий тип нейтрино. Теоретики не могла дійти спільної думки, вирішити питання мав дослід.

З цієї нагоди вперше в історії науки у прискорювачі було створено справжній потік протонів. Рецепт був доволі простий: протони якомога вищої енергії бомбували мішень, де утворювалися піони, що їм дозволяли розпадатись у доволі великому просторі. Словом, скопіювали те, що відбувається в атмосфері перед утворенням космічної зливи з мюонів, які падають на землю.

Головний виклик експерименту полягав у складності виокремлення реакцій, спричинених кількома нейтрино, які вирішили зупинитися просто в осередді детектора. Адже проблема з нейтрино лишалася та сама:

вірогідність взаємодії — мінімальна. Одначе нейтрино завжди супроводжує сила-силенна інших частинок, які за першої-ліпшої нагоди не відмовляють собі у взаємодії, утворюючи океан актів-паразитів. Отже, складність одержання пучка нейтрино полягала в необхідності спершу зупинити всі частинки-паразити, перш ніж поставити під небезпеку детектор у надії зафіксувати вельми рідкісні акти, утворені самими лише нейтрино. Тож із заліза та бетону звели вражаючий бліндаж, що з усіх боків оточував детектор. Через свою невидимість лише нейтрино здатні перетинати матерію на своєму шляху.

Пучок було утворено в прискорювачі Брукгейвена — він дозволяв протонам отримати енергію в 30 GeV . Нейтрино породжувалися внаслідок розпаду піонів, а отже, вироблялись одночасно з мюоном, на відміну від β -променів, виявлених під час досліду Рейнза.

Якби в природі існував лише один тип нейтрино, прилад мав би зафіксувати під час взаємодій однакову кількість новоутворених електронів і мюонів. Нейтрино з реакторів, які використовувалися до цього часу, мали енергію, занижку для породження мюона з масою, набагато більшою за масу електрона. І навпаки, якщо нейтрино з прискорювача різні, то й утворюватимуться винятково мюони.

Під час досліду поталанило зафіксувати двадцять дев'ять актів взаємодії. Усе вказувало на слід мюона. Жоден акт не показав чистого електрона, який, замість утворювати такий довжелезний шлейф, зібрав би скупчення цяток. Напрошувався висновок: нейтрино, утворене одночасно з електроном, породжує під час взаємодії електрон. Нейтрино, утворене одночасно з мюоном, породжує мюон. Отже, в природі існують принаймні два різні типи нейтрино, які, відповідно, можна назвати електронними і мюонними нейтрино.

Дослід відбувся 1964 р., і його ініціатори — Леон Ледерман, Мелвін Шварц і Джек Штайнбергер — одержали Нобелівську премію 1988 р. за «метод пучків нейтрино та демонстрацію подвійної будови лептонів завдяки відкриттю мюонного нейтрино».

Фіксація нейтрино — величезна проблема. Взаємодіючи, нейтрино зникає, породжуючи низку вторинних частинок. Тип нейтрино визначається присутністю серед утворених частинок або електрона, або мюона, або інших частинок — скажімо, піонів. Зауважмо, що існують і антинейтрино. Різниця визначається безпосередньо за продуктами взаємодії: мюонний нейтрино породжує негативний мюон, а антинейтрино утворює позитивний мюон.

Отже, фіксація взаємодії нейтрино здійснюється так само, як і інші фіксації — у бульбашкових камерах або електронних приладах. Проблема — у винятковості потрібних актів і складності відмежування від взаємодій-паразитів, які проходять набагато легше. Аби компенсувати дуже слабку вірогідність взаємодії, акти виявлення нейтрино повинні спиратися на потужний струм і величезну масу детектора. Вже дослід Рейнза показав, яких розмірів можуть досягати детектори.

На щастя, джерела нейтрино майже завжди дуже щедрі. Сучасні ядерні реактори випромінюють приблизно сто мільярдів мільярдів нейтрино щосекунди (без шкоди для довкілля). Насправді це — електронні антинейтрино. Сонце ж щосекунди надсилає потік з 60 мільярдів електронних нейтрино на один квадратний сантиметр земної поверхні — і вдень, і вночі, адже й вночі земна твердь не зупиняє польоту нейтрино. Що ж до прискорювачів, то їхній потік залежить від кількості протонів, випущених у ціль. Типовий сучасний прилад може утворювати близько 10^{11} протонів за один цикл, що дозволяє випустити близько 10^8 нейтрино. Пучок

нейтрино споживає всі протони, прискорені у приладі, тому так складно проводити кілька схожих дослідів паралельно. Фізики, які досліджують нейтрино, вимагають ексклюзивності своїх експериментів.

Розбите дзеркало

Часто у фізиці виникає питання симетрії. Але що воно таке — симетрія? Це перетворення, що залишає незмінними рівняння, які керують явищами, що підлягають розглядові. Її наслідок — закони збереження. Так, симетрія переносу, що характеризує однорідність простору, пов'язується зі збереженням енергії. Симетрія обертання, яка характеризує ізотропність простору — а закони фізики однакові незалежно від напрямку, — асоціюється зі збереженням кутового моменту. У більш розгорнутому вигляді принцип відносності передбачає, що всі фізичні закони однакові, хоч би яким був відносний рух окремих спостерігачів, що пересуваються з незмінною швидкістю. Айнштайн поширив цей принцип на прискорені рухи: пришвидшений спостерігач може уявити, ніби не рухається, а сила, дію якої він відчуває, є наслідком гравітаційного поля. Отже, щойно на обрії з'являється гравітація, всі спостерігачі опиняються в рівних умовах. Більш абстрактна симетрія еталону характеризує три негравітаційні різновиди взаємодії. Застосовується вона, приміром, в електриці, де результат залежить лише від різниці потенціалів, а не від їхнього точного значення.

Враховуючи все сказане вище, можна констатувати, що на Землі панує очевидна асиметрія — невірноваженість матерії та антиматерії. Однак у світі частинок матерія та антиматерія співіснують, достоту близнючки. Разом народжуються і разом зникають. Єдина різниця між ними — протилежні заряди. Чому ж тоді впродовж

розвитку Всесвіту вижила тільки матерія, хоча в момент Великого вибуху, як припускають, панувала симетрія?

Складники відповіді на це запитання знаходимо в порушеннях симетрії, відомих як дискретні або уривчасті. Усього відомо три типи таких порушень: передусім ідеться про симетрію люстра, яку називають відповідністю P ; далі — симетрія матерія-антиматерія, відома як поєднання заряду C ; нарешті — зміна напрямку часу T . Відображення у дзеркалі (симетрія P) здавалося природним, пов'язуючи явища, що могли відбутися з однаковою вірогідністю. Це було справедливим щодо електромагнітних і сильних взаємодій, однак не здійснилося щодо слабких взаємодій. Порушення симетрії P відкрили 1956 р. в процесі радіоактивного розпаду кобальту-60, що випромінював електрони. Магнітне поле скеровує рух частинок. Скероване донизу, воно відхиляє спіни ядер кобальту в цьому напрямку. Електрони ж прямують угору. Симетрія у дзеркалі дає конфігурацію поля, скерованого вгору, де електрони рухаються вниз. Тобто, у протилежному напрямку, ніж у реальному світі. Ситуація, що спостерігається, не є наслідком віддзеркалення — симетрія порушується, бо напрямки не є тотожними.

Правильну симетрію намагалися відшукати, порівнявши P і C — поєднання заряду мало перетворювати частинки на античастинки. В антисвіті ядра антикобальту мають спін, скерований донизу, і випромінюють позитрони також донизу. Напрямки руху електронів і позитронів є протилежними — симетрію C порушено. Більшість фізиків дійшли висновку, що, ввівши в дію одночасно C і P , можна зберегти симетрію CP — себто після перетворення CP можна отримати рівною мірою вірогідне явище. Але 1964 р. зрозуміли, що химерні нейтральні частинки, названі мезонами- K^0 під час розпаду з легкістю порушують цю симетрію. Це порушення —

виняткове, бо зустрічається лише в трьох на тисячу актів. І все ж воно є надважливим, і згодом визнають, що воно підтримує правдоподібне пояснення асиметрії матерії-антиматерії, виявленої у Всесвіті. У 1980 р. Джеймсові Вотсонові Кроніну та Велові Логсдонові Фітчудали Нобелівську премію за «відкриття порушення фундаментального принципу симетрії».

Це відкриття здійснили в Брукгейвенській лабораторії, де до того довели існування Ω -баріона та другого нейтрино. Серцем лабораторії був протонний прискорювач потужністю у 30 ГеВ — найпотужніший прискорювач тих часів, який і досі працює.

Знаючи, що симетрія СРТ, що поєднує три дискретні симетрії, ґрунтується на фундаментальних принципах спеціальної теорії відносності та квантової механіки, можна зробити висновок, що симетрія стосовно зміни напрямку часу T також порушується. Але не так просто прокрутити назад стрічку про субатомний світ. Це стало очевидно 1998 р. в ході порівняння розпадів K^0 та її античастинки.

Досі ми намагалися описувати різні способи фіксації, що сприяли епохальним науковим проривам. Менш відомий бік фізики частинок полягає у використанні набутків інформатики, яка поступово розвивалась і нині перетворилася на науку-гегемона. Адже недостатньо зібрати дані у вигляді світлин з бульбашкових камер або електричних сигналів — з них іще треба «дістати» фізику. Дослід із порушенням СРТ став блискучим вступом до головного аспекту роботи фізика.

Експеримент із відкриттям першого нейтрино полягав в обрахунку частки актів, де фотопомножувачі зафіксували доволі сильний світловий сигнал. Дослід із другим нейтрино можна звести до спостереження за картинками та обрахунку кількості взаємодій, в ході яких виникав достатньо довгий шлейф. Світлини з бульбаш-

кових камер почали потребувати точного вимірювання викривлення шлейфів під дією магнітних полів.

Дослід із порушенням CP є прикладом сучасного експерименту, коли електричні сигнали ототожнюються з цятками у просторі, а видимі сліди перетинаються задля утворення частинок, які повідомляють про себе лише продуктами свого розпаду. Треба відтворити невидимі частинки-посередників. Зокрема, сигнал про порушення CP полягає в розпаді мезона- K^0 , тривалість життя якого дорівнює двом життям піона. Отже, йдеться про відтворення незмінної маси двох частинок із протилежними зарядами лише задля того, аби переконатися, що вони походять від K^0 відомої маси. Попередні досліді обмежувались обрахунком кількості електричних сигналів, а тут метод набагато більш прогресивний, бо йдеться про математичне ототожнення параметрів шлейфу — отже, застосування кібернетики не уникнути. Нині комп'ютери стали невід'ємним складником процесу фіксації. Вимірювані цятки запам'ятовуються, а дедалі складніші алгоритми стають необхідними для пошуку необхідної інформації серед сирих даних.

Сьогодні науковці з лабораторії фізики частинок здебільшого сидять перед екранами комп'ютерів. До слова, варто зазначити, що в 1960-х роках фізика частинок найбільше сприяла розвитку кібернетики. ЦЕРН посідав найбільші комп'ютери тих часів, а найповажнішим клієнтом центру був Пентагон. Мережу (Web) винайшли задля полегшення спілкування фізиків частинок. Нині метеорологічні інститути і центри розроблення автомобілів мають однакові засоби обчислень. Фізика мусить повернути собі пріоритет задля експериментів нового покоління, в ході яких доведеться перетравити небачену кількість даних і які потребуватимуть розвитку оброблення даних через паралельне використання тисяч комп'ютерів.

Що дужче, то менше

Розвиток фізики частинок, що полягав у відкритті багатющого бестіарію дивовиж, відвернув увагу від систематичного пошуку глибших структур. У фізиків було забагато роботи з вивченням цілого звіринцю нових частинок та їхньої непередбачуваної поведінки. Втім, фізики не забули про досвід Резерфорда.

Зв'язок між енергією зонду, який виконує роль такого собі скальпеля, та розмірами досліджуваного об'єкта впливає з квантової механіки: розміри, яких можна досягнути під час експерименту з дифузії, відповідають довжині хвилі, випромінювання, за допомоги якого вивчають матерію. Щоби бачити глибше, треба бити сильніше, тож прискорювачі постійно збільшують енергетичну потужність.

Побачити якийсь об'єкт крізь оптику означає зібрати на сітківці ока фотони, передані або відображені цим об'єктом. У цьому випадку носієм інформації виступає видимий фотон, довжина хвилі якого приблизно дорівнює одному мікрону. Він дозволить розрізнити деталі відповідних розмірів. Наприклад, простим оком можна побачити волосину діаметром приблизно 20 мікронів. Оптичний мікроскоп лише концентрує світло, але не змінює довжини хвилі. Аби вирізнити менші деталі, слід скористатися електронним мікроскопом. Цей прилад використовує потоки електронів, прискорених завдяки електричній напрузі до енергії в тисячі разів більшої, ніж енергія оптичних фотонів (кеВ). Таким чином стають доступними розміри атомного рівня. Резерфорд використав у тисячу разів потужніше (МеВ) випромінювання, аби зондувати ядро. Космічні промені дають, як ми вже мали змогу побачити, цілком природну можливість піти ще далі, проте умови використання — ризиковані. В систематичних обчисленнях економити на прискорювачах не можна.

Природа зонда, що використовується, також є дуже важливою. Обраний зонд не повинен бути структурою на тому ж рівні розмірів, на якому відбувається дослідження. Так, прискорений протон можна уявити як торбу, повну кварків, що ділять між собою сукупну енергію частинки-снаряду. Коли протон взаємодіє, на елементарному рівні кварків не можна з точністю сказати, яку саме енергію має задіяний складник. Оскільки кварки не здатні вільно являтися, той, який взаємодіє, перш ніж дати себе виявити, «вдягається», через що виміряти безпосередню енергію дифузії дуже складно.

Тож, аби вивчити внутрішню будову матерії, за зони взяли електрони. Хоч би якою була шкала, вони завжди будуть на ній цятками. Згодом дуже цінними інструментами дослідження елементарної структури стануть і нейтрино.

Завдяки прискорювачеві електронів, зведеному у Стенфорді, — він досягає потужності у 100 МеВ, що відповідає довжині хвилі, меншій за 10^{-15} м, — і техніці, винайденій Резерфордом, Роберт Гофстедтер взявся визначити розміри та внутрішню структуру протону. У 1961 р. він отримав Нобелівську премію за «електронну дифузію та структуру нуклона».

Пошуки тривали завдяки новому прискорювачеві, зведеному у велетенському університетському містечку у Стенфорді та названому чудовиськом через розміри, які в ті часи могли видатися величезними. Будівництво було завершене 1966 р., прискорювач лінійного типу був задовжки 4 км. Цю пряму, що перетинає пагорби, легко побачити з літака перед приземленням у Сан-Франциско. SLAC — Стенфордський лінійний прискорювач дозволяв електронам досягати енергії, яка тоді вважалася колосальною — 20 ГеВ. Дослід із дифузії, здійснений завдяки цьому приладові, 1990 р. приніс Нобелівську премію Джеромові Айзекові Фрідману, Генрі Вею Кендоллу та

Ричардові Едвардові Тейлору за «глибоко непружну дифузію електронів і кваркову модель». На другому етапі стенфордський прискорювач було модернізовано, і 1990 р. його енергія могла сягати рівня 50 GeV.

Два уточнення. Енергія електронів рівня 20 GeV вважається колосальною, хоча з 1958 р. такого рівня досягали протони. Але з електронами досягти високого рівня енергії значно важче. Адже маса в них невисока, і випромінюють вони слабувато — електрони втрачають енергію, коли хтось намагається змінити траєкторію їхнього руху, що пояснює, чому прискорювачі електронів із високим рівнем енергії є переважно лінійного типу. Масивніші протони поглинають усю приступну енергію. Втрати енергії, яких вони зазнають через викривлення траєкторії в магнітному полі, починаються з рівня енергії, досягати якого нині навчилися.

До речі, з відкриттям Ω -баріона кваркову структуру адронів було затверджено. Але про це дізналися з даних щодо симетрії, а не завдяки динамічному виявленню. Експерименти з дифузією намагалися знайти структуру протона у вигляді твердих об'єктів, що їх називали партонами, тобто невеличкими частинками. Це підтвердив дослід у Стенфорді. Згодом партони ототожили з кварками, але партони виходили за межі трьох уже описаних типів кварків, названих кварками валентності, оскільки вони передають свої властивості частинкам. У протоні повно партонів, адже поруч із введеними кварками існує безліч пар кварк-антикварк, що їх нині ми навчилися майстерно зондувати.

Аби продовжувати дослідження в цьому напрямку, довелося сплатити високу ціну. З часом прилади ставали дедалі більшими. Щоби зводити їх і проводити спостереження, потрібна була широка співпраця. Бекерель працював сам, викладаючи на обпечене сонцем підвіконня кристали, що містили уран. То був щасливий

час, коли фундаментальні відкриття робилися на самоті! Резерфордіві допомагали двоє молодших співпрацівників, що обраховували вплив α -променів на екран із сульфиду цинку. Для введення в дію перших прискорювачів потрібна була низка експертів, а на передовій опинялися інженери, необхідні для їхнього зведення. Та й експерименти об'єднували команди з кількох фізиків. У 1964 р. дослід, що привів до відкриття порушення CP, поєднав лише чотирьох науковців, двоє з яких поділили між собою Нобелівську премію.

Співпраця вчених у роботі з бульбашковими камерами поширювалася відповідно до кількості світлин, що їх треба було обробити. Вивчення світлин відбувалося звичайно простим оком, а машини запам'ятовували характеристики шлейфів. Найточніші дослідження потребували до 100 тис. світлин, і кожна з них вимагала — відповідно до складності — від хвилини до години; тож зрозуміло, чому в більшості лабораторій постало питання про окреме вивчення світлин — це завдання виконували десятки фізиків. Та це ніщо порівняно з арміями науковців, які йшли на приступ експериментів.

Готується ЦЕРН

Фізики частинок спершу роз'їхалися по університетах, розкиданих по Європі та Північній Америці, а згодом і в Японії, та зосередилися навколо кількох прискорювачів, і кожен з них прагнув якнайпотужнішого приладу. За часів першопрохідців розміри приладів були університетськими, а самих центрів було досить багато. Згодом, через потребу користувачів у більшій енергії, прилади більшали, а центри набували національного та міжнародного статусів.

У радянській Дубні звели протонний прискорювач на 10 GeV — рекордсмен свого часу. У лабораторії працювали вчені з деяких країн Сходу та Азії. У 1958 р. з'явився ЦЕРН із протонним прискорювачем на 28 GeV — це стало символом відродження континенту після лихоліть війни. По кількох місяцях запрацював прискорювач у Брукгейвені, який із незначною перевагою став новим рекордсменом.

Сьогодні ЦЕРН можна вважати лабораторією світового рівня, — адже в ньому працює половина з 8 тис. фізиків частинок, які живуть на земній кулі. Щоправда, більшість із них не мешкають у ЦЕРНі, а відвідують його на певні періоди часу. Під час «золотої доби» постійний персонал ЦЕРНу налічував 4500 осіб — інженерів, техніків, адміністраторів, — що спирався на кістяк із кількадесят фізиків. Нині тут постійно працює близько 2 тис. осіб.

У 1960—70-х роках такий прискорювач, як у ЦЕРНі, дозволяв проводити кілька дослідів паралельно. Центральна машина прискорює протони, а отриманий потік можна переділяти на кілька пучків. Протони можна використовувати для безпосереднього бомбування мішені, але з них можна й утворювати пучки різноманітних вторинних частинок. Таким чином утворюються потоки піонів, фотонів, мюонів або нейтрино, енергія яких залишатиметься в межах початкової енергії протонів-генераторів. У ті часи в ЦЕРНі існували дві великі зали, де постійно відбувались експерименти, кожен із яких мав власний потік, що живив детектор, призначений для вузького дослідження, власну контрольну кімнату, затиснуту між високими бетонними стінками, що поглинали небажану радіацію.

Величезній кількості експериментів відповідав широкий спектр тем досліджень. Хтось спеціалізувався на вивченні резонансів, хтось — на фізиці каонів або нейтрино. Ентузіазм був такий, що його можна було

помацати. Середній вік дослідників був досить низький, адже галузь переживала розквіт, багато хто рвався сюди. Тридцятирічний молодик міг керувати групою аспірантів. Галузь іще певною мірою залежала від теорії — перевірялися всі можливі ідеї, а доступні кошти давали можливість проводити великі дослідження.

Дух новизни рухав фізиками з усієї Європи, до того ж канікули в університетах тимчасово звільняли викладачів від їхніх обов'язків. Насамперед тут відчувалася неймовірна свобода. Кожен захищав свою думку, а оскільки лакун було дуже багато, приймалися будь-які задуми. Єдиним суддею була природа, а для цього достатньо було запропонувати експеримент, що його — в разі наявності хоч якоїсь інновації — урочисто освячував комітет. Вільнодумство підкріплювалося вільноробством. Керівництво демонструвало відкритість новим ідеям. Прилади ще не вражали розмірами, і п'ятьох фізиків для одного досліду було достатньо. Але під тиском часу атмосфера, де кожен міг робити те, що вважав за доцільне, значно змінилася.

Група Жоржа Шарпака займала дві-три кімнатки та робітню на п'ятому поверсі одного з корпусів, звідки, за ясної погоди, видно Монблан у всій його величі; на першому плані — високі дерева, за листям яких можна простежити зміну сезонів. Шарпакові допомагали двоє інженерів та асистент — молодий італієць, випускник аспірантури.

Робітня Шарпака, заповнена шафками, розкиданими газовими балонами та дротами, натягнутими в усіх напрямках, нагадувала лабораторію початку ХХ ст., діяльність якої дуже скидалася на в'язання. Група прагнула розвивати нові ідеї щодо виявлення частинок.

Задум Шарпака був вельми простий: зібрати велику кількість рурок Гайгера і прибрати перетинки між ними. Залишається велика кількість паралельних натягнутих

дротів під високою напругою, причому масу обабіч чутливої поверхні утримує металева решітка.

Утворення електричного сигналу під час проходження зарядженої частинки — відоме явище. Спостереження його в рурках Гайгера давно описано. Дріт під високою напругою протягнуто в осередді циліндричної ємності, заповненої аргонем — газом, який легко іонізується. Електрони та іони розділяються під дією панівного електричного поля. Якщо електронів, які притягуються до центрального дроту, достатньо, вони породжують електричний струм, що його збирають у пристосованій для цього мережі. Сигнал іде не від прибуття надто швидких електронів, а від відхилення іонів до катодів, відхилення набагато повільнішого, ніж те, що його у змозі зафіксувати електроніка. Аби прилад був справді дієвим, варто використовувати дуже тонкий дріт. У найближчому околі він підтримуватиме електричне поле, яке буде то сильнішим, що меншим буде радіус (поле змінюється за формулою $1/r$, де r — радіус дроту; як наслідок — швидке примноження вторинних послідовних іонізацій, які утворюють поблизу дроту лавину та електричний сигнал.

Винахід, який було зроблено, виник завдяки затятій незгоді з думкою більшості колег, переконаних, що поєднання рівнолежних металевих дротин у газі під достатньою електричною напругою ніколи не дасть сигналу в разі проходження іонізуючої частинки. Боялися не того, що частинка не залишить жодного сліду по своєму проходженні, а, навпаки, що відгукнуться всі дротини одночасно. Традиціоналісти стнали плечима і казали: індукція. Сумнівалися, що сигнал обмежиться дротиною, найближчою до траєкторії. Проте Жоржа не зачіпали, адже його досліди, зрештою, коштували недорого.

