

АЙНШТАЙН:

теорія відносності і теорія світлових квантів (серйозно і не дуже)

Юрій Степановський
д.ф.-м.н., професор, пров. наук. спів.
ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут" НАН України

Берн, 1902—1909 рр.

А. Айнштайн — експерт третього класу Швейцарського патентного бюро

... практична професія взагалі
є благословенням для людей мого типу.

Тому що академічна кар'єра змушує молодих людей робити наукові праці
в постійно зростаючій кількості, що веде до спокуси поверховості,
якій можуть протистояти тільки сильні характери.

А. Айнштайн

Навесні 1902 року в одній з бернських газет у розділі "Суміш" з'явилось оголошення, котре повідомляло: "...випусник федерального політехнікуму Альберт Айнштайн, дипломований учитель-фахівець, дає приватні уроки математики і фізики студентам і школярам. Перший урок безкоштовно".

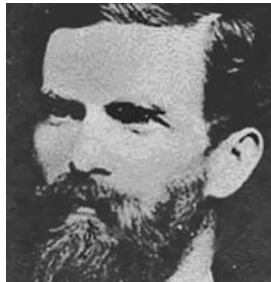
Його пригнічувало. Айнштайн був єдиним випусником цюрихського політехнікуму 1900 року, який залишився без роботи. Ніхто з викладачів не захотів залишити в себе студента, що не виділявся особливою старанністю і не виявляв належної поваги до них. Так, "пана професора Вебера" Айнштайн не раз називав просто "паном Вебером".

Чи міг "пан професор Вебер" пробачити це (і не тільки це!) Айнштайну і залишити його в себе асистентом? У політехнікумі Генріх Фрідріх Вебер читав Айнштайну теоретичну фізику; математику Айнштайн читав видатний математик Герман Мінковський, котрий згодом зробив серйозний внесок у спеціальну теорію відносності. Саме Мінковський, лекції якого Айнштайн вважав нудними і нецікавими, надав теорії відносності її сучасного чотиривимірного вигляду. Разом з Лоренцом, Пуанкаре і Айнштайном Мінковський по праву вважається одним із творців теорії відносності. Мінковському Айнштайн запам'ятався як "студент, що ухилявся від відвідування лекцій", а Айнштайн (згодом він високо оцінив внесок Мінковського в теорію відносності) спочатку сприймав роботи математика як "зайву вченість" і в'їдливо говорив: "З тих пір як за теорію відносності взялися математики, я перестав у ній що-небудь розуміти". Г. Ф. Вебер був відомим ученим, але найцінніший його внесок у науку — це те, що він НЕ допоміг Айнштайну залишитися асистентом у цюрихському політехнікумі (хоча й обіцяв це зробити), надавши йому цим самим можливість піти по власному шляху і не перетворитися на пересічного "пана професора Айнштайна".



Оголошення в бернській газеті, 1902 р.

Ці уроки не могли прогодувати Альберта Айнштайна, тому що учнів практично не було, зате його перший учень Моріс Соловін став йому другом на все життя, тож уже заради цього варто було давати об'яву. Безробітному Альбертові Айнштайну матеріально допомагали його незаможні батьки, і це



Герман Мінковський
і Генріх Фрідріх Вебер— учителі Айнштайна
в цюрихському політехнікумі

У політехнікумі Айнштайн свідомо "задовольнявся роллю посереднього студента". Пізніше він згадував про своє навчання:

"Зазвичай я багато "прогулював" і зі священною запопадливістю студіював томи корифеїв теоретичної фізики. Саме по собі це було добре і служило також тому, що нечиста совість так дієво заспокоїлася, що щиросердечна рівновага не порушувалася скільки-небудь помітно...



Альберт Айнштайн —
службовець
патентного бюро



Весільна фотографія
Альберта і Мілеви



Айнштайн із сином
Гансом Альбертом

Для людей мого складу, схильних до тривалих роздумів, університетська освіта не є безумовно благодатною. Якщо людину змусити з'їсти занадто багато смачного, вона зіпсує собі апетит і шлунок. Вогник священної цікавості може надовго згаснути. На щастя, у мене ця інтелектуальна депресія після благополучного закінчення навчання тривала тільки рік".