Одна з найбільших проблем експерименту полягала у стабільності приладу. Вибір упав на дроти з позолоченого вольфраму: вольфрам чинив опір високій механічній напрузі, а податне золото згладжувало вади вольфрамової поверхні. Постачальник — здається, швед — виробляв дроти діаметром у 20 мікрон — це діаметр тоненької волосини.

Друга проблема вимагала ще глибших розмислів. Виявилося, що камери працювали хоча безпомилково, але впродовж дуже короткого проміжку часу. Звичайно експеримент з високими енергіями триває багато років, а отже, навіть найкращий з-поміж детекторів, який пропрацював би щонайбільше добу, не підходить — це антикваріат, гідний музею і абсолютно безпорадний. Після кількох годин роботи спостерігалася поява дивних волокон між дротинами. Росло волосся, утворюючи «мости», що коротили весь прилад. Звідки бралися ці нарості? Винного знайшли швидко: використовуваний газ полімеризувався під дією електричної напруги.

Ми вже писали, що газом, який наповнював ємність, де народжувалась іонізація, був аргон, але чистий аргон — дуже чутливий газ, тому сигнал, викликаний проходженням однієї частинки, не релаксує, залишаючи камеру в намагніченому стані. Щоб обмежити сигнал у часі, слід було додавати інший газ — дезактиватор, що душить численні фотони, утворені в лавині. Проблема полягала у виборі іншого газу та його кількості. Формула нагадувала кулінарний рецепт — поєднували іноді три різні гази. Отриману мікстуру назвали чарівним газом. Складні змішувачі відправляли газ крученою руркою — точнісінько крапельниця в лікарні, що підтримує життя у хронічних хворих.

Після перших неуспіхів, метод невдовзі показав свої переваги. Відстань між дротинами визначили у 2 мм, — тож просторові показники були значно більші за розмі-

ри наявних приладів. Склавши купу з багатьох рамок, можна було зафіксувати проходження частинок у трьох і відтворити траєкторії у просторі з високою точністю.

Камери ширшали, ставали вищими, досягали площі у кілька квадратних метрів, точність значно покращилася. Тож великі відкриття у фізиці частинок, зроблені в середині 1970-х років, великою мірою завдячують методів, розробленим Шарпаком і його командою. Після 1975 р. всі великі експерименти проводились у таких камерах та їхніх спадкоємцях — і це не дивно, адже вони являли значний прогрес як у просторових вимірах, так і в швидкості досліду.

Довгий час ці камери називали MWPC (багатодротовий пропорційний лічильник) або камерами Шарпака. Коли електронне обладнання стало швидшим, камери Шарпака еволюціонували в електронно-дрейфові. У 1992 р. Жорж Шарпак отримав найвищу у фізиці відзнаку за «винахід і розвиток багатодротових пропорційних камер».

Запаморочення від успіхів

Попри зростання ваги європейського центру, у серці каліфорнійської Силіконової долини — тоді відомої значно менше, ніж нині, та все ж уже тоді провідного осередку винахідництва — сталася «листопадова революція 1974 р.».

Площа університетського містечка у Стенфорді дорівнює площі Парижа. На самому краю існує лабораторія, про яку вже йшлося вище — SLAC, і головною робочою силою якої є лінійний прискорювач електронів, введений у дію 1966 р. Обіч цього монстра звели енергетичний колайдер доволі скромних розмірів. Його бомбардували електронами і позитронами напругою до 2 ГеВ.

Що таке колайдер? Це прилад, який у протилежних напрямках пришвидшує частинку та її античастинку. Машина складається з одного-єдиного кільця, оскільки частинка і античастинка летять у протилежних напрямках і перетинають однакову електромагнітну структуру. Колайдер у Стенфорді назвали SPEAR (Стенфордське кільце — прискорювач позитронів та електронів). Він мав діаметр близько 80 м, тобто доволі невеликий порівняно з іншими приладами тієї доби. Таку машину звали не вперше. Схожі прилади будували у Фраскаті неподалік Рима, а потім в Орсе (Франція), а точнісінько така сама машина стояла у Гамбурзі. Проте стенфордський колайдер був на той час найпотужнішим.

Інтерес до колайдерів легко зрозуміти. Фізика частинок довгий час обмежувалася ступанням у слід Резерфорда — бомбардували нерухому ціль прискореними частинками, вивчаючи, що з цього вийде. Головним мотивом були пошуки нових рівнів елементарності у спосіб стеження за напрямком частинки після зіткнення. Другий мотив — творення нових частинок. Подібний експеримент мав місце в лабораторному притулку, де зазвичай працюють фізики. У такій конфігурації енергія, що рухає частинкою, якою бомбують, допомагає утворювати вторинні частинки, урухомлюючи їх. А й справді, збереження імпульсу ($p=mv$, де m — маса, а v — векторна швидкість частинок) примушує частинки, що вилітають, слідувати за частинкою, що бомбує.

За конфігурацією колайдера первісні частинки посідають якості протилежних рухів. Взаємодія відбувається за нульового сумарного імпульсу. Кажуть, що зіткнення відбувається у центрі маси. Це дозволяє створювати нові частинки набагато більших мас, оскільки будь-яку енергію зіткнення можна повністю перевести у масу. Аби підкреслити перевагу такої конфігурації, зауважмо, що відповідна енергія, яку має посідати

протон, що бомбує інший протон на цілі, аби урівняти умови функціонування у LHC — великому адронному колайдері — найпотужнішому на сьогодні приладі, повинна дорівнювати 100 000 TeV. Це нереально!

Електрони і позитрони — елементарні частинки, їх зіткнення мають чимало переваг. Анігіляція дозволяє переводити всю енергію, доступну в первісному стані, в масу частинок відповідно до рівняння Айнштейна $E=mc^2$. Початковий стан, за остаточним визначенням — це чиста енергія. Однак не про чисту енергію йдеться під час зіткнення протонів, яке можна уявити, як зіткнення двох торбин із кулями, адже протони — не елементарні. Тлумачити акти, отримані у разі зіткнення електронів з протонами, набагато простіше.

Утім, обрахувати анігіляцію — електромагнітне явище — неважко. Ефективний переріз зменшується, як і квадрат доступної енергії. Ефективний переріз взаємодії визначає вірогідність її здійснення. Зіткнення двох частинок може бути більш або менш успішним у сенсі утворення нових частинок. Ефективний переріз буде то вищим, що легше утворення акту.

Кільце колайдера SPEAR почало діяти 1973 р. Йому допомагав детектор із аналізу зіткнень, відомий як «Марк-1». Було здійснено низку обчислень, аби точно визначити зміни ефективного перерізу анігіляції залежно від енергії приладу, що послідовно збільшується «кроками» у 100 MeV. Результати настільки не збігалися з прогнозом, що ніхто нічого не зрозумів. За найвишого з можливих рівнів енергії збирали приблизно вдвічі більше актів, ніж передбачалося. Звинувачувати в чомусь електромагнітну теорію було безглуздо — адже все ретельно перевірили. До того ж дані, отримані за енергії у 3,1 GeV (1,55 GeV на кожен пучок, на перший погляд не здавалися сталими і не демонстрували якихось неймовірних результатів.

Літо 1974 р. було позначено самоаналізом. Отримані результати не справджували прогнозів, і ніхто не знав, як їх витлумачити. Декому здавалося, ніби з'являється нова взаємодія, що накладається на електромагнітну. Дуже ретельно вивчили аналіз даних, одержаних за енергії 3,1 GeV.

Ні в сих, ні в тих група була до вихідних 10 листопада. Цей день став днем звільнення. Вирішили ще раз зібрати дані в сегменті 3,1 GeV — саме ця енергія, здавалося, могла дати ключ до розгадки, — проте обережніше, з інтервалами в 1 MeV. Загадку розкрили, констатувавши, що за енергії 3,096 GeV ефективний переріз збільшувався просто на очах. На екрані головного комп'ютера у лічильній залі акти виникали шквалами, хоча минулого разу між двома випадками могло минути кілька хвилин. Експеримент випадково натрапив на специфічний резонанс — невідомого типу, коли ефективний переріз зростає до мізерного коефіцієнта 2 на вершині піку. Тут зростання досягало коефіцієнта 100.

Попередній аналіз здійснювали, не переймаючись точною кількістю енергії приладу — йшлося про доволі грубе сканування, пошук невисокого рівня змінності ефективного перерізу. Сканування — мов крізь дрібне сито — виявляло пік, раніше не помічений на рисках вимірювання.

Резонанс, відкритий таким чином, мав одну дивну властивість: він був неймовірно вузьким, а тривав набагато довше, ніж можна було очікувати від резонансів відомих на той час типів з тотожною масою. Сталася справжня революція — існування резонансу не можна було пояснити в рамках теорії моментів. Казус указував на якусь нову фізику. Цей резонанс назвали ψ -резонансом — на той час майже всі літери грецької абетки було зайнято іншими частинками.

Для фізиків ця пригода стала справжнім дивом. Звичайно відкриттям у фізиці не дуже радіють. Адже здебільшого вони приводять до тривалих пошуків, а тлумачення отриманої інформації змінюється залежно від зростання статистики зібраних даних. Дуже часто відкриття спирається на теоретичне передбачення, позбавляючи практиків більшої частини заслуженої ейфорії. А тут — повна несподіванка!

Залишалось підвести під відкриття теорію. Теоретики SLAC негайно зібралися на тижневий з'їзд. Навколо двох вірогідних ідей згуртувалися два табори: з одного боку, обстоювали думку про появу четвертого типу кварків, з іншого — ідею про утворення нового характерного квантового числа — кольору. Невдовзі зійшлися на кварку, який охрестили зачарованим. Нова ψ -частинка, як виявилось, входила до складу зачарованого кварка та його антикварка. Насправді риси четвертого кварка було описано вже давно — так намагалися пояснити деякі аномалії, а розмови про новий резонанс точилися ще за рік до відкриття, але тоді практики не взяли це до уваги.

Теоретики вдосконалили модель, що дозволила провести решту експерименту, в ході якого впродовж двох років було відкрито спершу нові стани, близькі до ψ , але з більшими масами, а згодом — стани шармонія, тобто сукупності збуджень поєднання кварк-антикварк. Нарешті в 1976 р. відкрили голий чар, себто складники, що пов'язують новий кварк із попередніми. З'явилася родина доти невідомих частинок.

Ідея кварка, яку досі вважали зручним, хоч і дещо надуманим риштованням для розуміння структури матерії, виявилася досить хисткою. Невдовзі постали нові відкриття. Ціла симфонія актів тримала нову теоретичну будову.

Паралельно у Брукгейвенській лабораторії проводили інший експеримент. Він досліджував можливість

утворення — під час зіткнення протонів — нових частинок, які розпадалися б на пари електрон-позитрон. Такі частинки — векторні мезони ρ , ω та ϕ масою до 1 GeV — вже були добре відомі, тож сімейство хотіли поповнити. І справді, у даних, зібраних влітку 1974 р., було зафіксовано пік. Це свідчило про нову частинку, спочатку названу J. Без сумніву, йшлося про стан, раніше виявлений додатковими методами, тож, аби нікого не образити, частинку перейменували у J/ψ — дещо химерна назва, яка, проте, збереглася до наших днів. У 1976 р. — незабаром після відкриття Бертон Ріхтер і Семюел Чжаочжун Дін одержали Нобелівську премію за «винахід масивної елементарної частинки нового типу».

Проте на цьому шафка з сюрпризами «Марка-1» не спорожніла: 1975 р. в ході експерименту було відкрито тау — брата електрона й мюона, що започаткував третє сімейство елементарних складників. Феноменологію третього зарядженого лептона вже було описано. Отже, теорія вже існувала, залишалось довести існування такої частинки і визначити її масу. Пошуки велися на низьких енергіях, але безрезультатно. Відкриття було не таким однозначним, як у випадку з ψ . Робота йшла кропітка, кандидати на новачків збиралися повільно. Акти були аномального типу, бо начебто порушували принцип збереження квантового числа, пов'язаного з сімействами складників. У них брали участь один електрон і один мюон — і все, спостерігався брак енергії. Електрон і мюон належать до різних сімейств, тож, щоби зрозуміти подібний акт, треба уявити утворення на рівні зіткнення пари нових лептонів, кожен з яких розпадається в електронному або мюонному каналі.

Слід був вірогідний, та аж ніяк не певний. У впізнанні типу частинки часто трапляються казуси, тож ніхто не заклався би на відкриття нового лептона. Мартінові Льюїсові Перлу знадобилася вся його впертість, аби

вдосконалити свій аналіз і переконати співавторів із відкриття. У 1995 р., після тривалого очікування Перла (разом із Фредеріком Рейнзом — за виявлення нейтрино) було вшановано Нобелівською премією за «новаторський експериментальний внесок у фізику лептонів», себто за відкриття τ -лептона. Хоч і йдеться про лептон (від грец. $\lambda\epsilon\pi\tau\acute{o}\varsigma$ — легкий), нова частинка важить майже вдвічі більше, ніж протон.

J/ψ і τ стали останніми неочікуваними відкриттями у фізиці частинок. Будуть і інші, проте вони вже не стануть таким вражаючим свідченням ні вигадливості теоретиків, ні вдачі та настирливої цікавості практиків.

Дослід на «Марку-1» є вершиною експериментальної фізики. Однак цей прискорювач досить скромний порівняно зі стенфордським монстром. Його зводили власним офіційним коштом. Експеримент ніби видав вірчі листи методів колайдерів, який одразу набув небаченого поширення.

Прилад називали, наслідуючи традицію іменування прототипів в автомобільній промисловості — і він, справді, став першим у серії, яку продовжили «Марк-2», «Марк-3» та J. Він ввів у обіг концепт детектора соленоїдної структури 4л, що охоплював усі напрямки від центру, де відбувалися зіткнення. Перевага нового детектора була в тому, що не залишалося «дірок» під час виявлення та була впевненість у тому, що обраховано все. Кільце, що скеровувало потоки, перетинало детектор, а зіткнення відбувалися в його центрі. Усе перебувало в однорідному магнітному полі, рівнолежному потокам. Поле огинало сліди, що дозволяло виміряти заряд та енергію.

Різні типи детекторів могли щонайточніше визначити характеристики частинок, що випромінювались у центрі — не лише їхню енергію, а й саму їхню природу. Спершу центральний траєктограф стежив за зарядженими частинками. Тодішній метод ґрунтувався на дро-

тових камерах ємнісного зчитування, які давали досить посереднє зображення та й швидкість мали нижчу, ніж камери Шарпака. Простеживши за всіма слідами, але не розрізняючи їх, учений виявляв електрон завдяки пучкові, що утворювався в приладі, названому калориметром. Мюон виявляли за межами структури, адже він легко перетинає великі обсяги матерії. Цей принцип вимірювання кількома детекторами згодом неодноразово наслідували — аж до нинішніх колайдерів.

Високоточна робота

Наприкінці 1980-х років фізика частинок динамічно розвивалась у чотирьох головних центрах: трьох у Сполучених Штатах і ЦЕРНі в Європі.

Треба визнати, що ЦЕРН, бюджет якого дорівнював бюджетам усіх трьох американських лабораторій, трофеями похвалитися не міг. Порівняно з відкриттями Ω , порушення ЗП, J/ψ та, у 1977 р., Y , що провіщала появу четвертого кварка — b -кварка, а також указувала на існування партонів, ЦЕРН міг похвастати хіба відкриттям слабких взаємодій з нейтральними струмами та впровадженням пропорційних камер, які, звісна річ, оновили всі методи виявлення. Авжеж, ЦЕРН здобувся на незаперечну репутацію компетентної установи, проте ніби затявся на сумлінних обрахунках, залишивши право чинити відкриття заатлантичним колегам. Справжня гегемонія ЦЕРНу почалася значно пізніше.

Найпереконливіший приклад — низка дуже цінних досліджень мюона. Відкритий у космічних променях мюон був подібним до важкого електрона, магнітні властивості якого не проявляли суттєвих відхилень від властивостей звичайного електрона. Починаючи з 1960-х років, електромагнітна теорія значно вдоскона-

лилася. Щодо значення, яке характеризувало магнетизм електрона, експеримент показував 1,0059..., а теорія передбачала теж 1,0059... з десятима, а згодом і дванадцятьма знаками після коми. У розрахунках брали до уваги взаємодію електрона з вакуумом, що за короткий час втілювалась у випромінювання та поглинання променів, з якими частинка могла би взаємодіяти. Що ж до електрона, то він не мав жодного іншого сліду взаємодії, крім електромагнетизму. Можна було сподіватися: якщо маса мюона залежить від таємничих взаємодій, то вони здатні змінити його магнетизм.

Тривалість життя мюона незначна — дві мільйонні частки секунди, тож проводити дослідження треба дуже швидко. Уперше магнетизм із точністю більшою, ніж до одної мільйонної, виміряли у ЦЕРНі. Потім експеримент повторили у кращих умовах. Тоді точність досягла однієї мільярдної; не було знайдено жодного відхилення в магнетизмі мюона.

Велич цих обчислень вражає. Мюон не зазнає жодної нової взаємодії; електромагнетизм підтверджується з небаченою точністю. Зауважмо, що, коли в 1990-х роках цей дослід повторили в Брукгейвені, невеличке відхилення таки знайшли, але теоретичні обрахунки настільки ускладнилися, що результат так і залишився не витлумаченим і нікому було констатувати порушення електромагнетизму.

Інженери ЦЕРНу також розробили перший протонний колайдер. ISR (Кільце перехресного накопичення) запрацювало 1971 р. Колайдер складався з двох окремих кілець із потоками, дуже точно скерованими на точки зіткнення. Попри технічний виклик, який було блискуче подолано, відкриття не вийшло, але набутий досвід призвів невдовзі до успіху. ISR поквапилися закрити у 1987 р. — і ніколи вже колайдер не мав такого довершеного детектора. Компенсація величезних зусиль

була мізерною. Те саме сталося і з самобутнім протонно-електронним колайдером, зведеним у центрі DESY в Гамбурзі⁴⁶. Йому ми зобов'язані виявленням струменів, що матеріалізують як кварки, так і «одягнуті» глюони. Проте від подібного приладу можна було очікувати і на інші несподіванки.

Великий — без перебільшення — внесок ЦЕРНу до 1980 р. ґрунтувався на, здавалось би, непоказному експерименті: бульбашковій камері «Гаргамелла». Як указує вже сама назва⁴⁷, це була масивна камера, заповнена важкою рідиною — фреоном. Камера розташовувалася на шляху потоку нейтрино.

Взаємодіючи, електронний нейтрино породжує електрон, а мюонний — мюон. Під час цього акту нейтральна частинка — нейтрино — прямо пов'язана з зарядженою, себто електроном. Тоді говорять про зарядовий струм, і сила, що пов'язує частинки, передається через обмін зарядженою частинкою, існування якої тоді лише припускалося — W (так само в електромагнітній взаємодії відбувається обмін одним фотоном).

Однаке теорія передвіщала існування іншого типу взаємодії — нейтрального струму, в якому відбувається обмін на нейтральну частинку Z^0 . У ході такої реакції початковий нейтрино може втрачати енергію, проте після зіткнення він виникає знову. У такому випадку β -радіоактивність та всі відомі взаємодії нейтрино тлумачилися лише обміном W : що ж до обмінів Z^0 , то невже вони також існували в природі?

A priori «підпис» легко розпізнати: під час пошуків взаємодії нейтрино в детекторі, розташованому в потці — як у Брукгейвені, — виникає запитання: чому серед частинок, які вилітають, немає ні електронів, ні мюонів? На практиці завжди легше підтвердити появу, ніж зникнення. У цьому випадку акт, у якому немає мюонів, міг би відповідати зарядженому струмові, з

якого мюон виходить звичайно з невеликою кількістю енергії та, отже, невпізнаним.

Тож аналіз вимагав особливих зусиль — порівняння актів, що містили мюони, з тими, де мюонів не було, за допомоги обрахунків, що виводять коефіцієнт актів, де не може бути мюонів. Результат вразив усіх: виставленому критерієві відповідала третина актів. Ішлося не про слабеньку похибку — ймовірність взаємодії з нейтральним струмом була такою ж високою, як взаємодії з зарядженим струмом. Дилема полягала у факті існування експерименту з такою ж метою, що мав місце в Америці і давав то негативний, то позитивний результат. З'явилися жарти про альтернативні струми. Це підкреслювало складність висновків, проте спільний дослід на «Гаргамеллі», що мав більш обнадійливі результати, завершився публікацією доказів існування нейтральних струмів.

«Це було перше значне відкриття ЦЕРНу. У липні 1973 р. група «Гаргамелла» оголосила про виявлення слабких нейтральних струмів. Ця знахідка стала ключовою, адже відкрила шлях до нової фізики — фізики уніфікації слабкої та електромагнітної взаємодії. Згідно з цією теорією, на рівні надвисоких енергій, що панували після народження Всесвіту, електромагнітна та слабка сили з'єдналися, а роз'єдналися лише тоді, коли Всесвіт охолонув»*.

Що ж, два докази краще, ніж один — невдовзі з'явилася друга публікація, де описувався акт, отриманий у камері, в якому виступав один-єдиний енергетичний електрон. Це стало результатом пружної дифузії нейтрино мюонного типу на атомарний електрон, що міг походити лише з нейтрального струму. Усі погоджувалися, що цей експеримент мав усі шанси одержати Нобелівську премію,

* «1954–2004. До Ваших послуг, ЦЕРН», Женева, Editions Suzanne Hurter, 2004.

якби керівник команди Андре Лагарріґ не помер від серцевого нападу в університетському містечку Орсе.

Усних

Ознайомлення з результатами, отриманими «Марком-1», виявило симетрію, що розподіляла частинки на сімейства. На той час уже було відомо про два повні сімейства, а τ -лептон відкрив третє. Потім, не відзначені Нобелівськими преміями, були відкриття b та t -кварків. Історія лише починалася, тож відкриття вимагали лише трохи більше зусиль. Приблизно знали і масу t -кварка, тож теорія стимулювала експерименти.

Після того, як замість хаосу розмаїття частинок повернувся лад, до роботи взялися теоретики. «Гаргамелла» остаточно довела очевидність об'єднання електромагнітної та слабкої сил. Бракувало підтвердження існування проміжних бозонів слабкої взаємодії — W та Z . У цьому допоміг дослід UA1 (UA — підземна частина). Завдяки отриманим результатам було впорядковано Стандартну модель, а ЦЕРН нарешті взяв реванш. Звичайно, можна закинути, що винахід був логічним, адже маси бозонів були відомі заздалегідь. Що ж, час видовищної фізики добігав кінця, зріла доба заступила шаленство юності.

Аби утворити дуже масивні частинки на кшталт тих, знайти які прагнули, потрібно було багато енергії. Тодішні прискорювачі — у ЦЕРНі та «Фермілебі» біля Чикаго — дозволяли прискорювати протони лише за енергії в кількасот ГеВ, чого було більш ніж недостатньо для класичного досліду з бомбуванням цілі. Отут ЦЕРН-Нові й знадобився досвід ISR у використанні протонних прискорювачів.

Було з успіхом випробувано новий задум — звести колайдер «протони проти антипротонів». Взоруєчись

на принцип «електрони проти позитронів», прилад потребував одного кільця, яке вже існувало; проте, на відміну від відносно легкого виробництва позитронів, виробництво антипротонів було вельми ускладнене, тож треба було прийняти виклик.

Довелося побудувати завод із виробництва антипротонів, аби збирати та приручати ці рідкісні частинки, збирати їх у потоки, достатньо тонкі, щоби скеровувати їх у вакуумну трубу прискорювача. Підґрунтя тут досить просте: протони високого рівня енергії бомбують матеріальну ціль і утворюють антипротони. Це дослід Берклі. Проблема в тому, що утворюється дуже мало частинок — для утворення одного-єдиного антипротона треба використати 10 тисяч протонів. У мішень скеровують цикли по 10^{11} протонів, але не всі антипротони випромінюються в обраному напрямку, тож їм треба якомога швидше відрізати шлях. До того ж, вони мають не однакову енергію, а прискорювати доводиться в рурі обмежених розмірів. Довелося вигадати «горловину», здатну збирати якомога більше антипротонів. Побудували спеціальний прилад. АА — антипротонний прискорювач був невеликим замкненим кільцем діаметром 50 м. Утім, «розминка» не завершилася, адже зібрані антипротони посідали різні енергії. Їх треба було «охолодити», тобто розібрати по енергетичних групах. Метод був віртуозний — він ґрунтувався на тому, що діаметр кола коротший за півобвід! Кожна група вивчалась у певній точці кільця, вимірювалась їхня дисперсія, після чого інформацію по кабелях надсилали на інший бік кільця. Дані надходили до проходження в тому місці певної групи, що дозволяло «зробити наводження», пригальмувавши антипротони, що летіли на чолі групи, та прискоривши частинки у хвості групи, які мали наздогнати «своїх». «Стохастичне охолодження» виявилось вельми вдалим, проте сама операція була

дуже складною, вимагала повного дня роботи, щоби забезпечити головний прискорювач достатньо густими групами, як, зрештою, прискорювалися до рівня 270 GeV. На щастя, вакуум у кільці дозволяв потокам існувати по кілька днів.

Таким чином отримували зіткнення протонів з антипротонами з небаченим тоді рівнем енергії 270 GeV на кожен пучок. Це давало зіткненню достатньо енергії для утворення дуже важких об'єктів. Залишалося сконструювати детектор, здатний виявити ці об'єкти.

На відміну від своїх суперників, детектор UA1 виставив радше соленоїдну, ніж двополюсну структуру — так само, як і «Марк-1». Аргумент полягав у можливості вивчати частинки, випущені вперед під невеличким кутом при тому, що в соленоїдній структурі відсутнє магнітне поле. Внутрішня довжина магніту складала 7 м, а поперечна ширина — 3 м. Його було напхано різнорізними детекторами, зокрема низкою пропорційних камер.

У грудні 1983 р. у великому амфітеатрі ЦЕРНу оголосили про відкриття W . Аби зібрати кілька W -частинок серед мільйонів малоцікавих актів, фізикам знадобилася неабияка майстерність. Скажімо, W масою у $83 \text{ GeV}/c^2$ розпадається на один електрон і один мюон у супроводі одного нейтрино. Нейтрино, як завжди, зникає, проте напрямок його «втечі» та енергію можна визначити за повною інформацією про акт. Таким був основний метод вимірювання невидимого у визначенні сигналу. Відомості про Z з'явилися лише за кілька місяців. Ця більш масивна — $90 \text{ GeV}/c^2$ — частинка утворювалась у 10 разів активніше, а виявити її слід було набагато легше, адже вона розпадалася на два заряджених лептони.

У 1984 р. фізик Карло Руббіа та інженер Сімон ван дер Меер — він стояв біля витоків охолодження антипротонів — одержали Нобелівську премію за «значний внесок

у великий проект, що привів до відкриття частинок W та Z — вістунів слабкої взаємодії».

Отже, ЦЕРН отримав свою премію і з європейського перетворився на світовий центр, де фізики з усіх країн, представники різних культур зішлись на одному — жазі дослідження навколишнього світу.

Час підбивати підсумки

Прислів'я, популярне серед фізиків частинок, стверджує, що відкриття здійснюються протонними приладами, а найточніші заміри — електронними.

У 1989 р., в ейфорії після відкриття W та Z , у ЦЕРНі ввели в дію колайдер LEP (Великий електронно-позитронний колайдер). Після нетривалого переходу, позначеного методом адронних колайдерів, повернулися до електронно-позитронних анігіляцій. Мета була зрозуміла: напрацювати велику кількість Z^0 , щоб якнайкраще дослідити властивості. Знаючи масу цього об'єкта — близько $90 \text{ GeV}/c^2$, достатньо було спорудити прилад, здатний досягати рівня 50 GeV на кожен потік, і примусити до взаємодії електрони енергією 50 GeV з такими ж позитронами. Звели уставу для отримання Z^0 : завдання LEP полягало в якнайточнішому вивченні властивостей частинки-посередниці у слабкій взаємодії задля створення підґрунтя для базової Стандартної моделі. Як і експеримент із магнетизмом мюонів, що з дивовижною точністю перевірів електромагнітну теорію, LEP мав перевірити слабку взаємодію. Деякі фізики сподівалися відтрити модель, зламати її та подивитися, що ж далі. Але LEP підвів під Стандартну модель солідну базу.

Технічна проблема полягала у властивості електронів (або позитронів), що мають невелику масу, випро-

мінювати — а отже, втрачати — енергію. Протони ж, наприклад, мудро зберігають енергію, описуючи кола у приладі. Поступова втрата енергії то сильніша, що більша кривина приладу. Отже, вирішили побудувати кільце з якомога більшим радіусом.

Прискорювач зібрали в тунелі обводом 27 км на глибині 100 м методом, що використовується в будівництві метро. У чотирьох точках кільця вздовж обводу було поставлено чотири великі експерименти. У фізиці частинок звичайно поєднують кілька дослідів на одну тему, аби порівняти результати і мати більше свободи під час аналізу. Десятиріччями ці аргументи виправдовували суперництво по два боки Атлантики, а до того протонно-антипротонний колайдер ЦЕРНу наслідували два експерименти UA1 і UA2. Нащо проводити одразу чотири досліди? Можливо, справа у зацікавленості багатьох вчених: LEP дав роботу близько двом тисячам фізиків, за кожною програмою співпраці стояло до 500 науковців. З таким штатом, що вказував на неминучу інфляцію досвіду, впродовж десятиліть щастило побудувати амбітні моделі детекторів.

Збирання даних почалося 1989 р., і перший же результат — можливо, найважливіший результат упродовж усієї роботи LEP — було витлумачено за якихось кілька годин: існують лише три сімейства елементарних складників. Цей результат було одержано на самому початку збирання даних, слідуючи за тим, що дістало назву кривої збудження Z^0 . Енергія пучків поступово змінюється таким чином, щоби дослідити область Z^0 і визначити ширину кривої, яка її характеризує.

Z^0 взаємодіє з усіма елементарними складниками, які утворює у парах частинка-античастинка. Таким чином можна утворювати акти від u -анти- u та e -анти- e . Кожне сімейство має своє нейтрино, тож очікують на відкриття каналів ν -анти- ν , причому кожен «присмак» нейтрино представлений доволі демократично.

Усі заряджені складники, здатні брати участь у розпаді Z^0 , були відомі. Натомість ніхто не знав про кількість різновидів нейтрино. А крім того, є й «присмаки» нейтрино, і можливі канали розпаду. Це вело до коротшого життя, а отже, де ширшої кривини. Величезна кількість різноманітних нейтрино надавала кривій доволі плоскої форми. Ширина кривої точно вказує на кількість різновидів нейтрино, що існують у Всесвіті. Результат — незаперечний. Ширина у 2,7 GeV вказує на існування лише трьох нейтрино.

Хоч основний результат було одержано в перший же день роботи, прилад іще з десятків років продовжував збирати дані, накопичивши кілька мільйонів зразків Z^0 . Було здійснено низку вельми точних обрахунків. Під усіма можливими кутами зору досліджували всі більш або менш рідкісні типи розпаду, шукали нові частинки, передбачені більш або менш переконливими моделями, вивчали розподіл виявлених частинок за енергією та напрямком. Нині Z^0 — одна з найбільш вивчених частинок у цьому «звіринці», і досі не виявлено жодної аномалії: перевірено найглибші закутки Стандартної моделі.

LEP зазнав другої робочої фази, коли його енергію було збільшено до 100 GeV на потік — таким чином утворювалися пари $W^+ W^-$. Умови роботи ускладнилися, поталанило зафіксувати лише кілька тисяч пар. Проте Стандартна модель і тут здобула перемогу.

У результаті дванадцятирічної праці — не рахуючи десяти років, присвячених розбудові колайдера — фізики відтворили будову відомої матерії за допомогою 12 елементарних складників. У таблиці їх розподілено по трьох сімействах. Кожне містить два об'єкти типу лептон, один об'єкт із зарядом -1 (у першому сімействі це електрон), один електрично нейтральний об'єкт, нейтрино і два кварки — один зарядом $+2/3$ (u-кварк у першому сімействі), другий зарядом $-1/3$ (d-кварк у

першому сімействі). Кожен складник має спін $\frac{1}{2}$ і належить до родини ферміонів. Список треба продублювати, враховуючи антипартнерів з такими ж властивостями, але протилежними зарядами.

*Елементарні складники — три сімейства
ферміонів та бозони взаємодій*

Лептони	e^-	μ^-	τ^-	
	ν_e	ν_μ	ν_τ	
Кварки	U	c	T	Ферміони
	D	s	B	
	G	γ	W^\pm, Z^0	Бозони

Отже, матерія складається з цієї купки елементарних частинок. Протон, скажімо, містить два u-кварки та один d-кварк. Перше сімейство дозволяє збагнути всю матерію, що утворює світ, звичний для нас — і твердь земну, і небеса. Два інші мають ту саму структуру з лептонів і кварків, але з переходом з одного сімейства до наступного складники важчають. Додаткові об'єкти утворюються побіжно, їх виявляють або в космічному випромінюванні, або під час експериментів у прискорювачі.

Чому аж три сімейства, якщо для відтворення звичайної матерії достатньо й одного? Відповіді на це запитання іще не знайдено, проте, щоби пояснити порушення ЗП, про яке йшлося вище, необхідні всі три сімейства. Порушення сприймається як фаза у сполученні різних об'єктів, і така фаза стає можливою лише за наявності трьох сімейств. Порушення ЗП — один зі складників, що дозволяють збагнути зникнення антиматерії під час еволюції Всесвіту. Отже, без трьох сімейств Всесвіт мав би однакову кількість матерії та антиматерії, що завадило би появі людей.

Взаємодії між складниками розуміються як обмін агентами, що переносять силу. Ці нові об'єкти також вказано у таблиці. Їх назвали бозонами, бо вони посідають один-єдиний спін: 8 g-глюонів склеюють кварки всередині адронів, γ -фотони пояснюють електромагнітні взаємодії (так само як і світло), бозони W^\pm та Z^0 відповідають за слабкі взаємодії, зокрема у деяких радіоактивних розпадах. W^\pm і Z^0 , на відміну від фотонів і глюонів, дуже масивні, що пояснює невеликий радіус дії сил, за які вони відповідають. Відкриття W^\pm та Z^0 -бозонів у ЦЕРНі 1983 р. позначило вершину впливу Стандартної моделі, яка точно передбачила їхні маси.

У сумі ферміонів, з яких складається матерія, дванадцять. До цього треба додати дванадцять антиферміонів, а щоб зрозуміти всі три головні взаємодії між складниками, потрібні дванадцять бозонів.

У 1960-х роках панувала Стандартна модель складників. Її коріння сягає рівнянь Джеймса Максвелла. А елементарні об'єкти та фундаментальні взаємодії, в яких вони беруть участь, описує теорія відносності.

Як показали результати LEP, Стандартна модель з неймовірною точністю бере до уваги всі експериментальні спостереження у світі надмалого, накопичені на сьогодні. Було проведено безліч перевірок — щоразу з надією відшукати помилку. Усі тести пройшли успішно, не було виявлено жодної похибки. Іноді експериментатори квапилися з оголошенням результатів. Проте щоразу, після нетривалих вагань наукової спільноти, урочисто виголошувалося звичне: «Результат повністю відповідає Стандартній моделі». Щоправда, нещодавно довелося ввести кілька нових параметрів для мас нейтрино, які раніше вважалися невагомими. Але до цього ми ще повернемося.

Головна перевага Стандартної моделі — рівень елементарності, якого пощастило досягнути завдяки відкриттю

кварків і лептонів, а головний об'єднуючий принцип — незмінність об'єму, згідно з яким фундаментальні взаємодії впливають із незмінності в операціях симетрії, що залежать від просторово-часової точки, в якій їх застосовано. Виникла загроза нової перешкоди: кварки з'являються у трьох різних формах. Кожен має свій «колір» — це допомагає вирішувати деякі проблеми у статистиці, які трапляються за складання елементарних частинок, а також за вимірювання ефективного перерізу ексклюзивних процесів.

Модель ґрунтується на багатьох компонентах. Передусім вона спирається на сукупність елементарних складників, розподілених на три сімейства — їхні характеристики визначено експериментальним способом впродовж останніх десятиріч. Точні обрахунки на колайдері LEP стали кульмінацією пошуків, довівши когерентність теорії на рівні 10^{-18} м, відповідно до розмірів частинок.

Враховуючи ці результати, на сучасному рівні елементарності відкрито все. Це дивним чином нагадує пророцтво лорда Кельвіна⁴⁸ — буцімто наприкінці XIX ст. фізику вже було вичерпано! LEP поклав край пошукам нових елементарних об'єктів, подібних до вже досліджених. Але це не означає, що заперечувалося будь-яке дослідження в цьому напрямку! Міг існувати і вищий рівень елементарності, який об'єднував би, скажімо, кварки й лептони. Звісно, сучасні дослідники прямують не цим широким трактом, проте одного дня вони повернуться до альтернативного напрямку.

Останній компонент Стандартної моделі відомий під назвою «спонтанний розрив слабкої електромагнітної системи». До нього ми ще повернемося — це явище пов'язане з уже оголошеним майбутнім відкриттям нової частинки зі спіном 0, яку називають скалярною — бозона Гіґза.

Запрошення на одинадцять

Сага про дослідження нейтрино — це історія, що тягнеться паралельно з історіями інших частинок. Проте у жменьці елементарних складників нейтрино посідають чільне місце — це один із компонентів, необхідних для розуміння феноменології частинок і, як наслідок, еволюції Всесвіту. Нині нейтрино цікавиться невеличка затята група, далека від більшості вчених. Ці маргінали збираються на власні конференції. Певною мірою на це впливає зачарування незвичною частинкою, яка приховує ще чимало несподіванок. Винаходили її відчайдушно, експериментально виявляли карколомно, друге нейтрино відкрили випадково, та й перші щілини у Стандартній моделі з'явилися саме в цьому місці.

Ми намагаємося розповісти про технологічні зв'язки, на які довелося піти заради прогресу. Тому необхідно описати архетип детекторів нейтрино: японський прилад «СуперКаміоканде». Він посідає окреме місце в шерезі пристроїв, що позначили розвиток фізики частинок.

Під суто технічним кутом зору цей прилад не є революційно новим. Унікальні його розміри. Ми вже писали про складність виявлення нейтрино. Нейтрино середньої енергії може перетнути Землю, не залишивши ані найменшого сліду: для нейтрино Земля — прозора. На щастя, не абсолютно прозора, проте ймовірність зупинити нейтрино, що летить із Сонця і перетинає Землю, складає один шанс на мільярд. Тож, аби збільшити шанси на значне накопичення актів, потрібна велика кількість нейтрино та обладнання якомога більших розмірів.

Детектор «СуперКаміоканде» — це резервуар величезних розмірів, наповнений очищеною водою. Його об'єм — 50 кілотонн — приблизно в сім разів більший за вагу Ейфелевої вежі. Це — циліндр заввишки 40 м і діаметром 40 м. Усередині можна звести п'ятнадцяти-

поверховий будинок. Поверхню циліндра вкривають «очі» — величезні рурки фотоелектронних помножувачів. У діаметрі вони сягають 40 см та виготовляються спеціально для цього експерименту. У сумі по всій поверхні детектора розташовано 11 тисяч фотоелектронних помножувачів.

Дослід приніс два надважливі результати.

Насамперед він підтвердив те, що впродовж більше ніж тридцяти років називали дефіцитом сонячних нейтрино. Щосекунди Сонце надсилає потік у 60 мільярдів нейтрино на кожен квадратний сантиметр земної поверхні. Це — нейтрино електронного типу, утворені у осередді Сонця. Однак упродовж довгого часу результати показували від третини до половини очікуваного обсягу потоку. Висунули теоретичну гіпотезу: нейтрино перетворюються, себто здатні спонтанно змінювати тип. Електронне нейтрино, утворене в осередді Сонця, під час подорожі від точки утворення до точки виявлення перетворюється на мюонний або тау-нейтрон. Авжеж, ішлося лише про припущення, проте дуже привабливе, адже воно було справедливе тільки для нейтрино з ненульовою масою. А здоровий глузд наполягав на тому, що нейтрино таки мають масу — так само, як інші частинки матерії. Проблема полягала в дуже низькому гаданому рівні маси — адже одразу після відкриття нейтрино, щоб пояснити радіоактивність, поставили обмеження в менше ніж одну тисячну від маси електрона.

Завдяки рясній статистиці — за кілька років спостережень було виявлено більше 10 тисяч актів, — «Супер-Каміоканде» спромігся з'ясувати специфіку коливання та поставити точніше обмеження на масу. Коливання фіксує лише різницю між масами нейтрино, які беруть участь у процесі. Згодом один експеримент у Канаді, відомий під назвою SNO (Спостереження нейтрино у Садбері), завдяки мішені з важкої, а не звичайної води,

зміг підтвердити явище взаємоперетворення, не лише виявивши зменшений потік електронних нейтрино, а й визначивши потоки нейтрино інших типів. Загальний потік нейтрино всіх трьох типів, як з'ясувалося, повністю відповідав теоретичним розрахункам утворення сонячних нейтрино. А експеримент у Японії, що дослідив нейтрино з великим діапазоном у ядерних реакторах, ще більше уточнив параметри коливання. Кінцевий результат можна тлумачити як зміну невеликої маси нейтрино другого типу — приблизно $9 \text{ меВ}/\text{с}^2$. Це повністю вписується у простий сценарій ієрархії трьох нейтрино.

Проте «СуперКаміоканде» на цьому не зупинився. Детектор не лише перевірів претворення сонячних нейтрино, а й засвідчив перетворення атмосферних нейтрино, підтверджених двома скромнішими експериментами. Перший проходив на «Каміоканде» — резервуарі на 1 кілотонну води, попередникові «СуперКаміоканде». Перші отримані результати не переконали наукової спільноти, тож задля визнання явища знадобилися точніші дані.

Атмосферичні нейтрино утворюються внаслідок бомбування первісними космічними променями — переважно протонами високих енергій — високих шарів атмосфери. Серед вторинних частинок, що утворюються, є мезони, які розпадаються так само, як і в жмуті нейтрино в прискорювачі. Одержані нейтрино — суміш двох типів, електронного і мюонного. Вони походять з усіх горизонтів, оскільки атмосфера вкриває більш або менш однаковою оболонкою всю земну поверхню.

Детектор «СуперКаміоканде» здатен розрізняти як взаємодії, викликані електронними нейтрино, так і взаємодії, викликані мюонними нейтрино. Та якщо, згідно з розрахунками, потік електронних нейтрино б'є в детектор в усіх напрямках, мюонні нейтрино де-

монструють механізм, унаслідок якого нейтрино, що перетинають Землю — проходячи її наскрізь між протилежними точками — нібито зникають. Тут також можна згадати явище перетворення: електронні нейтрино не перетворюються на відміну від мюонних в експериментальних умовах — тобто за енергії в середньому 1 GeV та на відстанях, тотожних діаметрові Землі, 13 тис. км. Згодом цей результат було підтверджено дослідом на прискорювачі, докладна інформація про пучок у якому дозволила провести складніший аналіз. Це не суперечить результатам, отриманому з сонячними нейтрино з набагато нижчою енергією — близько 10 MeV — та з набагато більшою відстанню.

Отже, вимальовується переконлива схема фізики нейтрино — з трьома частинками з ненульовими масами, дві з яких (найбільші) нам відомі: $9 \text{ meV}/c^2$ для мюонного та $50 \text{ meV}/c^2$ для електронного нейтрино. Це — найпростіша схема, адже перетворення фіксують лише різницю між масами. Отже, нейтрино таки посідають масу — і цей висновок завершує тривалу дискусію, що розпочалася з відкриття першого нейтрино.

Стандартна модель ґрунтувалася на припущенні відсутності маси в нейтрино. Це спрощення пояснювали попередніми експериментальними результатами, нібито справедливими за нульової маси нейтрино. Отже, Стандартна модель виявилася неповною, і всіх це влаштовувало — отак легко заткнули першу тріщину. Нині масивні нейтрино стали невід'ємною частиною Стандартної моделі, навіть якщо таке рішення — не єдине. Масивні нейтрино потребують інших нейтральних об'єктів з великими масами — саме в цьому напрямку повинні відбуватися експерименти.

Знайдені маси здаються мізерними порівняно з масами інших частинок. Вага найтяжчого з-поміж трьох нейтрино складає лише одну мільйонну від ваги елек-

трона або дві мільярди від ваги протона. Одне нейтрино, якому пощастило не зникнути після Великого вибуху, набагато більше, ніж інших частинок матерії, тож у сукупності їхні надмалі маси тотожні загальній масі всіх зірок у всіх галактиках.

В основі детектора «СуперКаміоканде» лежить ефект Черенкова. Цей метод ґрунтується не на іонізації, як усі інші техніки, описані на сьогодні. Йдеться про послідовний ефект, що утворюється під час перетинання зарядженою частинкою прозорого середовища та її поширенням зі швидкістю, більшою за швидкість світла в такому середовищі. Швидкість світла у вакуумі — найвища швидкість, досягнути якої не може ніщо, крім частинок без маси, а на практиці — лише фотонів. Добре відомо, що ця швидкість дорівнює 300 тис. км/с. Проте в іншому середовищі швидкість світла набагато нижча. Скажімо, у воді вона дорівнює 220 тис. км/с, а енергетична частинка може з легкістю подолати і цю межу. Цей факт безпосередньо пов'язаний із заломленням — явищем, коли, приміром, заломлюється зображення весла у воді.

Нейтрино з достатньою енергією може звільнити електрон атома молекули води. Якщо електрон має енергію в кілька МеВ, то можна перевірити умови випромінювання Черенкова. У воді він утворить синюватий спалах уздовж конуса, що слідує траєкторії частинки. Це схоже на звуковий удар від надзвукового літака. Саме це світло буде відкрите у рурках фотоелектронних помножувачів.

У 1958 р. Нобелівською премією було відзначено Павла Олексійовича Черенкова — за відкриття цього ефекту, Іллю Михайловича Франка та Ігора Євгеновича Тамма — за його тлумачення. Доти за визначення мас нейтрино жодної Нобелівської премії не вручали, але премія 2002 р. увінчала і це досягнення. Реймонда Девіса Молодшого та Масатосі Косібу відзначили за «фіксацію космічних нейтрино». Косібу вшанували не лише за

експеримент на «СуперКаміоканде», а й за давніший дослід на «Каміоканде», який мав великий шанс знову запрацювати — адже після вибуху наднової зірки линув потужний потік нейтрино.