У червні 1902 року за рекомендацією батька свого близького друга Марселя Гроссмана Айнштайн стає службовцем Швейцарського патентного бюро (з дворічним терміном випробування), у якому він пропрацював 7 років. "Завдяки цьому в 1902—1909 роках, саме в роки найбільш продуктивної діяльності, я був урятований від турбот про існування", — писав він про цей "щасливий час".

У жовтні 1902 року в Мілані батько А. Айнштайна, вмираючи, дав згоду на одруження сина з його однокурсницею Мілевою Марич. У січні 1903 року Альберт і Мілева одружилися, у травні 1904 р. народився старший син Альберта Айнштайна — Ганс Альберт.

Наближався *annus mirabilis*, надзвичайний 1905 рік.



Квартира в будинку на вулиці
Крамгассе, 49 (3 поверх, 3 і 4 вікна),
у якій Айнштайн із родиною
жив у 1905 р.

Берн, 1905 р. Роботи Айнштайна з теорії відносності

Іноді я себе запитую: як же вийшло, що саме я створив теорію відносності? По-моєму, причина цього криється ось у чому. Нормальна доросла людина навряд чи стане міркувати про проблеми простору-часу. Вона гадає, що розібралася в цьому ще в дитинстві. Я ж, навпаки, розвивався інтелектуально так повільно, що, тільки ставши дорослим, почав роздумувати про простір і час. Зрозуміло, що я вникав у ці проблеми глибше, ніж люди, що нормально розвивалися в дитинстві.
А. Айнштайн

30 червня і 27 вересня 1905 року в редакцію німецького журналу "Annalen der Physik" надійшли дві статті нікому не відомого в науковому світі патентного службовця Альберта Айнштайна, присвячені аналізу наслідків принципу відносності. Незабаром обидві статті були опубліковані.

Обидві фундаментальні праці — "До електродинаміки тіл, що рухаються" (31 стор.) та "Чи залежить інерція тіла від енергії, яку воно

містить?" (3 стор.), надруковані Айнштайном у 17-му та 18-му томах журналу "Annalen der Physik", різко відрізнялися від звичайних наукових статей: у них не було ніяких бібліографічних посилань на попередників, математичні викладки були елементарними, логіка була бездоганною та переконливою.

Фізичні висновки, одержані Айнштайном, приголомшували: те, що попередники (такі як

Лоренц та Пуанкаре) вважали властивостями матеріальних стержнів або властивостями електронів, виявилось, як довів Айнштайн, властивостями простору-часу.

Головна ідея цих праць, які стали основою побудованої Айнштайном та ішими фізиками *спеціальної теорії відносності*, містила в собі два принципи:

1. *Принцип відносності:*

Закони, за якими змінюється стан фізичних систем, не залежать від того, до якої з двох координатних систем, що знаходяться відносно одна одної в рівномірному поступальному русі, ці зміни стану відносяться.

2. *Принцип сталості швидкості світла:*

Кожен промінь світла рухається у системі координат, що "перебуває у стані спокою" з певною швидкістю c і незалежно від того, випромінюється це світло тілом, що рухається, чи тілом, що перебуває у стані спокою.

Айнштайн показав, що з цих принципів неминуче випливає

- 1) *відносність одночасності;*
- 2) *уповільнення часу;*
- 3) *скорочення масштабів.*

Уповільнення часу і скорочення масштабів відбуваються в такому відношенні

$$L' = L \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}, \quad T' = T \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}},$$

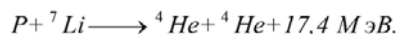
де T і L — час, який показує годинник, що знаходиться у стані спокою, і довжина масштабу в системі, що перебуває в стані спокою; T' і L' — час, який показує годинник, що рухається, і довжина масштабу в системі, що рухається; V і c — швидкість їхнього руху і швидкість світла. Айнштайн вивів перетворення, раніше постульовані Лоренцом, одержав закон додавання швидкостей, показав інваріантність рівнянь електродинаміки Максвелла щодо перетворень Лоренца, застосував нову механіку до опису руху електронів зі швидкостями, порівнянними зі швидкістю світла, розглянув у рамках нової теорії ще кілька фізичних явищ.