Кульмінація

Тепер усі учасники начебто на своїх місцях. Нам відомо про 12 елементарних складників і про їхніх партнерів у антисвіті, а також про бозони, що пояснюють їхні взаємодії. Залишається здійснити деякі додаткові обрахунки, аби вдосконалити знання якостей елементарних об'єктів, та деякі досліді вже намагаються уточнити значення важливих параметрів. Ідеться, передусім, про доповнення нашого бачення панівної моделі, яку ще ніколи не піддавали сумніву — навіть маси нейтрино швидко знайшли в ній своє місце — та відомої як Стандартна модель частинок.

Загальний висновок із виконаної роботи — дуже позитивний, проте модель має слабкі місця, що потребують глибших досліджень. Стандартну модель не можна сприймати як остаточну. Це лише приблизна схема низької енергії — набагато повнішої та складнішої теорії. Причини такого ґрунтуються не лише на теоретичних розрахунках, а й на експериментальних загадках, нещодавно виявлених астрофізиками.

Головна вада полягає, напевно, в тому, що забагато приблизних параметрів. Є 19 вільних значень, що поступово вводилися після кожного з відкриттів — це маси частинок, розкидані по широчезному спектру від 1 MeV/c² до 175 GeV/c². Ці параметри варто було б уточнити. Модель не дає пояснення існуванню трьох поколінь складників — хіба необхідність вилучити можливість порушення ЗП. Вона не дозволяє зрозуміти досліджу-

вані характеристики — заряд, масу і т. д. Стандартна модель справді пов'язує значення між собою. Завдяки цьому, відштовхуючись від отриманих результатів, передбачили існування с-кварка. Так само відкриття b-кварка привело до відкриття t-кварка, а частинка тау потребувала відповідника — нейтрино. Проте всі ці передбачення ґрунтувалися на уявленні про внутрішню когерентність. А хотілось би, щоб існувала теорія, яка передбачала б усі важливі параметри, відштовхуючись від серйозних принципів.

У цьому сенсі зрозуміло, що пояснення мас потребує нової частинки. Стандартна модель пропонує дієвий важіль: механізм Гігґза, що обумовлює нову частинку — бозон Гігґза⁴⁹. Він лежить в основі диференціації мас елементарних частинок і дозволяє уніфікувати, не змішуючи, взаємодії в речіщі теорії електромагнітної та слабкої взаємодії. Феноменологію бозона Гігґза вже розписано, вже відомо про ефективний переріз його продуктивності, про способи розпаду, проте є непевність щодо маси. Механізм Гігґза ще не випробувано експериментально, він уже викликає заперечення як надто *ad hoc* (спеціалізований), щоби застосовуватися для уніфікації всіх головних взаємодій. Справді, механізм Гігґза викликає потребу уточнення параметрів — це додало б йому правдоподібності.

До теорії не інтегровано сили тяжіння — це також велика лакуна. Порівняно з квантовим тлумаченням гравітації нинішня Стандартна модель — це регрес. Один із найбільших викликів, що стоять перед теперішнім поколінням учених, — примирити гравітацію з квантовою механікою. Однак гравітація — це основна сила, що діє у Всесвіті, адже саме вона відповідає за астрофізичні явища. Це була перша сила, обрахована Ньютоном. Залишається концептуальна проблема когерентності — досі не існує наукових рамок, у яких гравітація могла би тлумачитися нарівні з іншими силами.

Уже вивчаються спроби уніфікації всіх взаємодій. З'являються гідні, але ще недостатньо передбачливі сценарії. Теорія схиляється в бік ідеї про струни. Елементарні складники вже не є точковими об'єктами — вони посідають просторовий об'єм. Усі вони могли би походити від одної струни, типи вібрації якої пояснювали б розмаїття частинок. Як наслідок, ця теорія передбачає існування величезної кількості Всесвітів, що активізує антропогенні версії творіння. «А Вам відомо, що Александр Великий розплакався, дізнавшись, що, на думку одного з філософів, світів незліченно багато?» А коли запитали, чому він плаче, то відповів: «Бо досі я завоював лише один»*.

По цей бік грандіозних універсальних теорій, які шукають пояснення геть усьому, дослідницька робота триває. Що саме шукають? Насамперед, як ми вже наголошували, бракує головного складника — бозона Гіггза, покликаного пояснити загадку мас частинок. Це — необхідна ланка для зміцнення всієї моделі. І її бракує так само, як на початку 1980-х років бракувало бозонів W та Z . Вже зібрано дані про вірогідну масу такої частинки, пропонують вилку між 114 та 160 GeV/c². З такою масою ускладнюється продуктивність. Аби щось відкрити, знову треба підвищити енергію під час зіткнення. Саме тому в ЦЕРНі взялися зводити новий колайдер — LHC (Великий адронний колайдер). Цього разу вдалися до зіткнень протонів із протонами за енергії досі небаченого рівня — 7 TeV на кожен потік. Тривалий час цей рівень вважатиметься рекордною енергією, якої досягнуто в приладі, зведеному людьми.

Колайдер зібрано в замкненому тунелі, що залишився від LEP. 27 кілометрів обводу приховують 1232 надпровідникові магніти, що працюють за температури

* Baldassar Castiglione, *Le Livre du courtisan*, Paris, GF-Flammarion, 1991.

1,7 K — нижчої за температуру космосу. Деякі експерименти здійснюються з прямим переданням на потоки, що стикаються в кількох точках подвійного кільця на глибині 100 м.

Головне завдання LHC — пошуки бозона Гігґза: існує один різновид чи потрібно декілька? Одначе надії фізиків на LHC — набагато більші: вони сподіваються відкрити ознаки надсиметрії — теорії, яка пов'язує бозони і ферміони в одну категорію об'єктів та ґрунтовно уніфікує наше бачення складників. Теоретики боготворять надсиметрію. Дослідникам нема чого вередувати, адже теорія передбачає подвоєння наявних частинок, а отже — вибух нових станів. Серед надсиметричних об'єктів сподіваються довести існування стабільної частинки, утвореної в мить Великого вибуху, яка пояснила би приховану масу Всесвіту — одну з найбільших загадок астрофізики, помічену завдяки гравітаційному ефектові на рівні галактик.

Але, щоб перевірити ці припущення, потрібні були прилади рівня прискорювача. Один із них назвали іменем мітичного велетня — АТЛАС⁵⁰. Це — величезний детектор, розмірами майже з «СуперКаміоканде», проте замість звичайного резервуару з водою АТЛАС наповнений спеціалізованими детекторами, де кожна точка має конкретне спрямування. Споруда залежить від двох потужних магнітів-надпровідників — внутрішнього і зовнішнього, що має дуже незвичну форму тороїда.

Одна з найбільших проблем під час зіткнень у LHC полягає у виборі актив — носіїв потенційно нових сигналів. Адже потрібний стан — вельми рідкісний, на мільярд актив, які повторюють стару структуру, припадає лише один із новою. Отже, щоб відкинути надмірні дані з потоку, тотожному двадцяти одночасним телефонним розмовам кожного мешканця земної кулі, потрібні дуже точні детектори та дієві алгоритми.

Повний детектор є одночасно величезним і дуже складним. Він має зернисту структуру і складається з кількох спеціалізованих шарів. Завдовжки детектор не менше 40 м, діаметр — 25 м. Важить він 7 тонн, і кожную точку всередині цього гіганта треба знати з точністю до 10 мікрон. Спеціалізовані детектори нашаровуються починаючи з точки взаємодії. Спершу траектограф відтворює сліди, відштовхуючись від схем і відстежуючи прохід заряджених частинок із точністю до 20 мікрон. Потім приходить черга двох калориметрів — спершу електромагнітного, згодом адронного. Нарешті, довкола діє система, здатна дуже точно фіксувати сліди мюонів.

АТЛАС зведено в гігантській підземній печері. Проєкт розпочався двадцять років тому. Після введення в дію він пропрацює принаймні десять років — дві тисячі фізиків вивчатимуть зібрані дані. Гігантизм, невтоленність — принципи фізики частинок нагадують правила зведення середньовічних соборів. Одне покоління вірян працює над кресленням, наступне — над самою будівлею, а третє вже користується спорудою, продовжуючи її прикрашати. Є чимало прикладів соборів, що так і не були завершені через занадто амбітний первісний задум: часом після кількох століть вагань фасад у стилі класицизму тиснуть до готичних хорів, а іноді соборові бракує цілої вежі. У фізиці, звісна річ, прилад має бути цілим від самого початку, інакше загадки не буде розкрито, але якщо порівнювати спільність зусиль, то процеси — дуже подібні.

Важлива несподіванка

Сьогодні ми бачимо деталі структури матерії у сто мільйонів разів ближче, ніж сто років тому. Отже, праця фізиків принесла свої плоди. Проте дехто ставить

запитання, чи це «свято життя» справді добігло кінця? Фізики кинулися «святкувати» з неймовірним завзяттям — звичайно, кожному хочеться, аби «свято» тривало далі, проте насправді майбутнє лежить у тумані.

Великі надії покладаються на ЛНС. Саме його завдання відкрити частинку, яка виконуватиме функції бозона Гітза. Саме він повинен продовжити історію Стандартної моделі — і завершити її. Чи зможе новий прилад вказати напрямки розвитку нової фізики, що дозволить зробити стрибок уперед? Побачимо.

А поки там що, низка фізиків уже давно повернулися до спостережень за небом. Фізика частинок є спадкоємицею не тільки ядерної фізики, а й фізики космічного проміння. У 1990-х роках почалося зменшення кількості експериментів на прискорювачах, а наукові групи, навпаки, більшали, дехто звертав увагу на природне випромінювання, аби мати змогу здійснювати простіші експерименти. Так з'явилася галузь, що дістала назву фізики космічних променів або зоряних частинок. Це — оновлене дослідження частинок, що доходять до нас із невідомих космічних джерел. Мотивації досліджень різні: пошуки нових джерел високих енергій, вивчення поведінки частинок під час перетину величезних просторів, аналіз властивостей частинок, утворених в умовах енергії, що їх неможливо досягнути на Землі.

Фізика космічних променів шукає джерела частинок у небі, зірки, які випромінюють протони високих енергій, або нейтрино, а про гравітаційні хвилі годі й казати. Заявки на відкриття вже робилися, але не знайшли підтвердженень. Повернення частини наукової спільноти до космічних променів збагатило галузь досвідом, отриманим на прискорювачах. Зокрема, фізики-емігранти застосували методи, вдосконалені в лабораторіях, і промислові технології для спорудження приладів, які змагалися в розмірах і, звичайно, в ціні з експериментами на прискорювачах.

Скажімо, обсерваторія ім. П'єра Оже в аргентинській пампі використовує близько 1600 станцій, які охоплюють ділянку у 3000 км². Навіщо такі розміри? Бо тут також полюють на рідкісного звіра — сподіваються відкрити фізику нового стану. Вже виявили вірогідні протони енергією в кілька 10²⁰ еВ, що у сто мільйонів разів більше за енергію протонів LHC. Але, якщо LHC необхідно жити сотнями мільярдів протонів, тут промені просто з неба щільністю в одну частинку на 1 км² раз на століття. Тож 3000 км² — необхідна ціна за надію збирати кількадесят зразків на рік.

Фізика частинок пов'язана і з космологією, яка вивчає всі аспекти існування Всесвіту. Вважається, що після Великого вибуху залишилися «викопні» об'єкти, що заповнюють простір. Останніми роками спостерігається запаморочливий розвиток космології, дещо подібний до розвитку фізики частинок у 1970-х роках. Космологія ставить фундаментальні запитання та вимагає чимраз різноманітніших експериментів. Космологія і фізика частинок мають чимало спільного. Досліджувати взаємодії протонів енергій на LHC означає дошукуватися до умов, що панували у Всесвіті через 10⁻¹⁰ с після Великого вибуху. Зіткнення в LHC відтворюють мікроскопічний Великий вибух, що дозволяє обійти проблеми астрофізики.

Всесвіт — ніби фабрика з виробництва частинок. На самому початку температура — тобто енергія тоді ще вільних складників — була величезною. Такі умови уможливили явища, які нині, через зниження енергій, стали неможливими. Зокрема, Всесвіт поставив перед нами дві загадки, збагнути які дуже складно: прихованої маси і темної енергії.

Іронія полягає в тому, що звичайна матерія, яку ось уже сто років роздивляються з усіх боків, складає лише невеличку частину сучасного Всесвіту. Вона утворює всі земні та небесні об'єкти, а також десять тисяч мільярдів

мільярдів відомих нам зірок. Але все це — лише близько піввідсотка від загального обсягу Всесвіту. Звичайна матерія мала би пояснювати 4—5% маси Всесвіту, враховуючи великі хмари, виявити які нелегко, проте в яких регулярно формуються нові зірки. Навіть 5% — дуже мало. Нейтрини, враховуючи всі останні відкриття, складають також близько піввідсотка від маси.

Після ста років неймовірних зусиль нам досі незрозумілі 95% Всесвіту. Тепер заява лорда Кельвіна здається ще більш завчасною, ніж на початку вивчення частинок. Аби пояснити наше невігластво, варто залучити ще два невідомі складники.

Вже давно стоїть питання про приховану масу Всесвіту, що складає чверть від загальної маси. На рівні галактик — скажімо, нашої — вона являє себе у вигляді велетенських темних гало, які, втім, не випромінюють і лишаються невидимими. Зафіксувати їх можна лише завдяки гравітації. Явище гравітаційних лінз, нині доведено, підтверджує цю інформацію.

Найощадніша гіпотеза — присутність масивних частинок, які відчувають лише слабкі взаємодії (тобто на кшталт нейтрино, проте з масою, яка може у сто разів перевищувати масу протона). Шукають такі частинки приладами, розміщеними в підземних печерах в екстремальних надчутливих умовах; утім, поки що немає жодного результату.

Темна енергія — ще таємничіша. Нещодавно з'явилися експериментальні докази. Під час вивчення світла дуже віддалених наднових зірок складається враження, ніби Всесвіт потужно розширюється. Такий висновок вимагає присутності рідини, яка заповнювала би простір, але навіть теоретики не спромоглися ступити більш-менш правдоподібну модель.

Отже, є ще заділ у фундаментальній фізиці, але немає впевненості, що буде обрано найперспективніший напрямок у дару.

Зацікавленість науковців, як вагадло, може повернутися до LHC. Справді, якщо тут знайдуть сліди надсиметричних частинок, буде доведено існування найлегшої в сімействі частинки, нейтральної, чутливої лише до слабких взаємодій — вона могла би заступити масу, якої бракує. Та це — не єдине припущення теоретиків. Деякі пов'язують темну енергію з нейтрино, а отже, тут також є що вивчати.

Так іще раз буде подолано межу енергій, яка постійно відсувається. Як на LHC, так і у фізиці космічних променів розпочинається нова дослідницька кампанія. Сподіваємося, що результати будуть гідні витрачених зусиль.

Розділ другий

Мрії та дійсність: теоретична фізика

На початку цієї книжки, згадуючи молоді роки, Жорж Шарпак зізнався, що в ті часи захоплювався математикою. Згодом на запитання: «Якби Ви були кимось іншим, ким Ви хотіли би стати?» — Франсуа Вануччі наводить ще одне дивовижне зізнання Шарпака: «Фізиком-теоретиком». Теоретиком? Генератором задумів, що грається з законами фізики, крутиться навколо, аби роздивитися з усіх кутів і надихнутися їхніми формами, мов скульптор — невже він обрав би це? Втім, очевидно, що вчений лише зізнався у великій любові до фізики, у прагненні природного ладу, що являє себе у законах. Бути іншим і водночас собою, слідувати за своєю пристрастю, але переживати її інакше, споглядати після активних дій або ж діяти після тривалого споглядання — в цьому полягає мрія людини, що усвідомлює плин часу і сумує за тим, що довелося лишити край шляху. Кожна сторінка несе відбиток діяльності, винахідництва, проте ці скромні вияви норуву доводять, що він усвідомлює свою здатність бачити світ інакшим, не таким, до якого звик.

Я краще пізнав Шарпака, коли ми вдвох працювали над іншою книгою*. Складно одразу сказати, як розподілялись обов'язки, проте нам часто щастило доходити згоди, навіть відштовхуючись від протилежних позицій.

* Ідеться про книжку «Будьте науковцями, ставайте пророками» (Р., Odile Jacob, 2004).

Закони природи більшість уявляє ніби зачиненими в якомусь палаці, а він — видатний експериментатор — ніби бачив їх на стіні у вигляді довжелезних орнаментів-арабесок із рівнянь, прекрасніших за будь-який витвір живопису. Науку ми змальовували як дослідження позалюдського світу, неймовірно розлогого, що простягнувся як у далекі простори Всесвіту, так і всередині атомів — аж до частинок, атомів, світу, що вибухнув двома нескінченностями Паскаля⁵¹. Ми писали, що є люди, які вивчають ці дикі землі та звітують людству про свої відкриття, складають мапи. Позалюдський, надлюдський характер природи спонукає розум до споглядання — певно, саме цей поклик мав на увазі Шарпак, згадуючи про математику і теоретичну фізику ніби про обіцяний край. Можна сказати, що він згадує свого двійника, свою тінь — але тінь, позначену світлом; і саме про цей свій потяг він попросив згадати мене у книжці. Звичайно, зробити це майже неможливо, проте читачам не завадить зрозуміти, чого саме хотів він від цього розділу і що мав на увазі, заявляючи прямо: «Не можна мовчати, бо це прекрасно!»

Складно пояснити, чому закони природи, часто-густо приховані за щільними математичними зафонами, — прекрасні. Наскільки мені відомо, за це досі не брався жоден поет, за винятком Жака Пеллет'є дю Манса (1517—1582)⁵². У вірші-зверненні «до тих, хто засуджує математику», він посилався на два великі Ліхтарі та Бурлак, що мають різні «аспекти» — тоді ці слова легко знаходили місце в поезії, а нині груба фізична термінологія стала на перешкоді подібних спроб. Фізичні терміни надто шорсткі та малозрозумілі. Ще можна, скажімо, зрозуміти, що вираз «квантова механіка» приховує найглибше коріння законів природи або, якщо хочете, їхній стрижень. Варто зізнатися, що священне дерево Ітдрасиль зі скандинавської мітології, яке з'єднує твердь

з небесами — значно доступніший образ. А як образно пояснити вислів «рівняння Шредінгера»⁵³? Хто здатен з самої назви зрозуміти, що йдеться про первісну та основну форму будь-якої еволюції, будь-якого руху, будь-яких змін будь-чого? Прорікаючи всюдисутність часу та його плин, Геракліт Ефеський⁵⁴ одягав думку запальними словами, що спонукали людей мріяти, а бідолашне рівняння на таку пристрасність, на жаль, не здатне. І при цьому Геракліта називали Темним, а з того, що відомо про його погляди нині, зрозуміло, що він мав на увазі більше, ніж розуміли тогочасні слухачі. Чи існує спосіб привабливого опису наукової думки? Чесно кажучи, я шкодую, що не присвятив часу збиранню вражаючих порівнянь у мітології та езотеризмі, що рясніють спокусливими образами і де слова міняються радше поетичними чеснотами, ніж справжнім сенсом. Чудовий вступ до будь-якої теорії можна знайти, скажімо, у кабалістів, яким здавалося, ніби вони збагнули таємні задуми Божі, розкодувавши розташування літер гебрейської абетки у тексті Тори — кожна літера позначала також певне число, що перетворювало текст на загадкове довжелезне рівняння. За часів Піко делла Мірандоли⁵⁵ кабалу змішували з ідеями Платона, а проте, нині ми знаємо набагато більше за нього, та ось слів нам бракує.

Де мешкає Прекрасне?

Гебрейська мова фізики — це математика, адже коли хочеш сформулювати закон, уникнути математики неможливо. Мова законів — суцільна математика, коли ж намагаєшся висловити їх інакше, звичайними словами, наражаєшся на брак, неприпустиму неоднозначність і розпливчастість. Насправді краса законів багато в чому

залежить саме від математичної форми, адже вона дозволяє миттєво висловити гармонійність і лад, що панують у природі. Один із найбільших мислителів ХХ ст. Поль Дірак⁵⁶ полюбляв казати, що самої лише краси закону або хоча б одного з його складників достатньо для підтвердження істини. Звичайно, ця думка не заперечує того факту, що наукова істина ґрунтується передусім на експериментальних явищах, які, зокрема, дозволяють підтвердити або спростувати теорію або думку. Дірак мав на увазі, що Істинне завжди поруч із Прекрасним. І для нього це не було котроюсь метафізичною формулою на кшталт тверджень Платона, який ототожнював Прекрасне з Благом — радше фактом, що його можна констатувати, поглянувши на історію науки, або відчувти, як це збагнули відкривачі на власному досвіді. Фізики вважають Дірака, — як і Айнштейна, — одним із найбільших естетів науки, і він, безперечно, з великим успіхом застосовував наведений вище принцип у всіх своїх працях.

Тож спробуймо й ми піти шляхом Дірака, аби краще збагнути, що саме він мав на увазі. Прикладів не бракує. Попередники Дірака наголошували на тісному зв'язку законів фізики і математики, а також на особливій гармонії їх поєднання. Можна процитувати Декарта, Ньютона, Ляйбніца, Гаусса, Фурньє та інших, ближчих у часі до нас. А втім, великі експериментатори завжди стриманіші, навіть якщо подумки згодні. Більшість із них дотримувалася думки, що математика — це лише зручна мова, здатна робити висновки; ніщо не підтверджує цю думку краще за деякі знамениті праці Ампера й Фарадея та їхніх сучасників⁵⁷: математична форма законів, відкритих ними, виходила просто з фактів, ніби цілком очевидний та абсолютно чистий продукт досвіду. Для «*La main à la pâte*»⁵⁸ просто ідеально, тож ці праці можна було би радити нашим учням до прочитання,

а досліди — до повторення. Отож, у першій половині XIX ст. вишуканість, експериментальність і формалізм математики ішли поруч.

Якщо повернутися до образу палацу Законів з вибагливим оздобленням стін, то можна уявити, що вхід до його історичного крила обступають зірки та планети. На одному зі штандартів — рядки Пеллетьє дю Манса, однак господарі палацу не наважилися відтворити обрахунки, красу яких він оспівував, а обмежилися кількома геометричними фігурами. Пеллетьє було 26 років, коли з'явилася книжка Коперника, де Сонцеві призначалося місце в осередді світу⁵⁹, тож дорого́ Діракові краса виявляла себе лише в простоті ідеї, а не в математичній формі. Зала Ампера і Фарадея має інакший вигляд. В око впадають схеми дослідів, а на додаток на штандартах — математичне резюме результатів, щось на кшталт шпаргалки. Для викладу основної думки слів іще достатньо, тож деякі курси фізики у тодішній Політехнічній школі, розгорнуті в нішах цієї зали на найцікавіших сторінках, демонструють нам текст, звісно, суттєвий, але вже з нечисленними математичними символами. Отже, абстракція ще не була такою явною, як сьогодні.

Усе змінюється, як заходимо до наступної зали, присвяченої Максвеллові (1831—1879)⁶⁰. Цього разу всю стіну вкрито рівняннями, які панують в електродинаміці, впорядковуючи поведінку тісно пов'язаних полів — електричного і магнітного. У першому ряду — рівняння, писані рукою самого Максвелла. Їх вісім, кожне містить принаймні чотири терміни та кілька умовних позначень, проте дорого́ Діракові краса ще не така очевидна. Коментарі, залишені поруч на столах, переконують у неприємних наслідках цих рівнянь. Зокрема, йдеться про закон оптики, що пояснює світло як поєднання двох полів — електричного і магнітного, — що спільно

коливаються, а також про радіо, телебачення, всі ті сигнали, які пронизують нині простір. Славетна «фея Електрика». Втім, усе це доволі конкретні, експериментальні та практичні речі. Де ж оте потаємне Прекрасне, яке тішить Дірака і виправдує Шарпакову мрію?

Можливо, його варто пошукати в рівняннях, записаних трохи нижче. Їх лише чотири, вони коротші, ніж перші вісім, і містять менше знаків. Наш провідник пояснює, що це ті самі «рівняння Максвелла», але записані у спосіб, який прояснює деякі властивості простору, де поширюються поля. У цьому просторі мають значення всі первні, і всі напрямки тут тотожні, що, безперечно, додає йому вишуканості. Нижче бачимо ще два рівняння, дуже лаконічні та майже однакові. «А це що таке?», — питаємо ми. «Ті самі формули, — відповідає супровідник, — але записані лише тоді, як з'ясувався тісний зв'язок законів Максвелла з теорією відносності Айнштайна. Компактна форма викликана тим, що закони електродинаміки лишаються незмінними, всюди і завжди, в будь-якій точці часопростору». Тоді ми починаємо розуміти, яке Прекрасне мав на увазі Дірак. Це, передовсім, формальна краса, своєрідна елегантність, подібна до вишуканості висловів Рівароля чи вогнених сплесків поезії Рембо⁶¹, але при цьому і значно більше. Це — втілення когерентності, порівну розподіленої між усіма законами, когерентності, що тут постає у вигляді глибинної гармонії законів електродинаміки з правилом симетрії відносності між простором і часом.

Між симетрією та красою існує тісний зв'язок. У декоративному мистецтві та архітектурі класицистичний стиль часто звертався до симетрій та ігор із перспективою. Деякі форми сучасного мистецтва використали дрібні тріщини в цих симетриях, аби створити враження неочікуваних змін, себто присутності життя. Але ще від часів зародження математичної науки симетрії — або,

іншими словами, стабільність — були улюбленим напрямком досліджень учених. На думку Евкліда, пряма — це лінія, що «рівномірно тяжіє на всі свої точки», а коло і куля — бездоганні фігури, бо з усіх боків тотожні собі та ще й не заплямовані нескінченністю, як пряма. Саме тому траєкторії руху зірок були колами, вкладеними одне в одне. Симетрії, всюди і завжди симетрії — золотого перерізу та додавання сторін до прямокутника, а також упорядкованих твердих тіл Платона, які, як уважалося аж до Кеплера⁶², містять у собі лад світу Ідей та світу зірок. Завдяки математичній теорії груп, сформульованій 1830 р. Еварістом Галуа⁶³, з'явилося й загальноприйняте уявлення про симетрію; ця теорія вплинула на всі сучасні науки. Симетрія, група, вишуканість, гармонія, розумна простота — все це завжди є в комплексі. Так, Анрі Пуанкаре⁶⁴ відкрив більшу частину теорії відносності, досліджуючи, яка з груп, яка з симетрій мовчазно ховається за законами Максвелла. Розмаїття симетрій та когерентність законів.

Звичайно, є й протилежність гармонії. Найкраще її ілюструє відповідь, яку Гайнріх Герц (який експериментальним способом довів електромагнітну природу світла) дав слухачам, що запитали його, які фундаментальні принципи лежать в основі законів Максвелла. Він відповів приблизно так: «Окрім рівнянь, які втілюють ці закони, жодних принципів немає». Іншими словами, на певному ступені закони дуже далеко відходять від звичних слів і філософської думки. Їхні задуми та склад формалізуються, тобто на останній стадії пояснити їх можна лише мовою математики. Легендарна відповідь Герца датується не пізніше 1894 р. (це рік його смерті), а дві опори сучасних наукових законів — відносність і квантова механіка — з'явилися, відповідно, аж у 1905 та 1925—1926 рр., повністю підтвердивши твердження вченого. Адже ці дві фундаментальні теорії — всесвіт-

нього вмістилища, що складається з часу і простору, та всесвітнього вмісту, складеного з частинок і променів — найформальніші з-поміж усіх. Можна ще раз повернутися до твердження Герца і зауважити, що нині існує простий принцип, з якого легко вивести рівняння Максвелла: світло складається з фотонів, частинок із нульовою масою та спіном 1. Це зауваження посідає почесне місце в Палаці Законів, утім, воно є дещо наївним, адже уявлення про нульову масу має сенс лише у зв'язку з теорією відносності, а уявлення про спін передбачає обізнаність у квантовій механіці. Отже, хоч би що ми робили, сучасна наука в самій своїй основі вкрай формалізувалась і вимагає змагання двох тісно пов'язаних команд: експериментаторів і теоретиків. Звідси й мрії про інший шлях, що їх плекає кожен член такої команди: одні прагнуть наблизитися до дійсності, інші — до суті, але для цього слід прожити стільки ж, скільки пощастило героєві п'єси Джорджа Бернарда Шоу «Повернення до Мафусаїла», де людське життя триває триста років⁶⁵. Одначе такі випадки, як відомо, вкрай рідкісні.

Гора Аналог

Найбільшим відкриттям початку ХХ ст. стало відкриття атома — універсального складника всього, що існує довкола нас. «Цибулину» матерії помалу-малу роздягали, дошукуючись численних рівнів сутності, за висловом класичної філософії. Сутність «атом» переділялася на дві тонші сутності — електрон і ядро. Так було у 1911 р. А в 1930-х роках з'ясувалося, що ядра складаються з двох елементарних сутностей або ж із двох різновидів частинок — протонів і нейтронів. У 1970—1980-х роках прийшли до створення Стандартної моделі, описаної

Франсуа Вануччі в попередньому розділі; Стандартна модель містила кварки, лептони та вектори — частинки, які «первозять» взаємодії (сильні, слабкі та електромагнітні). Дух захоплювало від цього занурення в саме серце матерії! Проте всі частинки — звичайні (скажімо, електрони, які «оживлюють» телевізор) або окультні (себто загадкові, практично недосяжні, на кшталт кварків) — лише піони у грандіозній фізичній грі. Без правил гри — тобто без законів — вони безпорадні. Перефразовуючи відомий шкільний вислів, можна сказати, що досвід, подібно до Жана Расіна, вказує на реальну сутність, а теорія, достоту П'єр Корнель, показує, якою ця сутність могла би бути⁶⁶.

Про результати теоретичних досліджень розповісти складніше, ніж про практичний експеримент — останній на перший погляд простий: «цеглини», нашарування «цеглин», що сходинками спускаються від атома до ядер, а далі до протонів і кварків, начебто нічого складного. Проте опис теорії — справді «корнелівська» проблема, адже там усе проходить через надскладні математичні формули, що їх ми не будемо переказувати тут. Хоча саме в них міститься Прекрасне. Що ж робити? На щастя, для переказування дуже складного або серйозного сюжету є дуже просте випробуване старе рішення — міт, казка, що дозволяє сказати все, закликавши уяву. Що ж, так і зробимо. Образ запозичмо у Рене Домалє (1908—1944) — письменника, який змалював свій внутрішній шлях у вигляді сходження на крутий схил «гори Аналог»⁶⁷; сходження, яке в нашому випадку приведе до квантових законів і Стандартної моделі та не відхилитиметься від історії науки.

Назва гори — Аналог — пояснюється відстанню, що її сучасна фізика встановила між конкретною дійсністю і законами. Експериментальна фізика дозволяє отримати однозначні числові дані, одначе лише за допомоги

апаратів, розміри і складність яких прямо залежать від того, щоби саме вивчається. З одного боку, маємо атом або щось менше за атом, з іншого — розумну машину, напхану надсучасним обладнанням: це ніби роздивлятися горобця з носу велетенського літака. Результат, звісна річ, точно визначено, але він украй незначний, і, зрештою, експериментальне спостереження що далі, то дає нам менше. Доводиться повертатися до теорії відновлення загальної картини, проте робота для цього потрібна колосальна. Треба не лише поєднати дві незрівнянні величини — горобця-атом і літак-апарат, — а й повністю перейти до світу, де немає нічого знайомого, до світу квантів, де інтуїція зраджує нас, а слова не здатні передати послання. Це — інший світ, світ ієрогліфів, переклад яких звичайними словами скидається на абсурд. Саме тому ми обираємо Аналог — адже цей образ допомагає переказати світобудову під кутом зору квантової теорії у формі міту, не вдаючись до математичних структур.

Експерсія до світу квантових законів починається у 1900—1913 рр. Тоді ніхто не сумнівався у класичній фізиці, яка, за словами лорда Кельвіна, завершилася. Її уявляли як щось пласке, викладене товстими плитами — шлях, який дозволяв безперешкодно дістатися гори Аналог, загубленої в туманах. Уважалося, що атом теж повинен підкоритися класичним законам, а ми додали би до них кілька уточнень відповідно до його розмірів. Спершу на те вийшло. Успішно побудували дві паралельні фізичні системи. Перед очима був приклад вібратора — «гармонійного осцилятора», що його можна було знайти у вібраціях світла або кристала. Був і атом водню, що його можна було представити як мікроскопічну планетну систему, де замість сонця — ядро, замість планети — електрон, а сила електричного притягнення заступала гравітацію. Наслідки, що їх можна було порівняти дослідним способом, були досить переконливі,

тож шлях тоді торували такі провідники, як Макс Планк, Айнштайн і Нільс Бор⁶⁸.

Ми вже знаємо, що було далі, тож цей початок нас ошелешує. Ми знаємо, що насправді класичну фізику — щось сприймане як пласке — від квантових мурів гори Аналог відділяє справжня прірва, до якої ми ще повернемось. Перейти цю безодню можна лише двома містками, де її краї — класичний і квантовий — зближуються, мов ключ і замкова щілина. Без цієї особливості, без цього шансу, досі належно не оціненого, довелось би століттями блукати, так і не наблизившись до схилів гори Аналог, пізнавши лише кілька відблисків світу квантів. Тут варто процитувати Айнштайна, який любляв вражаючі формулювання: «Бог вигадливий, але не злий». Іншими словами, Бог — або сама природа — прокладає нечисленні містки для невпевнених кроків шукачів його законів.

Між 1913 і 1925 роками сходження не зазнало різких змін, принаймні те, що ми бачимо, нічого не змінило. Науковці дибали традиційним шляхом, і якщо й з'являвся якийсь прогрес, то заводив у глухий кут. Аж раптом Бор запропонував інший, сміливий шлях: відмовитися від упевненості класичного схилу та рушити стежками крізь цілковито невідомі місця. Айнштайн невдоволено супитьсь, спершу не наважуючись відмовитися від традиційних переконань, омитих властивою йому реалістичною філософією. Проте вперед кидаються молодші вчені. Запам'яталися імена двох перших сміливців — Вернер Гайзенберг⁶⁹ та Ервін Шредінгер, — які відкрили два близькі шляхи: перший 1925 р., а другий — 1926 р. За два роки постав цілком новий світ — світ нечуваних, химерних квантових законів, і досі всі дослідження доводять лише їхню нездоланну загадковість. Частково туманний квантовий пейзаж вияснюється, та лише для тих, хто звикся з його висотами, проте й вони досі не в змозі заповнити кілька лакун.

У 1927 р. почалося дослідження навколишніх полонин, до яких вели щойно відкриті стежки. Поле застосування виявилось величезним: підґрунтя атомної фізики і хімії об'єдналися, і все, що досі ревно оберігало свої таємниці — провідність, властивості ізолюючих речовин, магнетизм, твердість, — склало зброю. Насправді список дуже довгий і містить усе, що нині називають «новітніми технологіями». Звісно, Рабле чи Реймон Кено⁷⁰ склали би значно сенсаційніші списки, але ми тут не для того, щоби хвалитися, — ми прямуємо до головного піку, що височіє над родючими зонами.

Його можна було би назвати «піком Див» — проте в казках на охороні див стоять небезпечні створіння. Дракони, озера, повні фей, болота забуття, провалля, в'язниці, сповнені помилок, домовини ідей, що до життя непридатні — словом, усе, що із зародку світу опирається пошукам Граалю, хоч би яким він був. Нижче перерахуємо лише кілька.

Небуденні ідеї та межі можливого

В індійському епосі «Магабгарата» боги насолоджуються виступом апсар — богорівних танцівниць, гнучких, мов полум'я. Коли одна з них перекидається на статую, стає помітно, що її форми — вічні, себто напрочуд різноманітні. Робота хвилі подібна до апсари — вона невловима, бо записана вигаданими числами, та рухлива, адже коливається, мов сине світло в основі племінця; вона витанцьовує неблаганним рівнянням — славетним рівнянням Шредінґера.

Звичні фізичні величини — суворі межові стовпи, що визначали напрямки класичної фізики Кельвіна: енергія, розташування об'єкта, швидкість, сила, що діє на нього, прагнення до обертання, назване спіном, — також подіб-

ні до апсар. Деякі теоретики зображали сукупність цих величин у вигляді велетенських прямокутників, укритих цифрами — матриць; інші втілювали їх у математичні механізми — змішувачі хвильових функцій, названі операторами. Такий оператор приймає одну хвильову функцію та утворює з неї іншу, у більшості випадків протилежну; незрозуміло, що пов'язує оператора з таблицею з цифр і реальними фізичними величинами, хоча прискіпливий розгляд цієї теорії доводить незаперечність такого методу.

Ми розглянемо не найбільш абстрактні риси концепцій, а тривожну незвичність цих ідей, яка лише підкреслює їхню глибину. Вони змінили обличчя науки, що впродовж багатьох століть намагалася бути розсудливою, вивершуючись, мов дивний самородок — наполовину ніжна цнотливиця, наполовину похмура дуенья. Відкриття квантових законів збурило науку, адже вони суперечили здоровому глуздові. Вони не стали логічним вивершенням раціональної конструкції як ті, що їх Ньютон, Ампер і Фарадей виснували з експерименту та дбайливо очистили — ні, вони скидалися радше на наслідки відчайдушної втечі до пливких берегів, коли все, що здавалося розумним, зазнало краху. Згодом теоретики не раз за звичкою жартували, що надто раціональна думка щонайпевніше є хибною, бо вона недостатньо божевільна, щоби накинути себе. Нас оточують справжні дивовижі: негативні енергії рівняння Дірака, кварки, що ділять електричні заряди на три групи та вдягнені у три різні кольори, бозон Гігґза, що виникає в будь-якій точці та ділиться масою з іншими частинками, ніби підживлює їх. Нині нам відомо, що нейтрино, перетворюючись десь між Землею та Сонцем, змінюють ідентичність, що невловима темна матерія справді існує, що частинки перетворюються на струни, коли часопростір замикається в окультних розмірах

лише для того, щоби загальна теорія відносності відповідала квантовим законам — скільки ще вражаючих ідей чекають на нас і на своє підтвердження!

Часом це справді неймовірні ідеї. Іноді вони навіть частково підтверджують відомий вислів святого Августина «Я вірю в те, що є абсурдом»⁷¹ — проте не «тому, що це абсурд», непідвладний мудрості людей. Навпаки, причина в тому, що абсурд лише на перший погляд здається абсурдом, приховуючи насправді глибинну гармонію, яка цілком відповідає природному ладові, що його людина лише вчиться пізнавати.

За приклад візьму вже згадане рівняння Шредінгера. Його визначають як закон, що керує рухом речей, хоча насправді це лише трохи дивна формула, вигадана для пояснення руху хвильових функцій. Авжеж, саме вигадана, а не виведена завдяки інтуїції або досліду. До того ж вона спирається на інше припущення — хвильову функцію, також не виведену в результаті експерименту*.

Річард Фейнман⁷² — можливо, найбільший теоретик другої половини ХХ ст. — дав цим концепціям глибоке тлумачення, яке ми перекажемо в загальних рисах. Уявімо атом водню як простий об'єкт. Він має ядро — протон, яке задля зручності вважатимемо нерухомим. Окрім ядра, є лише один електрон, тобто частинка з маленькою масою та негативним зарядом, здатна відчувати притягнення позитивно зарядженим протоном. Коли 1911 р. Ернест Резерфорд відкрив відносно просту структуру водню, то одразу зметиковав, що вона тотожна планетній системі, де протон грає роль Сонця, а електрон — єдиної планети. Оскільки електрична сила між двома зарядами дуже нагадує силу тяжіння між двома тілами, здавалося очевидним, що електрон мусить

* Значення, яких набуває хвильова функція, насправді є комплексними числами (відомими також як уявні числа), що їх не можна отримати в ході експерименту.

підкоритися законам класичної динаміки та рухатися еліптичною траєкторією. А й справді, що може бути простішим! І водночас — немає нічого більш хибного.

Пройдімося основними етапами: Нільс Бор «квантифікував» еліптичні траєкторії електрона в 1913 р. Спершу був успіх, потім — гірке розчарування, згодом, 1923 р., Луї де Бролі висунув ідею про існування хвильової функції, а 1926 р. Шредінгер сформулював її. Авжеж, поява рівняння мала грандіозні наслідки, повністю відповідаючи результатам експериментів, проте що означала ця формула? Лише 1948 р. Фейнман нарешті запропонував щось таке, що дало нам уявлення про рівняння і пролило нове світло на багатства, закладені у водні. Уявімо, що певної миті електрон займає певну позицію і починає рухатися. Слід визнати, що цей рух має мало спільного зі спокійним еліптичним пересуванням — навпаки, він вільний, не знає ні правил, ні перешкод. Електрон гасає, підлітає до ядра, відлітає, зупиняється, знову рушає — ніби вивчає всі можливі напрямки руху. Тож варіанти є різні: можна припустити, що лише одна траєкторія є справжньою, а всі інші — лише віртуальні. Але всі вони присутні одночасно, тож основа квантових законів значацька постає як сполучення всіх можливих варіантів, досліджених разом і одночасно, й абсолютно вільно.

Прихована гармонія

Встановлення панування теорії відносності та квантової механіки — двох підпор сучасної фізики та найважливіших відкриттів ХХ ст. — відбувалося не без проблем. Не забарилися критики і злостивці, валом повалили спростування, часом дуже їдкі, та пасквілі — нині все це припадає пилом у бібліотеках. Критикували навіть видатні вчені, — скажімо, Ніцше заявив, буцімто жоден

серйозний науковець не вірить в існування атомів, лише за кілька років до того, як експерименти Жана Перрена довели існування частинок⁷³, а Бергсон вірив, буцім йому поталанило проаналізувати і спростувати Айнштайнові міркування про час. Це вже не кажучи про нападки на «юдейську науку» та ядучі памфлети традиціоністів, які захищали «справжню науку» від шарлатанів. Деякі статті тішили слух — як, скажімо, передмови до трактатів Жоржа Буасса, фізика-поліглота і переконаного традиціоніста⁷⁴. Він мав неабиякий хист до суперечок і з легкістю розкодовував будь-які ідеї, не зачіпаючи при цьому живих людей. Марно в СРСР адепти діалектичного матеріалізму доводили безглуздість квантів, що нібито заперечували існування водночас і матерії, і діалектики.

Сьогодні весь цей лемент ущух, наука знову піднялася на п'єдестал. Критики втомилися програвати, а здоровий глузд утратив надію бути почутим. Тож треба віддати належне Річардові Фейнману, який наважився заявити, що король таки голий і «насправді ніхто не розуміє квантової механіки»*, а потім спробував проаналізувати цю, щонайменше, дивну ситуацію.

Чому фізики вірять у свою науку? На те є чимало причин, і перша — це дослід. Дослідники-практики — найкращі захисники теорії, адже вони докладають значних зусиль для перевірки прогнозів; щоби розширити доказову базу та зменшити кількість похибок, вони знаходять і вдосконалюють дедалі потужніші й точніші знаряддя — доходить до узгодження різниці між прогнозом теорії та обрахунками практики до десяти цифр після коми! Нашарування даних і систематичне їх узгодження з теоретичними обрахунками мають незаперечний накопичувальний ефект, стійкий до будь-яких сумнівів. Вони безпосередньо впливають на наше життя — скажімо, кожен чув, що орієнтування

* Richard Feynman, *The Character of Physical Law* (1964).

за GPS не було би таким точним без урахування теорії відносності. Ту саму роль відіграє квантова механіка для роботи атомних годинників на супутниках та в багатьох інших випадках застосування. Тож навіть такий брутальний аргумент, як «це добре, бо воно працює», тут цілком на своєму місці.

Не менш загадковими є релятивістські та квантові концепції, але колись не меншою загадкою вважались концепції електричного та магнітного полів, а також припущення, ніби вони можуть спільно коливатися. Можливо, є певний рівень абстракції, переступити через який складно, — і тут також внесок практиків складно перебільшити. Вже більше тридцяти років більшу частину своїх зусиль вони витрачають на виправдання квантових концепцій, примушуючи їх безпосередньо являти себе в ході експерименту. Вони спонукають фотон виявити себе, спін — продемонструвати свої виверти; стає зрозумілішою і проблема зліпленості хвильових функцій, себто нерозривність деяких функцій, які описують певні частинки як єдине ціле. Словом, прикладів не бракує. Без жодних сумнівів, не за горами той час, коли офіційно зареєстровані експерименти, що їх кожен може побачити в наукових музеях, примусять усіх змиритися з очевидністю квантових концепцій і погодитися: «Це істина, бо я це бачу».

Теоретиків уже давно переконав інший аргумент, який зачепив найтоншу струну — почуття прекрасного. Прекрасне постало у вигляді гармонії концепцій або ж, якщо хочете, їх когерентності. Коли йдеться, скажімо, про розмаїття напрямків руху електрона, то показати цю когерентність можна так: чітко прописати всі доповнення і проблеми, які виникали в ході історії електрона та впливали на хвильову функцію атома — і гоп! одним майстерним рухом виписується традиційне рівняння Шредингера. Теорію нахилиють під іншим кутом, роз-

дивляються в дещо іншому математичному світлі — і одразу проступають матриці, оператори — змішувачі хвильових функцій та їхні потужні математичні властивості; таке враження, ніби йдеться про чисту алгебру. Слідом за Діраком і математиком Нойманном можна в одному «математичному діаманті» об'єднати все, пов'язане з хвильовими функціями та фізичними величинами, утворивши складний необмежений векторний простір — простір Гільберта, де все замкнене всередині одного зблиску. Як сказав би Бодлер, «там розкіш, і спокій, і лад»⁷⁵. Але розкоші, спокій, втіху замінімо на безтурботність і гармонію. І це прекрасно, бо неминуче, і йдеться саме про внутрішню красу — стійку й прозору, мов діамант, про красу чисто математичну, що залишає враження, ніби коріння законів природи та математичних законів сплітаються десь глибоко під землею. «Це істинне, бо єдине. Істина в єдності».