Якщо результати першої статті Айнштайна певною мірою перетиналися з результатами Лоренца і Пуанкаре, то друга стаття містила зовсім новий і найважливіший результат — знамениту формулу:

$$E = mc^2,$$

що встановила зв'язок між масою й енергією тіла, яке перебуває у стані спокою. Ця формула привела до розуміння всіх енергетичних перетворень у природі — від горіння свічки до горіння Сонця і зір, а також вибухів наднових зір. Вона лежить в основі атомної енергетики і, на жаль, атомної і термоядерної зброї. Вперше ця формула була підтверджена експериментально в травні 1932 року в Кембриджі Джоном Кокрофтом і Ернестом Уолтоном (Нобелівська премія з фізики (1951 р.) за підтвердження закону Айнштайна стосовно екві-

валентності маси й енергії). У Кембриджі було розщеплене ядро ${}^7\text{Li}$ при бомбардуванні протонами з енергією 125 КэВ, при цьому виділялося 17,4 МэВ енергії:

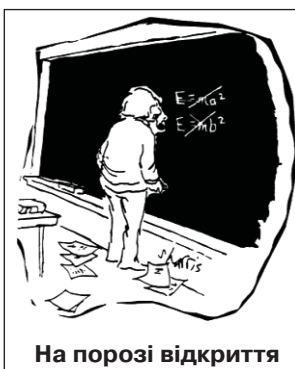


У жовтні 1932 року експеримент Кокрофта й Уолтона було повторено у Харкові, в УФТІ, "високовольтною бригадою" в складі *К.Д. Синельникова, О.І. Лейпунського, А.К. Вальтера і Г.Д. Латишева*. Це було першим великим успіхом молодого української ядерної фізики. І у Кембриджі, і у Харкові ці експерименти були пророблені за ініціативи чудового фізика, одесита за народженням, *Георгія Антоновича Гамова*, котрий незабаром перетворився в Джорджа Гамова і перестав бути консультантом харківського УФТІ.

Слід зазначити, що фізична інтерпретація формули $E = mc^2$ і взагалі поняття маси вимагає особливої уваги. Згадаємо методично важливу статтю Л.Б. Окуня [1], у якій обговорюється питання про правильну інтерпретацію фундаментального рівняння Айнштайна $E = mc^2$ і про те, що знаменита формула (m_0 — маса спокою), яка десятиліттями вважалася

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}},$$

одним з найважливіших досягнень фізики ХХ століття, насправді марна і навіть шкідлива. Дійсно, якщо простежити за тим, як виникає ця формула, то можна побачити, що величина m просто названа масою без будь-яких на це підстав. Але, назвавши m масою, з цією величиною починають обходитися як з масою, а це може привести до серйозних помилок. До речі, розповідають, що Авраам Лінкольн любив запитувати: "Якщо назвати хвіст ногою, то скільки ніг буде в собаки?" І сміявся, коли говорили: "п'ять". "*Немаса*" (хвіст) не стане "*масою*" (ногою), якщо її (його) так називати. У своїй статті Л.Б. Окунь [1] описує словами малюнок, що зображує процес наукової творчості (оригінал цього малюнка міститься в англійському варіанті статті).



На порозі відкриття

Завдяки Інтернету можна побачити цей потішний малюнок (його автор S. Harris): якщо в пошуковій системі Google (Images) набрати слово "Einstein", то за 0,08 сек Google знаходить 308 000 "малюнків", і цей з'являється досить швидко — шестисотим. Узагалі ж, Google за 0,04 секунди знаходить 110 000 000

посилань, що відповідають слову "Einstein".

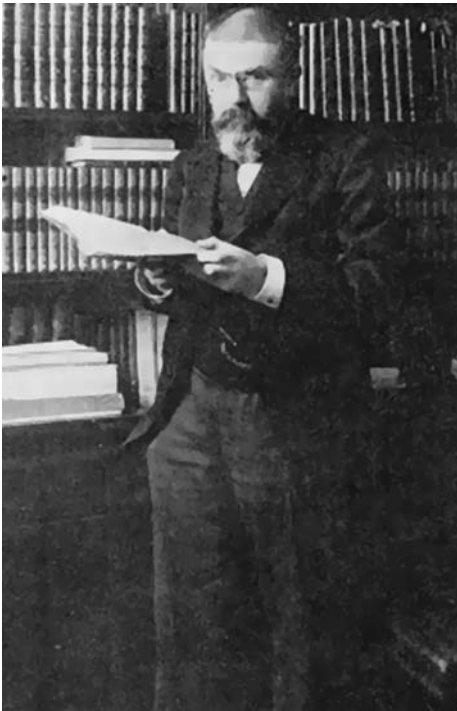
Це чудо (Інтернет), до якого ми так швидко звикли і яке тепер стало звичайною повсякденністю, з'явилося завдяки іншому чудовому відкриттю, зробленому Айнштайном того ж 1905 року, а саме завдяки відкриттю кванта світла.

Айнштайн і Пуанкаре

*Пан Айнштайн — один із найоригінальніших мислителів, яких я знав...
Особливе захоплення викликає та легкість, з якою він сприймає нові концепції
і робить з них всілякі можливі висновки...*

*Оскільки він одночасно працює в різних напрямках, то, скоріше за все,
більшість шляхів, по яких він іде, заведуть його у глухий кут, але варто сподіватися,
що хоча б один з намічених ним напрямів виявиться вірним, і цього буде досить.*
А. Пуанкаре

Це єдине висловлення Анрі Пуанкаре про Айнштайна, що збереглося. Пуанкаре написав відгук після особистої зустрічі з Айнштайном на Сольвеевському конгресі 1911 року в Брюсселі на прохання адміністрації цюріхського політехнікуму (котрий, нарешті, зважився взяти Айнштайна на роботу).



Анрі Пуанкаре

Пуанкаре по праву вважається одним із творців теорії відносності. Праця Анрі Пуанкаре "До динаміки електрона", надрукована в 1906 році (вдвічі більша за обсягом, ніж перша праця Айнштайна), містила в собі майже всю математику і фізичні висновки (окрім формули $E = mc^2$) спеціальної теорії відносності. На жаль, робота Пуанкаре була опублікована в математичному журналі "Rendiconti del Circolo Matematico di Palermo" (стаття надійшла в редакцію журналу 23 липня 1905 року), котрий мало читали фізики, тому була мало ким помічена. До того ж загальний інтерес до теорії відносності виник уже після несподіваної смерті Пуанкаре у 1912 році.

Прекрасно розуміючи математичну структуру теорії відносності, Пуанкаре водночас не до кінця розумів її логічну структуру. Відомо, що розповідаючи у своїх лекціях у Геттінгені в 1909 році про нову механіку, тобто механіку теорії відносності, Пуанкаре пояснював, що вона базується на трьох принципах: 1) *ніяке тіло не може досягти швидкості,*

більшої швидкості світла; 2) принципі відносності; 3) тіло скорочується в напрямі його руху.

Отже, Пуанкаре не розумів, що третій "принцип" є наслідком перших двох. Треба також зауважити, що знайдене Пуанкаре в 1900 році співвідношення $E = mc^2$ було одержане за допомогою невірних міркувань і не може вважатися доведенням цієї фундаментальної формули.

Айнштайну багато хто дорікав, що він ніколи не посилався на Пуанкаре. Це не зовсім так. У роботі 1906 року, присвяченій наочному висновку формули $E = mc^2$, Айнштайн посилається саме на цю роботу Пуанкаре, що містить неправильний висновок з точки зору сучасних міркувань.