Теоретики, які обожнюють абстрактну красу, радіють прихованим гармоніям. Годинами, місяцями, роками, життями можуть вони стежити за розвитком концепції, слідувати за нею лабіринтами фізики, мов за ручаєм, що стрімко метляє-цідиться між скель. Вони відчують справжній екстаз. «Ти помітив, наскільки вишукана теорія груп? А ідея перенормування? Які можливості! Це ж справжня машина, що висвердлює безконечність! А наскільки гармонійний вигляд має теорія еталонів! Яка в ній симетрія — у кожній цятці часопростору! А потім усі ці симетрії поєднуються в єдину гармонію Стандартної моделі... [Зітхає.] Оце означення «стандартна»... Колего, Вам не здається, що занадто скромна назва лише підкреслює бездоганність моделі? Теоретики — подібно до парнасців, прихильників мистецтва заради мистецтва, — шкодують, що не можуть розділити свої радощі з профаном, не тому, що він не здатен зрозуміти приступне їм відчуття прекрасного, а тому, що його

просто не можна посвячувати в таємниці. Подейкують, усвідомлення цього настільки гнітить їх, що вони зачинаються у своїх безлюдних клубах для обраних».

Але це лише жартівливий відступ, самоіронія, адже не варто лишати брудні сліди у священному храмі. Авжеж, теоретики рідко всміхаються, проте тягар, який вони змушені нести, — справжній скарб. Треба сказати, що ХХ ст. було добою одкровень, коли закони природи частково поступилися своїми таємницями людству. Можна навіть потвердити, що людський розум уперше свідомо поглянув на власну історію, визнавши, що залежить від еволюції видів. Замість поводитися, мов цар, розум збагнув, що його розвиток довгий час обмежував думку, тримаючи її на однаковій відстані від безмежності Всесвіту та нескінченності мікросвіту. Весь час розум було замкнено в людині — у надто людському, надто простому, і саме надлюдська наука примусила його переступити межу.

Певно, саме тому здоровий глузд побоюється нового світу, який щойно постав — часом здається, ніби треба перемуровувати самі підвалини думки. Варто було би розповісти про титанічні зусилля, докладені впродовж сімдесяти п'яти років до зміни підвалин знання — насамперед ідеться про фундаментальні закони, релятивістські та квантові — заради пошуків основ звичайного розуму та його виправдання, заради розуміння когерентності світу. Так, можна було би розповісти, як класичний детермінізм, тобто каузальність, така близька Аристотелеві й Канту, виявилася лише припущенням, окремим прикладом квантового випадку, коли звичайні події розглядаються у збільшених розмірах. Можна було би показати, як математична форма законів дозволяє подолати явні суперечності завдяки вищій гармонії та чому очевидні парадокси теорії насправді містяться не в ній, а в нас.

Що ж до мене, то я завжди віддавав перевагу думкам, висновки з яких проливали світло на підвалини знання, книжкам, перша фраза в яких логічно вістила подальшу, циклічним поемам та їхнім чітким і вишуканим приспівам — скажімо, класичній баладі або наполегливим повторам малайського пантуму⁷⁶. Напевно, саме в цьому перевага теоретика: здатність бачити когерентність законів, піддаючи власний розум випробуванню їхнім світлом*. Тож, Жорже, і ви, шановні читачі, ласкаво прошу до світу шукачів істини. Тут навіть найдрібніший з клерків радо вітатиме вас і сприятиме пізнанню секретів природи в садку, де без ліку стежок.

* Саме такий досвід можна знайти в новій книжці того ж автора – «Одкровення законів природи» (Paris, Odile Jacob, 2008).

Частина третя

ГРОМАДЯНИН СВІТУ

Жорж Шарпак
За участі Річарда Л. Гарвіна

Розділ перший

Фізик і місто

Навіть коли дослідницька робота забирала в мене всі сили, я невтомно цікавився довколишнім світом, смертельними загрозами, яких побільшало з розвитком науки, жахливими наслідками політичних конвульсій. Впливало на це, безперечно, моє коріння та шлях, здійснений мною до фізики. Я завжди уважно стежив за політичним життям і намагався діяти згідно з нагальними потребами часу.

Наукова освіта

Велику частину життя я присвятив розшифруванню незмірно малого, а згодом — завдяки віковій й почесній — опинився у світі, який весь час змінювався. Родина, друзі, рідний край, наша прекрасна планета стали більш видимими, більш дотичними. Вийшовши з кокона чистої фізики — своєї лабораторії в ЦЕРНі, я зрозумів, що світ потребує більшої уваги. ЦЕРН — велетенський акваріум, населений кількома тисячами науковців з усього світу, позбавлених завдяки дотаціям матеріальних обмежень. І політичних також, адже навіть у найгірші моменти «холодної війни» між фізиками високих енергій зв'язки не переривались. Відсутність видимого військового чи економічного застосування знань цих людей дозволило

політикам зберегти цей місток між науковими елітами ворожих країн — місток, головною метою якого завжди було переконування наших колег, які потерпали від тоталітарних режимів, у демократичних ідеалах.

Починаючи з 1996 р. я докладав великих зусиль до реформування початкової наукової освіти. Завдяки Леонові Ледерману, який 1959 р. прийняв мене до ЦЕРНу і з яким мене пов'язують тривалі дружні стосунки, я встряг до цієї авантури разом із юрмою академіків, директорів шкіл і тисячами активістів — спільно ми звели систему, яка переживе нас і подолає кордони. Разом із П'єром Лена та Івом Кере ми детально розповіли про своє місце у цій пригоді*.

У 1992 р., незадовго до вручення мені Нобелівської премії, Ледерман запросив відвідати школу в гетто для чорношкірих в Чикаго. Там він керував лабораторією, яка конкурувала з ЦЕРНом, і намагався змінити навчальну програму 450 тисяч учнів початкових шкіл міста, застосувавши метод, що звався «Hands'on» — «Руки вгору» і який ми згодом назвали «La main à la pâte» — «Руки в тісті».

Було очевидно — метод творить дива. Діти — від 5 до 12 років — почувалися щасливими, прагнули знань, а вчителі тішилися взаєминами, які встановилися з класом, і вражаючою програмою. Ішлося не тільки про отримання наукових знань дітьми, а й про своєрідний їхній розподіл. Дуже важливу роль грали ретельно продуманий експеримент, в ході якого діти активно відкривали довколишній світ, а також спеціальні зошити, в яких викладалися поступові фази дослідження, і

* Розповідь про становлення французької групи «Руки в тісті» («La main à la pâte») можна знайти у книгах «Діти, дослідники і громадяни» (Р., Odile Jacob, 1996) та «Дитина і наука» (Р., Odile Jacob, 2005). На жаль, у цих працях не віддається належне роботі численних американських центрів.

спілкування дітей з невеличких дослідницьких груп зі звичайними класами.

Використані методи насправді не були чимось новим, щось подібне легко було знайти і у Франції, і за кордоном. Однак американці, усвідомлюючи загальний жалюгідний стан програм у своїх закладах початкової освіти, впродовж десятків років витрачали величезні кошти на вдосконалення системи. І пріоритет мала саме наукова освіта. Тож у деяких округах — здебільшого обраних через неймовірні злидні у школах — їм поталанило запровадити дієву стратегію, що сприяла амбітному реформуванню у національному масштабі.

Повернувшись із Чикаго, я вирішив поширити ці реформи і у Франції. За кілька місяців відбулися вибори, в результаті яких Міністерство освіти очолив Франсуа Бейру. Я зв'язався з міністром, і він начебто зацікавився. Домовилися про зустріч за участі Леона Ледермана. Згодом, у вересні 1994 р., міністр запросив нас узяти участь у випуску телешоу Жана-Марі Кавади «Хо́да століття», присвяченому освіті, і ми отримали можливість представити свої думки щодо важливості для дітей наукової освіти методом «Hands'on».

Вже не пам'ятаю ні того, як міністерством поширилися чутки про добре ставлення міністра до наших ідей, ні того, як встановився контакт із місцевими активістами, проте я впевнений в тому, що нам пощастило лобіювати відрядження чималої делегації з міністерства до Чикаго подивитися на роботу Ледермана.

Група складалася з П'єра Лена (астрофізика, голови Національного інституту педагогічних наук і члена Академії наук), Іва Кере (голови освітнього відділу Політехнічної школи, також члена Академії наук) і ще десятка осіб, яких я не знав. Миттєво складений звіт спричинив призначення дослідницької групи. Її члени вирушили до Сполучених Штатів за кілька тижнів до виборів 1996 р., внаслідок яких замість Франсуа Бейру

прийшов Клод Аллегр. Він в історії «Рук у тісті» відіграв вирішальну роль.

У 1993 р. в ЦЕРНі мене відвідав Робер Жерміне⁷⁷, який розповів про проблеми наукової освіти у школах для інженерів. Він намагався вирішити їх, запустивши навчальну програму у щойно відкритій Гірничій школі в м. Нант. Я не міг повідомити йому нічого конкретного. За плечима в мене вже була зустріч із Джеррі Пайном — викладачем фізики на першому курсі Калтеху (Caltech) — Каліфорнійського технологічного інституту, найпрестижнішого інженерного вишу Сполучених Штатів, розташованого в Пасадені. Мене вразив рівень викладання — програма спиралася на майстерно задумані експерименти. Та ще більше спантеличило мене, як професор і кілька його однодумців осучаснили викладання у звичайних початкових школах, що їх відвідувало 12 тисяч учнів, 90% яких жили за межею бідності.

Було залучено всі школи. Навчальний матеріал і підручники, що їх отримали вчителі, вражали якістю, простотою та зручністю для педагогів. Експеримент — так само, як і програма Ледермана, спирався на кошти, отримані від Національної наукової фундації. Особливу роль відіграла група, якою керувала Карен Ворт, із Кембриджа, де розташовані Гарвардський університет та Массачусетський технологічний інститут; ця група в Пасадені опрацювала письмові посібники та експериментальні матеріали. Я з подивом відзначив, що скопіювати підручники та інші матеріали нескладно, і при цьому у Сполучених Штатах на це можна отримати солідні кошти.

Робер Жерміне відвідав Калтех, надихнувся тамтешніми методами наукової освіти та спокусився експериментом Hands'on, у якому брало участь близько ста учнів-інженерів. Щороку багато годин вони присвячували

допомозі вчителям з експериментальним знаряддям у класах.

Саме тому Гірнична школа в Нанті відіграла значну роль у запуску «Рук у тісті» (ця назва — вільний переклад англійського Hands'on) в області Луара-Атлантика. Її студенти та викладачі доклалися до виготовлення та застосування навчального матеріалу. Вони співпрацювали з педагогами з м. Воз-ан-Велен, розробляючи нові матеріали. Йшлося про загальний пакет, що мав забезпечити методові швидкий успіх, бо дозволяв значно збільшити кількість класів, де його можна було застосувати. Легше знайти необхідні кошти для купівлі готового матеріалу, ніж викладачів, яких захоплює метод і які мають на нього час.

Нант став символом симпатії, з якою виші — такі, як славетна Політехнічна школа — прийняли експеримент «Рук у тісті». Спільна робота педагогів стала одною з основ цього досліджу у Франції. Експеримент зробив значний внесок у реформування центрів підвищення кваліфікації, які зіграли велику роль у поширенні інформатії про реформу.

Активна життєва позиція

Я із завзяттям брав участь в акціях проти колоніальних війн і на захист радянських дисидентів на кшталт Юрія Орлова⁷⁸. Вирушив до Москви, щоб зустрітися з його рідними й друзями. Приводом для поїздки стала лекція в одній великій лабораторії ядерної фізики. Я здивувався, дізнавшись, що значна частина фізиків бойкотували мій семінар, бо вважали співпрацю з радянським керівництвом політичною помилкою, тоді кілька друзів Орлова запросили мене на підмосковну дачу, де відбулася зворушлива зустріч.

Проти ядерної зброї

Працюючи в ЦЕРНі, я приєднався до кампанії проти війни у В'єтнамі, а також, серед іншого, до відкритого листа американським науковцям, підписаного багатьма колегами. Проте я розчарувався у впливі різноманітних петицій, що їх мені весь час підсовували, на політичних керманичів.

Наприкінці 1970-х років я шукав способу сприяти обмеженню ядерних озброєнь і поліпшенню контролю за ними — навколо (і в Сполучених Штатах, і в Росії, і у Франції) діяли численні групи активістів.

У 1964 р. мене вразила американська стрічка «Доктор Стренджлав»⁷⁹, і тоді я відчув, що до широких верств варто звертатися мовою театру або кіно. Тож я написав кіносценарій, який мав розповісти французам про атомну війну у комедійній формі.

Я уявив генерала, командувача ядерної зброї, який відчуває зневагу до надмірної поміркованості французького війська і знаходить слабину. Залякавши всі озброєні країни Всесвіту перспективою серйозного скорочення озброєнь — як уже існуючих, так і тих, що були у процесі виготовлення, він примусив їх задіяти зброю.

Згодом я радо показав цей сценарій одному з керівників стратегічних сил Франції — він був приємно вражений, проте домовитися з великою продюсерською компанією не пощастило.

У 1980 р. мені поталанило зацікавити продюсерку з Нью-Йорка. Кілька тижнів я провів у Голлівуді, намагаючись продати сценарій. Приязні американці запропонували залишитися на цілий рік і допрацювати рукопис. Тож я вирішив вийти з гри.

Тоді я подумав, що найкращий спосіб брати участь у громадському житті — це розповсюджувати якомога більше інформації через ЗМІ.

Я відвідав одного дуже відомого актора, що якось висловився на телебаченні щодо «Зоряних війн», і після цього у 1984 р. ми обмінялися кількома листами.

«Любий Друже!

Дозвольте поділитися з Вами деякими міркуваннями.

Одного разу Ви з телеекрана мимохіть показали свій «колір»: висловилися щодо проблеми безробіття — дуже болючої для французів, зокрема для молоді. Авжеж, Вас складнощі не лякають, і я вітаю Вас із цим, бо партії, що прагнуть влади, навіть не натякають на якесь оновлення, хоча очевидно, що під загрозою загибелі суспільство рано чи пізно подолає проблему і що ресурси для цього є.

Друге, позицію щодо чого варто зайняти — унеможливлення ядерного конфлікту. Про це не думають ні французи, ні решта населення земної кулі, адже людей, позбавлених почуттів пропагандою та брехнею войовничих лобі, обсідають нагальні проблеми. Для політиків нарощування озброєнь — безпечні та необхідні сходи, що прямо ведуть до економічної рівноваги та політичних гараздів.

Як я писав у першому листі, після передачі про «Зоряні війни» я зрозумів, що Ви — щира людина — потрапили в тенета страшиного обману. Та оскільки Ви вже наважилися сказати, що король голий, пропоную Вам піти до кінця й не твердити, буцім на королі є труси! Проблема озброєнь швидко виявляє лінощі, підступи та безсилля політиканів. Я повинен Вас переконати!

Чи читали Ви тиждень тому в Herald Tribune, що винахідник рентгенівського лазера — головної зброї зоряних війн, винахід якої, подекують, привів до співпраці Едварда Теллера з Роналдом Рейганом⁸⁰ — щойно звільнився з лабораторії озброєнь у Ліверморі та отримав посаду викладача в Массачусетському технологічному інституті, в лабораторії, де військові дослідження заборонено?

Я переконаний: втечу його спричинили перекручені звіти про перші експерименти, де стверджувалося, буцімто він передбачив створення цієї зброї. Чудовий сценарій міг би вийти — обдарований юнак, блискучий музикант, композитор, який мріяв створити рентгенівський лазер для медичних потреб і якому пощастило знайти ідеальну формулу «променя смерті». Молодик, який для кожного смертельного спалаху скромно просив водневу бомбу, був у захопленні від фантастичних коштів, що опинились у його розпорядженні. Проте, зібравши рештки здорового глузду, він із гіркотою констатував, що його метод — нереалістичний, навіть якщо обіцяє неймовірний прибуток та об'єднує політичні кола.

Одразу спадає на думку історія з літаками-сопіями, якими вдалося обдурити політиків, що навчалися в Політехнічній школі, хоча це було очевидне шахрайство!

У Сполучених Штатах повно винахідників фантастичної зброї, ветеранів суперечки щодо контролю за ядерною зброєю СРСР. Одностайності серед них немає. Один член Академії наук повідомив мені, що неофіційне опитування показало, буцімто 99% академіків (а їх в Академії наук аж 1400 осіб) виступають проти «Зоряних війн». Джон Бардін (двічі лауреат Нобелівської премії), член наукового дорадчого комітету при Рейгані, звільнився одразу ж після промов президента, бо вважав, що тому просто начхати на світ! Комітет із контролю за озброєннями Академії наук відображає думку людей, об'єднаних високою компетентністю, і я хотів би, щоби про цю думку дізналася французька громадськість.

Отже, я резюмую те, що казав Вам під час зустрічі в Женеві:

— На кожному боці — ядерний арсенал, майже у 500 тисяч разів потужніший за бомбу, що впала на Хіросіму. Це забагато для будь-якої розумної військової

стратегії. І це — результат пухлиноподібного розвитку. Для захисту вистачило б і в сто разів меншої кількості зброї — в минулому так і було. До речі, це підтверджує хоча б висока обороноздатність французького війська — якщо вона варта довіри.

Значною мірою нарощуванням ядерного потенціалу завдячуємо тому фактові, що зброю призначено переважно для ураження першим же ударом зброї супротивника або ж для перехвату, якщо супротивник ударить першим.

— Європейцям варто остерігатися найбільше, адже вони мають «щастя» зберігати в Центральній Європі неймовірну кількість наземної бойової техніки (приблизно 11 тисяч ядерних боеголовок). Їх там стільки, що навіть генерал Роджерс — командувач силами НАТО — місяць тому заявив, що, на його думку, ракет удвічі більше, ніж треба, і необхідно якось позбутися половини. Цікаво, кого він намагається переконати? Хотів би я знати!

— Можливість зупинити, повністю або частково, ракету — це величезне наукове шахрайство. Якби таке було можливо, найслабший супротивник міг би з легкістю та за невисоку ціну подолати нарощення озброєнь, яке потребує чверті століття. Оскільки це неможливо, але при цьому цілком резонно думати, що за високу ціну можна зупинити 60—80% ракет, націлених на бункери, то достатньо уп'ятеро збільшити кількість ракет, аби нейтралізувати систему. Тоді з'явиться шанс збільшити потужність арсеналу до 2—3 мільйонів Хіросім!

Навіщо протестувати?

Після Чорнобиля та аварії «Челленджера» слід зневажати тих, хто стверджує, буцімто системи безпеки — бездоганні. Що системи секретніші, то складніше їх перевіряти. Системи ж військовиків антиядерники жодного разу не піддавали скрупульозній критиці. Що насправді ми знаємо про цих гнучких активістів?

Аби уникнути наслідків аварії з технічних або суто людських (божевілля?) причин, потрібна показна група відомих фахівців на рівні, достатньому для стримування від зайвих дій, людей, які не здатні натиснути кнопку.

Саме про це пише Річард Гарвін — видатний фізик, винахідник озброєнь і популярних систем безпеки, давній учасник російсько-американських експертних обговорень; він виступає за тривідсоткове скорочення стратегічних озброєнь.

Я дуже хочу, щоби Франція не замикалася на собі в обговоренні ядерного роззброєння і щоби французькі політики вели дискусію на рівні, зрозумілому насамперед для європейської молоді — скажімо, для німців. Бо як пояснити німцеві, навіщо ми розташовуємо ракети «Гадес» досяжністю 400 км, здатні «дістати» танкові дивізії росіян та зруйнувати німецькі міста? Єдине виправдання — наземні війська воліють мати власну ядерну зброю так само, як морські та повітряні сили. Хіба ні? Але ж ми повинні обговорювати це публічно, а не дозволяти приймати рішення політикам, перевантаженим відповідальністю перед лобі, які утримують монополію на наукові й технічні рішення. А обговорення могло би вийти цікаве: члени американського комітету виклали б свої міркування щодо впливу наукових відкриттів на ведення війн і розвіяли би міти щодо деяких «проблем». Члени ж американської (або французької) наукової спільноти могли б їм заперечити. Політики також обмінялися б аргументами.

Тоді ми дізналися, чому Міттеран і Ширак дотримуються різних поглядів щодо «зоряних війн». Звертаюся саме до Вас, бо, не будучи членом жодної партії, Ви могли би перебрати на себе ризик розпитати їх про все. Звичайно, для цього я повинен переконати Вас. Я стверджую,

що Гарвін та інші готові прибути до Парижа та обговорити свої міркування з фахівцями, яким Ви довіряєте.

*Щиро Ваш,
Ж.Ш.»*

Вже сам виклад думок у листі до Горбачова свідчить про моє прагнення брати активну участь в обговоренні питань, дотичних до ядерних озброєнь. Мій друг Гарвін запросив мене на кілька зібрань відомих особистостей, де йшлося про перспективи «Зоряних війн». Наступні рядки свідчать про мою тодішню позицію:

«(...) Варто також замислитися, як сприймати скупчення радянських танкових дивізіонів — ідеальної цілі для тактичної ядерної зброї, коли вони згруповані, та традиційної «розумної» зброї, коли розгруповані, — як свідомий крок чи як наслідок короткозорості радянської військової номенклатури, якій варто було би чинити інакше і на благо своєї держави, і задля власного збереження. І це при тому, що ризик агресії в Західній Європі дорівнює нулеві. У пана Горбачова — величезні можливості: він міг би обманути сподівання ворога, довівши військо та флот до рівня, гідного багатства його країни, а не мрій казкарів. Останні вигадують конфлікти, внаслідок яких прийде кінець нормального життя для всіх без винятку мешканців планети... окрім, напевно, увішаних нагородами бюрократів, надійно захищених у неприступних бункерах (...)»

Потрапивши до американської Академії наук, я брав участь у засіданнях, під час яких спілкувався з великими — але сліпими — вченими. Вражаюче зібрання схибнутих. Деякі науковці намагалися грати в ігри військовиків, на службу яким вони поставили свою компетенцію. Усе було надзвичайно двозначно.

Після отримання Нобелівської премії я неодноразово мав нагоду брати участь в обговореннях, обов'язків у мене побільшало. Часом відбувалися дуже жваві обміни думками. Я написав листа президентові.

«20 вересня 1993 року.

Шановний пане Президенте!

Вже не перший місяць я входжу до складу комітету з обговорення можливого вдосконалення ядерних озброєнь Франції. Я тішуся з нагоди збагатитися на знання, вислуховуючи аргументи, часом суперечливі, захисників різних можливих сценаріїв майбутнього.

Я вже торкався цих питань через зв'язки з членами Комітету з контролю за озброєннями при Академії наук Сполучених Штатів. Таким чином я міг узяти участь у пристрасних дебатах між прихильниками нестримного розвою різноманітних озброєнь — їх очолював Едвард Теллер — і тими, хто намагався стримати їхній вплив на президента США.

Серед останніх було чимало фізиків, які раніше самі зробили внесок у зміцнення американської військової потуги, а дехто продовжував діяльність у цьому напрямку. Траплялося, що з ними радилися політики, а комітет із питань збройних сил Сенату, яким керував тоді Лі Аспін, не соромився кликати їх як свідків під час вивчення деяких дуже недешевих проєктів, підтримуваних Пентагоном. Нерідко їхня думка виявлялася вирішальною, і від дорогих та безглуздох програм відмовлялися.

Мене дивує, що політики у Франції не звертаються до послуг фізиків! Адже вони могли би сказати своє слово під час прийняття важливих рішень на перспективу, не маючи дріб'язкових зацікавлень певних груп, які звичайно утривають ситуацію, що забезпечує їм вплив і пошану.