Пуанкаре розглянув зв'язок між імпульсом і енергією плоскої електромагнітної хвилі, знайдений Дж. К. Максвеллом у 1864 році — $p = E/c$, потім переписав цю формулу так: $p = E/c = (E/c^2)c = m$. Звідси Пуанкаре одержав співвідношення $E = mc^2$, але, дійсно, вважати, що $p = mV$, немає ніяких підстав. Ця формула може служити визначенням маси в дорелятивістській фізиці, але ніяк не в релятивістській (див. про це статтю Л. Б. Окуня [1]).

Чому Пуанкаре ніколи не згадував Айнштайна в зв'язку з теорією відносності? Одне з можливих пояснень полягає в тому, що Пуанкаре, хоча і був одним із творців теорії відносності, не вважав її "дійсною" теорією і не приймав її до кінця [2]. "Пуанкаре був відверто налаштований проти теорії відносності і, незважаючи на свій гострий розум, виявив слабе розуміння ситуації, що склалася", — писав Айнштайн в одному з листів після особистої зустрічі з Пуанкаре в 1911 році.

Берн, 1905 р. Роботи Айнштайна з теорії світлових квантів

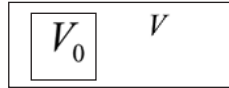
*Після п'ятидесяти років роздумів я так і не наблизився
до відповіді на запитання: що ж таке кванти світла?
Сьогодні ж кожен неук вважає, що йому це відомо,
але вони помиляються.*
А. Айнштайн

Стаття Айнштайна "Про одну евристичну точку зору, що стосується виникнення і перетворення світла" (17 стор.) надійшла в редакцію журналу "Annalen der Physik" 18 березня 1905 року і незабаром була опублікована в 17-му томі.

У цій роботі, спираючись на дослідження теплового випромінювання, виконані Вільгельмом Віном, і розглядаючи монохроматичне випромінювання, що міститься в об'ємі V , Айнштайн, використовуючи замість постійної Планка h деяку комбінацію величин, що дорівнює h , дійшов такого висновку:

Якщо монохроматичні електромагнітні хвилі з частотою ν і енергією E заповнюють об'єм V (обмежений дзеркальними стінками), то імовірність того, що в будь-який заданий момент часу вся їхня енергія буде знаходитися в частині V_0 об'єму V , дається виразом:

$$W = \left(\frac{V_0}{V}\right)^{E/h\nu}$$



Звідси випливає такий висновок.

Монохроматичне випромінювання ... у сенсі теорії теплоти поводить ся так, ніби воно складається з незалежних один від одного квантів енергії з величиною

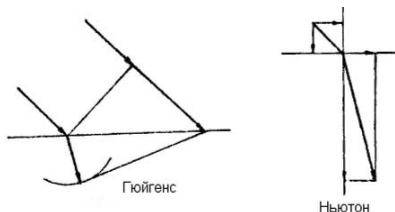
$$E = h\nu$$

Айнштайн пішов далі і зробив наступний важливий крок, що дозволив йому пояснити явище фотоефекту:

Якщо монохроматичне випромінювання ... поводить ся як дискретне середовище, що складається з квантів енергії з величиною $E = h\nu$, то напрошується запитання, чи не є і закони виникнення і перетворення світла також такими, нібито світло складається з так само подібних квантів енергії.

За це він отримав Нобелівську премію в 1921 році.

Відкривши кванти світла (що одержали в 1926 році назву *фотонів*), Айнштайн вразив сучасників своїм "невіглаством". Адже усі добре знали, що світло — це хвилі, і ніяких квантів (корпускул) світла бути не може. Уявлення *І. Ньютона* про світлові корпускули було відкинуте як таке, що суперечить досвіду, після того як *Ж. Фуко* в 1850 році встановив, що швидкість світла у воді дорівнює 3/4 швидкості світла в повітрі. При поясненні спостережуваного заломлення світла у воді хвильова і корпускулярна теорії приводили до прямо протилежних висновків:



Малюнок, що свідчить про "невігластво" Айнштайна

Швидкість поширення світлових хвиль, згідно з *Х. Гюйгенсом*, повинна бути більшою в повітрі, ніж у воді, тоді як швидкість світлових корпускул, згідно з *І. Ньютоном*, повинна бути, навпаки, більшою у воді.