Дозволю собі звертатися до Вас винятково через важливість призначення — в такій ситуації — нового Головного комісара з атомної енергетики. Високий науковий статус повинен уберегти його від намагань різних груп впливу видати корпоративні інтереси за наукові або технічні доводи».

Розділ другий

Доба страху та сподівань

Історія зародження ядерної енергетики — мирної та військової — могла би заповнити не один грубий том. Нинішній її стан дуже різниться залежно від країни. Ми до деталей вдаватися не будемо. Просто пояснимо один крок — на наше переконання безпрецедентний — американської наукової спільноти.

Для виживання людства наука і техніка відіграють украй важливу роль, зважаючи на кількість людей на планеті, а також на епідемії, кліматичні зміни та інші явища, порятунку від яких може знайти тільки наука. Крім того, наука і техніка — головні знаряддя покращення умов життя людей, хоча складно припустити, що, не беручи до уваги нечисленні окремі спроби деяких суспільств поліпшити життя співгромадян, люди довгий час терпітимуть нинішній нерівномірний розподіл благ.

Звичайно, технології можна використати й на шкоду суспільству, хоча кожна терористична організація має якесь підкреслено альтруїстичне підґрунтя і не погоди-лась би з висловом «шкода суспільству». Інтернет, мобільні телефони, пластикова вибухівка та інфрачервоні детектори руху сміливо використовуються як руйнівні знаряддя людьми, які напоказ відкидають технології та догматичний розвиток науки, віддаючи перевагу традиціям.

Окрім конкретних поодиноких антисупільних вчинків, цілком можливим лишається використання зброї масового враження з терористичною метою або в міждержавних конфліктах. Під час «холодної війни» між Радянським Союзом і Сполученими Штатами усі боялися саме такого сценарію розвитку подій, кожна зі сторін стереглася, щоби друга не напала першою, а траплялися й такі, які знищення ворога прагнули більше, ніж власного порятунку.

Часто можна бачити, як держава здобувається на ядерну чи бактеріологічну зброю лише з метою стримування, тобто на випадок, якщо хтось нападе — щоби завадити потенційному ворогові знищити рідний край. Дієвість стримування передбачає, що держава прагне радше вціліти, ніж знищити супротивника, однак у ході «холодної війни» Сполученими Штатами ширилися чутки, буцімто радянські керівники не такі, як західні політики, що вони не дбають про порятунок населення і промисловості.

Сполучені Штати завели собі ядерну зброю під час Другої світової війни, остерігаючись появи ядерних озброєнь у Німеччини. Дві бомби, скинуті на японські міста, лишаються єдиним випадком використання ядерної зброї у військовий час, хоча тисячі бомб було випробувано — переважно у США та СРСР.

Американці доклали колосальних зусиль до розвою ядерних озброєнь: у часи Другої світової війни на галузь працювало близько 150 тисяч осіб. Тоді на її потреби використовувалося 15% електроенергії, що вироблялась у країні. Однак 2 млрд доларів — еквівалент нинішніх 23 млрд — проекту «Мангеттен», на які збудували бомби, скинуті в Японії, помилково розподіляють «по мільярду на бомбу». Ніхто не каже про фінансування «двійника» програми, а також виділення 2 млрд доларів на інші види озброєнь.

Розвиток ядерних озброєнь, звичайно, складно порівняти з розвитком інформаційних технологій, але він також має чим здивувати і відбувався одночасно з розвоєм промислових технологій. А придбання ядерних озброєнь полегшилося завдяки велетенському обсягові виробництва у мирній атомній галузі.

Після розпаду СРСР керівники Росії та Сполучених Штатів вважали неприпустимою навіть думку про те, що хтось намагатиметься знищити супротивника. Тож тактичні ядерні озброєння переважно втратили значення, зокрема у НАТО, почалося навіть скорочення стратегічних озброєнь. Нині ракетні бази від'єднано від систем оповіщення, а деякі навіть знищено, проте сама зброя нікуди не поділася, просто знята й лежить по складах.

Загальна потужність ядерних боєголовок Сполучених Штатів і Росії — близько 10 тисяч з кожного боку — від 100 до 500 кт, себто у 5—25 разів більша за потужність бомби, яка впала на Нагасакі. Крім того, цю зброю створено для ракет тривалістю польоту менше 30 хвилин. Складно уявити, що коли-небудь справді буде використано таку кількість зброї, адже ніхто вже не бере до уваги аргументи щодо доцільності її розповсюдження. У випадку застосування ця зброя знищила б не лише населення країн-цілей, а й більшу частину населення світу — або через руйнацію озонового шару, або через усесвітнє похолодання внаслідок величезної кількості сажі після пожеж, або ж ліквідацією міжнародної торгівлі. Це була би безпрецедентна катастрофа з неймовірними наслідками.

Окрім промислових технологій 1980—1990-х років, які значно спростили виготовлення ядерних озброєнь для конкретної нації або компанії, нині з'явилися інтернетні технології, що дозволяють групі науковців або зацікавлених осіб — які, втім, не пов'язані з терориз-

мом — здійснити всі технічні роботи. Отже, слідуючи інструкції, можна зібрати бомбу і випробувати її без вибуху. Тобто для збирання справжньої бомби потрібна дуже невелика кількість людей, при цьому ціллю може стати будь-яке місто; перевозити бомбу може літак, ракета або вантажівка.

До небезпеки накопичення зброї додамо розвиток інформаційних війн, що дозволяють країні або групі осіб нападати на системи контролю за ядерними озброєннями або заволодівати ними. Це призводить до каталітичної війни, коли якась третя країна бере під контроль зброю країни А, щоб використати її проти вірогідного супротивника, країни Б. Тоді країна Б нападає на країну А, може, й на інші країни. Каталітичну війну може спровокувати і напад із жертвами, здійснений ядерною чи біологічною зброєю з невідомого або сфальшованого пункту. Є угруповання — скажімо, міленарії, — які справді прагнуть кінця світу. Авжеж, їх небагато, проте скидати їх з рахунку не варто.

Словом, хоча щодо виготовлення «домашніх» ядерних бомб ходить чимало пліток, є й точні дані, тож єдина на сьогодні перешкода для бажаючих — доступ до збагаченого урану або плутонію.

Ми маємо цінний спадок від наших предків, які лише дванадцять тисяч років тому стомилися від мисливських блукань слідами дикого звіра та перетворилися на ратаїв, ремісників, пророків, богословів, любомудрів, будівничих, звіздарів, митців, мореплавців, які то доглядали за планетою, то шкодили їй. Ми успадкували від них гени, утворені впродовж мільйонів років еволюції, в ході якої вони набули агресивності, необхідної для виживання роду.

Проте ця риса не пристосована до тієї руйнівної потуги, яку наука поклала нам до рук. Звичайно, є чимало нагальних проблем, таких, як енергетика, вода, демогра-

фія, голод, епідемії та пандемії, але використання зброї масового ураження — реальна небезпека, всі складники якої — легко доступні. Саме це питання потребує щонайскорішого вирішення. Маємо чітко усвідомити: у протилежному випадку станемо свідками спопеління цілих суспільств, скарбів цивілізації, якими дорожимо і якими людство може пишатися. І ми знаємо, що нашу тривогу поділяє чимало видатних філософів, державних діячів і митців з багатьох країн.

Ми переживаємо зіткнення науки, яка розвивається з досі небаченою швидкістю, та суспільства, яке не бажає відмовлятися від застарілих способів мислення. Франція, здається, перебуває у привілейованому становищі завдяки розробленні стратегії, яка дозволить нам звести мури, необхідні для виживання нашої цивілізації.

У Франції є найсучасніші ядерні озброєння. Її стратегічне мислення частково застаріло — як і в решті подібних країн. Жоден сценарій не в змозі виправдати стратегію часів «холодної війни», коли сталінізм мав шанс на перемогу і багато хто вважав, що будь-які жертви виправдані заради перемоги над ним.

70 тисяч ядерних боеголовок, кожна з яких удесятеро потужніша за скинуті на Японію, свідчать про нерозсудливість відповідальних за цей арсенал та безвідповідальність політиків, які керували державами, найжаченими отруйним «скарбом».

Я — серед тих, хто вважає, що від ядерної енергії не слід відмовлятися, так само, як безглуздо відмовлятися від вогню. Для тих, хто засуджує недовомки своїх опонентів, які лише живлять страхи юрби, потреба в ній є очевидною. Натовп не здогадується про трагічний вибір, перед яким постануть його керманичі за тридцять років, коли людей на планеті стане на три мільярди більше.

Сьогодні кількість держав у клубі власниць ядерних озброєнь зростає.

Відтоді, як надпотужні держави ділилися зброєю, багато що змінилося. Світ став вразливішим. Достатньо однієї бомби, аби успішно шантажувати будь-яку могутню державу, що змушена захищати одне з місць, яке вважається надбанням людства, — скажімо, Венецію.

Складання правдоподібних катастрофічних сценаріїв — дитяча гра для біологів, фізиків, режисерів і терористів. Є лише один вихід — прибрати будь-які матеріали, які могли би бути використані для створення зброї.

На щастя, у Сполучених Штатах зрозуміли, що назріла потреба зміни поведінки всіх країн світу, здатних утримувати зброю масового ураження. Йдеться про радикальну зміну позиції країни, яка раніше вважала, що завжди матиме привілей посідати найбільший у світі ядерний арсенал.

Нарешті відчинилися двері для нової позиції всього людства. Лише тепер можна братися до головної проблеми: контролю глобалізованого світу за всіма ядерними озброєннями та всіма матеріалами, придатними для їх виготовлення.

Четверо впливових політиків, які раніше негативно реагували на будь-які пропозиції, що могли би похитнути першість Сполучених Штатів, нарешті подали знак. Їхні доводи зрозумілі: сьогодні немає сенсу утримувати ядерну зброю. Якщо ви отримуєте листа з повідомленням, що атомна бомба вибухнула на території, яку ви захищаєте, і що вас шантажує терористичне угруповання, ви не звертатиметеся до атомних підводних човнів та авіаносців. Вони не відіграють жодної ролі у попередженні мегатерористичної загрози на стадії зародку. Право на володіння зброєю лише для однієї країни перекреслює можливість найважливішого кроку. Усі країни, без винятку, повинні підлягати контролю через створення агенції з фінансуванням, значно більшим за фінансування Міжнародної агенції з питань атомної

енергетики зі штаб-квартирою у Відні — 250 млн євро на рік.

Дві нові обставини примушують нас діяти швидко: поява добре організованих груп терористів з коштами, достатніми для отримання потрібної зброї, та Голокост, який довів, що впродовж усього лише кількох років людство може згенерувати дисциплінованих убивць у кількості, достатній для винищення цілих народів.

Завдання вимагає сміливості, якої бракувало політикам минулих століть. Той, хто втягнув народ у масові вбивства, переконаний, що війна триватиме лише кілька тижнів, скоїв злочин проти людства — принаймні судячи за результатами двох світових війн.

Ми не маємо права дозволити спокусити себе вичікуванням. Воно може коштувати життя мільйонам осіб. Ідеться про кривавий підсумок одного року війни минулого століття. І ті, хто допомогли терористам масовим використанням зброї у спосіб створення нинішнього ядерного арсеналу, не більші чудовиська за тих, хто відмовлялися під час останніх війн від кривавих боїв і чий статуї прикрашають міста.

Наше століття зазнало надто стрімкого розвитку зброї масового винищення, винайденої наукою, та випробувало здатність людей влаштовувати масові вбивства. Свідками тому — Голокост і численні геноциди по всьому світу. Проблема не в більшій чи меншій кількості осіб, що їх групи з певними духовними відхиленнями планують убити, а у швидкості, з якої вони можуть це здійснити, і змінах, які відбуваються в людях під дією таких вчинків. Адже ми буквально кам'яніємо від жаху. Не віримо своїм очам, спостерігаючи, як люди обертаються на псів, якими легко маніпулювати.

Вирішити проблему можна, лише змінивши звичаї. Якщо нам трапляється група людей, які вирішили присвятити себе масовим убивствам за будь-яку ціну,

нехтуючи власним життям, ми повинні вислухати їх, аби зрозуміти, як їм таланить зібрати стільки адептів, і негайно знищити їх — достоту як винищували суперників Гітлера. Мусимо знайти серед них спільників і збагнути, як вони вплутались у таку халепу. І зрозуміємо, що змушені платити за зневагу до «зайвих» людей.

Тож привітаймо і заохотймо тих, хто вирішив вирушити у хрестовий похід проти ядерної зброї. Сміливе рішення групи американців варто приймати так само, як повітряну кулю у світі, що задихається від браку ідей.

Ті, хто сьогодні прагнуть нейтралізувати ядерну зброю — громадяни, які втілюють свій обов'язок на найвищих щаблях американської держави. Колишні держсекретарі Генрі Кіссінджер і Джордж Шульц, колишній сенатор Сем Нанн — він спеціалізувався на проблемах оборони, — колишній секретар із питань безпеки Вільям Перрі та жменька з сімнадцяти видатних науковців закликали до зміни американської позиції щодо проблем із ядерною зброєю. Вони влаштували збори, де обговорювалися питання, які постануть, якщо, не приведи Господи, бомба, подібна до тих, що зруйнували Хіросіму та Нагасакі, вибухне на вулиці одного з американських міст.

Адже умови, необхідні для знешкодження ядерного арсеналу, потребують реалістичного погляду. Доведеться спроектувати, обговорити і створити організацію, яка мала б усі необхідні важелі для того, щоби жодна країна не змогла уникнути нагляду або ж відмовитися втручатися. Цей заклад дозволить усім політикам отримувати інформацію, не викривлену групами впливу, які нині повністю контролюють деякі ЗМІ.

Франція повинна намагатися очолити рух із переконання та примусу всіх власників бомб і приєднатися до американців, якщо в них стане сил побороти лобі. Першим — дуже скромним — кроком стане створення

французької організації під егідою Академії наук; під час вільних обговорень нова установа мала би забезпечити інформацію, доступну для всіх громадян і політиків. Одна з останніх розвідок, виданих Академією наук (підписана Робером Дотре і Жаком Фріделем), доводить, що серед визначних науковців Франції, які належать до різних шкіл, існують розбіжності в поглядах на перероблення відходів атомної промисловості віком у кілька десятиріч. Це питання необхідно винести на зразкове публічне обговорення, адже узагальнення перероблення ядерних відходів може призвести до утворення матеріалів, що годяться для створення бомб, хоча початкова мета цілком невинна — відкрити шлях ширшому використанню атомних електростанцій.

Ми залишили позаду століття, що рясніє прикладами видатних полководців, не здатних передбачити очевидні стратегічні зміни. Сліпці-політики розв'язали війни, що призвели — в самому зародку сучасної європейської цивілізації — до десятків мільйонів жертв, страхітливих руйнувань і — що найгірше — до суспільних катаклізмів, які значно змінили поведінку людської істоти. Ми успадкували від них цілі юрмища, охоплені неконтрольованою ненавистю — плодом байдужого ставлення до страждань інших народів.

Проте жахіття минулого не зрівняються зі страхіттями, які стають можливими внаслідок невпинного потоку наукових відкриттів і знахідок, до яких слід додати існування потужних центрів безжального тероризму.

Завдяки Де Голлеві та рухові Опору Франція мала честь значною мірою сприяти падінню нацизму та відновленню демократії. З не меншою гідністю Франція візьме участь у знешкодженні ядерних сил, що загрожують майбутньому демократії. Досі не доведено, що цивілізований світ знайде сили чинити опір духовній руйнації, до якої неминуче призведе ядерна війна.

Найпотужніші країни з найсильнішими лобі, скоріше за все, звернуться до Франції задля здійснення амбітного проекту, необхідного для виживання.

Довіра людей до науки як засобу розв'язання проблем, що їх вона сама й спричиняє, вимагає негайного початку повного ядерного роззброєння! Велетенські суми і людські ресурси, які з'являться в результаті припинення виробництва ядерних озброєнь, дозволять вирішити інші глобальні проблеми.

Розділ третій

Сполучені Штати без ядерної зброї

Сполучені Штати були першою країною, яка створила ядерну зброю, та єдиною, що використала її з військовою метою. Я працював над цією зброєю з 1950-х років, зробив значний внесок у розроблення водневої бомби і ще більший — у технології, причетні до цього типу зброї. Я також брав участь у всіх акціях, метою яких було посилення контролю за зброєю, приклався і до пакту про повну заборону ядерних випробувань, і до втілення засобів верифікації застосування угод, що встановлювали контроль.

Я переконаний, що розповсюдження ядерних озброєнь, зокрема серед компаній, які діють поза законом, несе серйозну загрозу нашій цивілізації та що навіть одна-єдина бомба, скинута на велике місто на кшталт Нью-Йорка, Вашингтона чи Лондона, призведе до повного знищення всієї країни. Ми мусимо — байдуже, є в нас сили чи ні — у найближчі десять-двадцять років позбутися всіх ядерних озброєнь і вдатися до заходів задля захисту наших суспільств від занепаду, до якого призведе використання бомби терористами.

З 1988 р. я виступаю за скорочення тридцятитисячного арсеналу Сполучених Штатів і Радянського Союзу до однієї тисячі боеголовок. Нам пощастило домогтися значних скорочень, хоч я вважаю неоднозначним дозволений рівень «1700—2200 стратегічно необхід-

них ядерних боєголовок», встановлений до 31 грудня 2012 р., коли завершиться дія Московського пакту. А й справді, нині з кожного боку ми маємо близько шести тисяч боєголовок, і немає жодного обмежувального законодавчого акта.

Я помітив, що держави, які мають ядерну зброю, радше піклуються про її збереження, ніж переконують інші держави позбутися озброєнь, ніби збільшення арсеналу краще їх захистить. Насправді єдиний ефект ядерної зброї — це застереження, а для цього достатньо дуже незначної кількості. У Сполучених Штатах поширена думка, що, допоки в них зброї більше, ніж у Китаю, Індії, Пакистану, Ірану та Північної Кореї, спокій забезпечено. І це — хибна думка.

Звісно ж, американське ядерне лобі намагається зберегти чільну роль, перевагу своїх людських ресурсів та інфраструктуру. Впродовж останніх років було чимало спроб створення зброї нового покоління з єдиною, на моє переконання, метою — підтримати рівень кваліфікації працівників і «дух фірми». Йшлося, скажімо, про RNEP — «потужний ядерний підземний засіб» — ядерну бомбу-міну короткого радіуса дії, яка вибухає під землею. Нещодавно розробляли надійні головки-замінники RRW — вперше вони з'явилися 2000 р. як наконечники вагою «всього» в 5 кт., що мали замінити наконечники у 500 кт. завдяки технічно досконалішому механізму запуску та зменшенню сили вибуху, необхідної для знищення залізобетонної пускової шахти. Але розробляти нову зброю безглуздо, адже можна досягти тих самих результатів з уже існуючою термоядерною зброєю.

Від первісного задуму RRW відмовилися нібито тому, що національна агенція з ядерної безпеки NNSA хотіла створити лише два нові наконечники, щоб замінити W76 та W88. Та насправді річ у тім, що було встановлено: термін «життя» плутонієвих стрижнів становить від

вісімдесяти п'яти до більш ніж ста років, а отже, немає жодної потреби в їхній заміні впродовж наступних п'ятдесяти років.

Цілком зрозуміло, що політиці нерозповсюдження загрожує те, що Сполучені Штати не ратифікували пакту про повну заборону ядерних випробувань і що вони прагнуть регулярно створювати нові боеголовки. Якби вони почали різко зменшувати свій арсенал, їхні вимоги до інших держав мали би більш законний вигляд. І я переконаний, що це лише сприяло би безпеці держави.

Нещодавно, 13 квітня 2008 р., я брав участь у представленні нової доповіді — «У напрямку впевненої безпеки». Цей документ накреслює десять етапів плану з кардинального скорочення ядерного арсеналу та повного роззброєння.

1. Єдиною метою американських ядерних озброєнь визнати стримування та — за потреби — відповідь на використання ядерної зброї іншою державою.

2. Відкинути найменшу можливість використання ядерних озброєнь, змінивши технології розгортання — обробувати його у днях, а не у хвилинах.

3. Уникати заздалегідь визначених цілей, замінивши їх можливістю швидко відповідати на випадок застосування ядерної зброї проти Сполучених Штатів, їхніх збройних сил або їхніх союзників.

4. Якнайскоріше в односторонньому порядку зменшити американський ядерний арсенал до принаймні однієї тисячі боеголовок, рахуючи як уже розгорнуті, так і ті, що в запасі. Сполучені Штати повинні оголосити всі інші боеголовки надлишковими, перемістити їх до складів, почати прозору процедуру дезактивацію за участі міжнародної спільноти та знищення боеголовок, а також надлишку плутонію та збагаченого урану. Якщо терміни дезактивації буде узгоджено з Росією, то цим Сполучені Штати заохотять росіян до відповідних дій.

5. Зупинити всі програми розвитку і розгортання ядерних озброєнь нового покоління, зокрема вже згаданих RRW.

6. Швидко і в односторонньому порядку скласти перелік усіх американських нестратегічних ядерних озброєнь і дезактивувати їх, дотримуючись прозорості та спонукаючи Росію до схожих дій.

7. Оголосити про готовність Сполучених Штатів продовжувати скорочення ядерного арсеналу на основі — двосторонній чи багатосторонній — перемовин і контролю.

8. Взяти зобов'язання не відновлювати ядерних випробувань і працювати з Сенатом над ратифікацією пакту про їх повну заборону.

9. Зупинити розгортання захисної системи з ракет, розміщених на землі, та відмовитися від планів захисту за допомоги ракет, розміщених у космосі. Розгортання будь-якої американської захисної системи, частину якої Китай та Росія вважали би за можливе перехопити за допомоги ракет дальньої дії, стало би на перешкоді суворому скороченню озброєнь. Реакція цих держав могла би значно зашкодити безпеці Сполучених Штатів.

10. Ще раз підтвердити прагнення Сполучених Штатів продовжувати ядерне роззброєння та представити спеціальний проект для досягнення цієї мети, усвідомлюючи, що загальна і контрольована заборона ядерних озброєнь підвищила би державну та міжнародну безпеку.

Ці десять кроків до справжньої безпеки — лише повтор документа, складеного в червні 2001 р. тими самими особами і під тією самою назвою. Наступний американський президент може і повинен здійснити їх в односторонньому порядку, і все ж їм не зашкодили би консультації з Росією та співпраця з цією державою, а також з іншими країнами, які вже мають або ще не мають ядерної зброї та кооперація з якими дуже важлива

для встановлення нового режиму нерозповсюдження. У працях Кіссінджера 2007—2008 років блискуче проаналізовано кожен з цих кроків, і саме він наполягає на перевагах співпраці з Росією задля покращення безпеки як обох держав, так і всього світу.

Якщо Франція поставить перед собою саме таку мету, робота з нею стане запорукою успіху.

Примітки

1. Ідеться про містечко Дубровиця на Рівненщині (*тут і далі примітки перекладача*).

2. Ідеться про Ризький мирний договір, підписаний 18 березня 1921 р. представниками більшовицької Росії, Української Соціалістичної Радянської республіки та Польщі. Ця угода остаточно визначила поділ українських та білоруських земель між СРСР і Польщею та поставила крапку в польсько-радянському збройному конфлікті 1919—1920 рр.

3. Справа Альфреда Дрейфуса (1859—1935) спричинила глибоку політичну кризу у Франції на межі XIX—XX ст. У 1894 р. Дрейфуса визнали винним у видачі воєнних секретів Німеччині та вислали на довічну каторгу у Французькій Гвіані. По двох роках знайшли справжніх винуватців, а також з'ясували, що слідство та суд керувалися сфабрикованими документами. Насправді Дрейфуса засудили за єврейське походження. Суспільство розкололося надвоє — на дрейфусарів (себто тих, хто вимагав негайної реабілітації капітана) та антидрейфусарів (які були впевнені у його провині). У 1896—1899 роках уся Франція жила справою Дрейфуса. Знаменитий памфлет Еміля Золя «Я звинувачую!» пов'язаний саме з нею.

4. У 1920—1939 роках Дубровиця перебувала у складі Польщі.

5. Ліцей святого Людовика — заклад середньої освіти (старші класи), розташований у Парижі. Заснований ще у XIII ст. єпископом д'Аркурром, ліцей вважається одним із найпрестижніших навчальних закладів Франції. Серед його випускників — письменники Жан Расін і Шарль Бодлер, авіаконструктор Серж Дассо, пілот Антуан де Сент-Екзюпері,

композитор Шарль Ґуно, математики Андре Вайль та Рене Том, лауреати Нобелівської премії П'єр-Жиль де Женн та Луї Неель тощо.

6. Андре Шарпак (1928—2006) — брат Ж. Шарпака, актор, сценарист, кінорежисер, автор театральних постанов за творами Бальзака і Достоевського.

7. Міжнародний рух «Соколи» (Соціалістичний освітній Інтернаціонал) — міжнародне об'єднання молодіжних організацій у 57 країнах світу, побудоване на принципах самоосвіти та боротьби за права дітей і молоді. Перші «соколи» з'явилися в Північній Європі після 1918 р.

Французька ліга притулків для молоді — об'єднання дешевих готелів, що надавали послуги для юних мандрівників, заснована 1930 р.

8. Ідеться про парламентські вибори 1936 р., на яких переміг Народний фронт, у результаті чого було сформовано перший соціалістичний уряд Леона Блюма. У травні на заклик Моріса Тореза майже два мільйони робітників по всій Франції оголошують страйк. Після підписання Матіньйонських угод Торез оголошує про припинення страйку.

Жак Превер (1900—1977) — французький поет і сценарист. Завдяки простоті мови та кумедній грі слів швидко став дуже популярним. Поезію Превера вивчають у французьких школах.

9. Режим Віші — політичний режим на чолі з маршалом Філіппом Петеном, який керував Францією під час окупації нацистами у 1940—1944 рр. Адміністративним центром режиму було м. Віші у центрі країни. Під тиском німецької адміністрації режим прийняв низку антисемітських законів, зокрема постанову 20 травня 1942 р. про обов'язкову наявність жовтої зірки на одязі єврея.

10. Дрансі — містечко неподалік Парижа. У 1941—1944 роках тут розташовувався табір для інтернованих: звідси паризьких євреїв відправляли до концтаборів.

11. Вища школа промислових фізики та хімії Парижа — вищий навчальний заклад для інженерів. У школі, заснованій 1882 р., навчалися свого часу П'єр і Марі Кюрі, Ірен і Фредерік Жоліо-Кюрі, П'єр-Жиль де Женн та чимало інших видатних науковців.

12. За режиму Віші Демаркаційна (або Зелена) лінія відділяла зону, окуповану німцями, від Вільної, або Південної зони. На півдні Демаркаційна лінія доходила до кордону з Іспанією та області Країна Басків.

13. Ейс — містечко на однойменній річці у департаменті Ардеш на південному сході Франції.

14. 2-га дивізія СС Das Reich складалася з волонтерів і вихідців з французького Ельзасу-Лотарингії, яких називали «всупереч-собі» (вони йшли на службу не добровільно, а з примусу). Дивізія брала участь у поході на Балкани, потім воювала у СРСР. У Франції «успішила» свою винятковою жорстокістю, зокрема знищенням селища Орадур-на-Глані в центральній Франції. Село було повністю зруйноване, всі мешканці — 642 особи — загинули. Ця бійня вважається найчисленнішим масовим вбивством у Франції за всю Другу світову війну.

15. Комп'єнь — місто на півночі Франції. У 1941 р. в районі Руальє нацисти облаштували табір для інтернованих.

Дахау — місто в Баварії, де 1933 р. було відкрито перший нацистський концентраційний табір. За 12 років існування в ньому загинуло більше 30 тис. осіб.

16. Альберт Шпеер (1905—1981) — німецький архітектор, який у Третньому Райху обіймав посаду міністра Військової промисловості. Був дуже близький до Гітлера, здійснив чимало архітектурних проектів для партії. Додумався використовувати військовополонених у промисловості.

17. Ернст Фрідріх Фердінанд Цермело (1871—1953) — німецький математик. У 1904 р., спираючись на принцип вибору, сформулював теорему: «будь-яку множинність можна впорядкувати», відтоді відому як теорема (або принцип) Цермело.

18. Генерал Джордж Паттон Молодший (1885—1945) командував 7-ю та 3-ю арміями США під час Другої світової війни. По завершенні воєнних дій був призначений військовим губернатором Баварії.

19. Готель «Лютеція» у 6-му окрузі Парижа зведено 1910 р. у стилі ар-нуво. Тут мешкало безліч видатних митців — Андре Жид, Анрі Матісс, Пабло Пікассо, Джеймс Джойс та ін. Після окупації Франції німцями у «Лютеції» розташовувався штаб

«Абверу» — служби розвідки та контррозвідки. Після звільнення в готелі розміщували колишніх в'язнів нацистських концтаборів.

20. Національна вища Гірнична школа Парижа, заснована 1783 р. — один із найстаріших у Франції закладів інженерної вищої освіти. Політехнічна школа Парижа, заснована 1794 р. — найпрестижніший інженерний заклад освіти та дослідницький центр Франції.

21. Лотарингія завжди була головним осередком французької металургії.

22. Фредерік Жоліо-Кюрі (1900—1958) — французький фізик і хімік, лауреат Нобелівської премії з хімії спільно з своєю дружиною Ірен Жоліо-Кюрі. З 1937 р. керував лабораторією ядерної фізики у Коллеж-де-Франс — заснованому 1530 року закладі публічної освіти. Коллеж-де-Франс не видає дипломів, його мета — поширення науки та підвищення загального рівня освіти. Бути викладачем у Коллеж-де-Франс — велика честь для науковця.

23. Національний центр наукових досліджень було засновано 1939 р. Фактично функції цього закладу відповідають функціям Академії наук, але провадить він винятково практичні дослідження в усіх наукових галузях під егідою Міністерства вищої освіти та науки Франції. Це справжній гігант: у роботі CNRS задіяно близько 12 тис. науковців.

24. Інженер Йоганн Вільгельм Гайгер (1882—1945) спільно з Вальтером Мюллером у 1928 р. винайшов лічильник Гайгера — детектор радіоактивного випромінювання на основі іонізаційної камери. Одна зі стінок рурки — основної складової лічильника — скляна.

25. Ідеться про працю 1921 р. Джона Маркуса Блатта і Віктора Вайсскопфа «Теоретична ядерна фізика».

26. У містечку Ле-Уш у французьких Альпах досі діє Фізична школа, заснована 1951 р. франко-американською дослідницею Сесіль ДеВітт-Моретт (нар. 1922), щоб допомогти французьким студентам надолужити згаяний війною час. Зі школою пов'язані імена таких усесвітньо відомих фізиків, як Енріко Фермі, Вольфганг Паулі, Меррей Джелл-Манн, П'єр-Жиль де Женн та ін. З часом школа відкрилась і до інших галузей науки — біології, математики, геології, хімії тощо.

27. Гайнц Петер (1909—1986) — німецький фізик із Гамбурзького університету.

28. Ідеться про Об'єднаний інститут ядерних досліджень у російському «наукограді» Дубна (Московська обл.), заснований 1956 р.

29. Стандартна модель у фізиці елементарних частинок — теоретична конструкція, що описує електромагнітну, слабку і сильну взаємодії всіх елементарних частинок.

30. Дональд Артур Глейзер (1926—2013) — американський фізик і нейробіолог, лауреат Нобелівської премії з фізики 1960 року «за винахід бульбашкових камер».

31. Інститут ядерної фізики в Орсе — спільна дослідницька лабораторія CNRS та університету «Париж-Південь», заснована 1956 р. з ініціативи подружжя Жоліо-Кюрі.

32. «Шлумбергер» — найбільша на світі міжнародна корпорація з обслуговування нафтовидобувної промисловості.

33. Ів Шарпак — син Жоржа Шарпака, лікар, громадський діяч і публіцист. Філіпп Деманж — лікар-косметолог.

34. Павло Черенков (1904—1990) — радянський фізик, лауреат Нобелівської премії з фізики 1958 р. (разом з І. Таммом та І. Франком) за розроблення ефекту Вавилова—Черенкова — свічення, викликаного у прозорому середовищі зарядженою частинкою, яка рухається зі швидкістю, що перевищує фазову швидкість поширення світла в такому середовищі. Цей ефект Черенков, Тамм і Франк використали в розробленні власних лічильників.

35. Річард Лоренс Гарвін (нар. 1928) — американський фізик, який 2002 р. отримав Національну наукову медаль — найбільшу наукову нагороду США.

36. «Лоцман на це так відповів:

— Сеньйоре! Вам боятися нема чого. Ось креси Льодовитого моря, на початку минулої зими тут точилося велике і криваве боїще між аримаспами і нефелібатами. Ось тоді й замерзли у повітрі слова і крики чоловіків і жінок, брязкіт булав, дзвін панцирів і збрुї, кінське іржання і всі бойові гуки. Нині люта зима минула, її змінила ясна і тепла година, слова відмерзають і доходять до слуху.

— Далєбі (сказав Панург), я в це вірю. А чи не можна нам побачити хоч якесь слівце? Пригадую, я читав, що під горою, де Мойсей закон для жидів дістав, люди в'явки бачили голоси.

— Маєте! Маєте! (сказав Пантагрюель) Ось вам ще не розмерзлі.

І він кинув на чардак цілі пригорщі замерзлих слів, на різноколірне драже схожих. Слова ці дубуваті, зелені, лазурові, піщані, золотисті, відігривались у нас на долонях і танули, як сніг, і ми їх напавду чули, але не розуміли, бо це була базгранина, опрiч одного замашнєнього слова — відігрiте брата Жана долоньями воно видало пук, так пукають на вогні ненадрiзанi каштани, i з ляку всi ми аж скинулися.

— Колись (сказав брат Жан) це був постріл із фальконета» (Переклад А. Перепаді).

37. Зиверт — одиниця вимірювання еквівалентної дози іонізуючого випромінювання в системі СІ.

38. «Сен-Гобен» — французька компанія, заснована ще 1665 р. міністром фінансів Кольбером в однойменному містечку в області Пікардія. Найбільший у Європі виробник будівельних матеріалів.

39. Піщана коса Еспігетт — величезний масив дюн на узбережжі Середземного моря у складі унікальної природної зони Камарґа. Гро-дю-Ру — місто в зоні Камарґа, де розташований найпопулярніший місцевий порт — Пор-Камарґ.

40. Ідеться про Міжнародну агенцію з ядерної енергетики (МАГАТЕ), засновану 1957 р. задля розвитку співпраці у розширенні використання ядерної енергії з мирною метою.

41. Юрà — гірський масив уздовж кордону Франції та Швейцарії, на північний захід від Альп.

42. У 1890 р. Марсель Пруст (1871—1922), французький письменник, дав відповіді на запитання популярної британської гри «Зізнання». Згодом він ще кілька разів відповідав на цю анкету. У 2003 р. оригінал анкети було продано з аукціону за більше ніж 100 тис. євро.

43. Роже Мартен дю Гар (1881—1958) — французький письменник, лауреат Нобелівської премії 1937 р., автор знаменитої автобіографічної епопеї «Родина Тібо» (1920—1939).

44. Ідеться про головного персонажа комедії-балету Мольєра «Міщанин-шляхтич» (1670 р.). Міщанин Журден намагається вдавати аристократа, з чого виникає безліч кумедних ситуацій.

45. На Південному піку Бігорр у Піренеях (2876 м) розташовано астрономічну обсерваторію і телевізійну антену. Обсерваторія входить до складу університету ім. Поля Сабатьє (Тулуза).

46. DESY — Німецький електронний синхротрон — національний науково-дослідний центр у Німеччині, в м. Гамбург. У центрі близько 650 вчених вивчають структуру матерії.

47. Гаргамеллою звали матір велета Гаргантюа, одного з головних персонажів роману Франсуа Рабле «Пантагрюель» (1532 р.). Власне ім'я перейшло до французького аргю, де позначає горлянку. «А в Гаргамелли кишка випала по обіді, третього лютого, бо вона переїлася годбійо. Годбійо — це хляки тлустих гімо. Гімо — це лужки, де за літо бувають дві косовиці. Отож, забито триста шістдесят сім тисяч чотирнадцять таких тлустих воликів і задумано на масницю їх засолити: тоді м'яса стане ще й на весну і можна буде перед трапезою посолонцювати, а посолонцюєш, то й на вино потягне.

Утрібкою, як бачите, зафундувалися, та такою смаковитою, що кожен їдець ще й пальці собі облизував. Та от, трясця твоїй матері, утрібка довго не пролежить, вона починає духу набиратися. А це вже казна-що! Тим-то й тужилися ум'яти геть усе, щоб таке добро не пропадало.

З цією метою поскликали сеннейців, сюєїв, рошклермонців, вогодрейців, не забувши і про кудремонпансьєнців, ведебродців та інших сусідів, і всі вони голова в голову були чаркодуї, гольтіпаки і бабодури. От добряга Ірангузьє і закликав кожного пригощатися від пуза. Тільки дружині, тій він сказав, щоб не напихалася, бо вона вже на останніх днях, а утрібка — скоромина. «У кишках чимало гівна і без клишок», — вірік він. Але попри всі застороги, Гаргамелла уперла цих клишок шістнадцять бочок, два барильця і шість кухв. Та й обдуло ж її потім від цієї щедрої фекальної маси!» (Переклад А. Перепаді).

48. Лорд Кельвін — Вільям Томсон (1824—1907), британський фізик ірландського походження, що улавився працями з термодинаміки. Попри величезний внесок у науку, лорд Кельвін зробив кілька хибних прогнозів. Скажімо, він стверджував, що «створити літаючу машину, важчу за повітря, неможливо».

49. Відкриття бозона Гігза було винагороджено 2013 р. Нобелівською премією науковцям із ЦЕРНу — Франсуа Енглера та Пітерові Гігзу.

50. Один із титанів — мітичних велетнів, — які збунтувалися проти Зевса. Володар Олімпу присудив кожному свою покару, Атласові ж — тримати небесне склепіння.

51. Французький філософ Блез Паскаль (1623—1662) розрізняв «нескінченність у великому», себто нескінченну ділимість природи вшир, і «нескінченність у малому», себто углиб.

52. Жак Пеллетьє дю Манс (1517—1582) — французький математик і поет-гуманіст. Одним із перших використав в алгебрі літери. У поезії використовував своєрідну «математичну мову».

53. Ервін Рудольф Йозеф Александер Шредінгер (1887—1961) — австрійський фізик і теоретик науки. Сформульоване ним рівняння — основне рівняння руху нерелятивістської квантової механіки, яке визначає закон еволюції квантової системи з часом. Вперше опубліковане 1926 р. У 1933 р. отримав — разом із Полем Діраком — Нобелівську премію з фізики.

54. Геракліт з Ефесу (кінець VI ст. до н.е.), відомий також як Геракліт Темний — давньогрецький філософ. Автор трактату «Про природу».

55. Джованні Піко делла Мірандола (1463—1494) — італійський філософ і теолог-гуманіст. У своїх творах зробив спробу синтезувати відомі на той час філософські та релігійні доктрини, зокрема платонізм, аристотелізм, схоластику й кабалу.

56. Пол Едрієн Моріс Дірак (1902—1984) — британський фізик і математик, один із засновників квантової механіки, лауреат Нобелівської премії з фізики 1933 р. разом із Е. Шредінгером. Передбачив існування антиматерії.

57. Андре-Марі Ампер (1775—1836) — французький математик, фізик, хімік і філософ, автор визначних відкриттів у галузі електродинаміки, винахідник соленоїдів, електрич-

ного телеграфу та електромагніту. Автор «Есе про філософію науки» (1834). Майкл Фарадей (1791—1867) — британський фізик і хімік. Винайшов електричний двигун, нові різновиди скла та бензол, відкрив електромагнітну індукцію та явище нестабільності Фарадея, ввів терміни анод, катод, іон, аніон, катіон. Автор «Хімічної історії свічки» (1861 р.).

58. «La main à la pâte» («Руки в тісті») — державна організація у Франції, яка займається пошуком і впровадженням нових методик наукової освіти у школі. Серед її засновників був Жорж Шарпак.

59. Ідеться про «Обертання небесних сфер» (1543) — революційний трактат з викладенням геліоцентричної системи Міколая Коперника (1473—1543).

60. Джеймс Клерк Максвелл (1831—1879) — шотландський фізик і математик. Об'єднав електрику, магнетизм та індукцію у низку рівнянь Максвелла. На той час це була найбільш цілісна модель електромагнетизму.

61. Антуан Рівароль (1753—1801) — французький письменник і журналіст. Відомий численними памфлетами та елегантним стилем. Артур Рембо (1854—1891) — французький поет, який замолоду зажив слави найскандальнішого митця Франції.

62. Йоганнес Кеплер (1571—1630) — німецький астроном, який дослідив геліоцентричну систему Коперника. Довів, що планети обертаються навколо Сонця не по колу, а по еліптичних орбітах.

63. Еваріст Галуа (1811—1832) — французький математик, один із засновників сучасної математики.

64. Анрі Пуанкаре (1854—1912) — французький математик, фізик, філософ та інженер, автор численних відкриттів.

65. П'єсу Дж. Б. Шоу «Повернення до Мафусаїла» написано 1920 р. Мафусаїл — один із біблійних патріархів, який прожив 969 років. Його іменем стали позначати довгожителів.

66. Порівняння П'єра Корнеля (1606—1684) і Жана Расіна (1639—1699), двох головних представників французького класицистичного театру, є класичним порівнянням у школах Франції. У Корнеля рацію переважає над пристрастю, у Расіна

ж навпаки: Корнель змальовує людей такими, якими вони мали би бути, а Расін — такими, якими вони є.

67. Рене Домаль (1908—1944) — французький письменник і літературний критик, автор незавершеного роману «Гора Аналог» (1944), в якому намагається показати аналогічне мовлення та багатошарове письмо.

68. Макс Планк (1858—1947) — німецький фізик, лауреат Нобелівської премії з фізики 1918 р. за роботу над квантовою теорією. Нільс Бор (1885—1962) — данський фізик, лауреат Нобелівської премії з фізики 1922 р. за внесок у розвиток квантової механіки.

69. Вернер Карл Гайзенберг (1901—1976) — німецький фізик, один із засновників квантової механіки, лауреат Нобелівської премії 1932 р.

70. Реймон Кено (1903—1976) — французький письменник, один із засновників угруповання Уліпо. До деяких своїх творів застосовував правила арифметики.

71. Цей вислів приписують і святому Августину (354—430), і давньоримському письменникові Тертулліану (між 150 та 160 — бл. 220).

72. Річард Філіпс Фейнман (1918—1988) — американський фізик, що уславився працями з релятивістської квантової електродинаміки.

73. Жан Перрен (1870—1942) — французький фізик, хімік і політик, лауреат Нобелівської премії з фізики 1926 р. за дослідження дискретної природи матерії.

74. Насправді — Анрі Буасс (1866—1953), французький фізик із Тулузи, автор «Наукової бібліотеки інженера і фізика» у 45 томах та численних передмов до наукових праць.

75. Цитата з вірша Шарля Бодлера (1821—1867) «Запрошення до подорожі» (переклад Д. Павличка).

76. Пантум або пантун — традиційна поетична форма в Малайзії: чотирирядковий вірш, де два перші рядки являють побутову сцену, а два останні — мораль. Зв'язок між двома частинами неочевидний.

77. Робер Жерміне (нар. 1943) — французький фізик, ректор Національної вищої Гірничої школи в м. Сент-Етьєн ENSMSE

у 2001—2008 рр. У 1993 р. обіймав посаду регіонального директора промисловості та науки в області Країна Луари.

78. Юрій Орлов (нар. 1924) — радянсько-американський фізик, правозахисник, засновник і перший керівник Московської Гельсінської групи. Близько 9 років провів на засланні. У 1986 р. був позбавлений радянського громадянства і висланий за межі СРСР в обмін на розвідника Геннадія Захарова, заарештованого у США. Викладає в Корнельському університеті.

79. «Доктор Стренджлав, або: як я навчився не перейматися і полюбив бомбу» (1964) — мілітарна сатирична комедія Стенлі Кубрика з Пітером Селлерзом у головній ролі. У стрічці йдеться про «холодну війну».

80. Едвард Теллер (1908—2003) — угорсько-американський фізик-ядерник, «батько водневої бомби», учасник проекту Мангеттен. У 1980-х роках, перебуваючи на посаді почесного директора Національної лабораторії ім. Лоренса Лівормора, завзято підтримував ініціативу стратегічної оборони «Зоряні війни» президента Рональда Рейгана.

Зміст

Наука і мистецтво — разом. (<i>Станіслав Довгий</i>)	5
Вчений, який єднав континенти (<i>Ніколь Лемер Д'Агажжйо</i>)	8
Частина перша. Вигнанець	11
<i>Розділ перший. Поневіряння іммігранта з Центральної Європи</i>	12
<i>Розділ другий. Чи існують викопні звуки?</i>	44
Частина друга. Фізик	60
<i>Розділ перший. Золота доба частинок</i>	64
<i>Розділ другий. Мрії та дійсність: теоретична фізика.</i>	136
Частина третя. Громадянин світу	157
<i>Розділ перший. Фізик і місто</i>	158
<i>Розділ другий. Доба страху та сподівань</i>	171
<i>Розділ третій. Сполучені Штати без ядерної зброї</i>	181
Примітки	187

Науково-популярне видання

Жорж Шарпак

СПОГАДИ ВИГНАНЦЯ, ФІЗИКА, ГРОМАДЯНИНА СВІТУ

З французької переклав Іван Рябчій

Випусковий редактор *Галина Завалій*

Науковий консультант *Максим Стріха*

Редактор *Григорій Латник*

Макет та художнє оформлення *Сашка Шевцова*

ШАРПАК Жорж

Ш26 СПОГАДИ вигнанця, фізика, громадянина світу/Переклад з французької Івана Рябчія. — Львів: Видавництво Анетти Антоненко, 2014. — 200 с.

ISBN 978-617-7192-08-3

ISBN 978-617-7192-07-6 (Серія «Колекція наукова»)

У книжці спогадів видатний французький фізик і громадський діяч єврейсько-українського походження, лауреат Нобелівської премії з фізики 1992 р. Жорж Шарпак (1924—2010) постає в різних іпостасях: і як учасник руху Опору за часів Другої світової війни, і як один із засновників Європейського центру ядерних досліджень ЦЕРН у Женеві, і як невтомний дослідник, і як педа-гог-подвижник, і як завзятий захисник ідеї мирного атому. Книжка містить унікальний «літопис» фізики елементарних частинок і цінні міркування про єдність мистецтва і науки.

ББК 84.4 Фра-44