І. Ньютон вважав, що при стиканні з поверхнею води корпускули притягуються до води і збільшують нормальну складову своєї швидкості, що і приводить до заломлення світла. Однак сила, яка діє на корпускулу, повинна збільшувати її імпульс, чим і пояснюється заломлення світла, що спостерігається при досліді. Імпульс же фотона, тобто справжньої корпускули світла,

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c}$$

при заданій частоті обернено пропорційний його швидкості.

Цей результат справедливий також і для середовища, якщо c — швидкість світла в середовищі. Таким чином, корпускули Ньютона поведуть ся в середовищі як справжні корпускули світла, тобто фотони Айнштайна.

Отже, правий був *Макс Планк*, коли, представляючи Айнштайна в 1914 році в Прусську академію наук, писав, що "теорію квантів світла не слід ставити йому в провину".



Планк і Айнштайн

Варто зауважити, що термін *імпульс світлових квантів* Айнштайн увів у науковий обіг тільки в 1916 році в двох статтях, у яких уперше дав уявлення про вимушене випромінювання фотонів, — явище, на якому заснована робота лазерів і мазерів. Статті Айнштайна, присвячені квантовій теорії випромінювання, є основою квантової оптики і квантової електроніки, котрі, у свою чергу, є основою новітніх технологій, які змінили обличчя людської цивілізації.

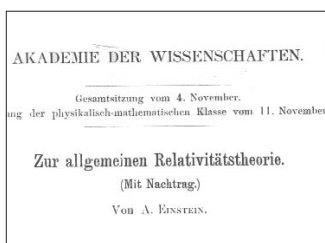
У світлові кванти Айнштайна довго ніхто не вірив. Вони були визнані тільки після того, як у 1922 році *Артур Комптон*, досліджуючи розсіювання рентгенівських променів на електронах і виконавши відповідні теоретичні розрахунки, довів, що кванти світла поведуть ся як корпускули, котрі мають енергію й імпульс у повній відповідності з формулами Айнштайна.

Берлін, 1915 р. Роботи Айнштайна із загальної теорії відносності

*І тоді мені в голову прийшла найщасливіша думка в моєму житті.
Існування гравітаційного поля може вважатися відносним,
так само, як існування електричного поля, що наводиться
в результаті електромагнітної індукції.
Це пов'язане з тим, що для спостерігача, який вільно падає з даху,
гравітаційного поля, принаймні у його найближчому оточенні, не існує.
А. Айнштайн*

Найщасливіша думка прийшла в голову Айнштайну ще в 1907 році. Однак вирішальні події подальшого розвитку цієї думки відбулися тільки в 1912 році, коли Айнштайн із родиною переселився в Цюріх і став професором політехнікуму, який він свого часу закінчив. У Цюріху Айнштайн зустрівся зі своїм старим другом *Марселем Гроссманом*, що став професором математики політехнікуму. "Гроссман, ти повинен допомогти мені, або я з'їду з глузду!" — сказав Айнштайн Гроссману. У студентські роки Марсель Гроссман виручав Айнштайна своїми конспектами, по яких "прогульник" Айнштайн благополучно складав іспити, тепер же Гроссман допоміг йому розібратися в математичній літературі і зрозуміти, що для адекватного опису гравітації необхідно залучити математичний апарат ріманової (точніше, псевдоріманової) геометрії викривлених просторів. "... Ніколи в житті я так не мучився, і тепер з великою повагою ставлюсь до математики, тонкості якої раніше, через свою обмеженість, вважав розкішшю", — писав Айнштайн А. Зоммерфельду в жовтні 1912 року. У 1913 і 1914 роках Айнштайн і Гроссман опублікували дві статті, у яких докладно виклали фізичні і математичні ідеї загальної теорії відносності. На цьому їхнє співробітництво скінчилося, тому що Айнштайн переїхав у Берлін. Айнштайн і Гроссман упритул підійшли до побудови рівнянь теорії тяжіння, але помилилися при аналізі попереднього варіанта цих рівнянь, вважаючи, що з отриманих ними рівнянь теорія Ньютона не впливає як граничний випадок.

У листопаді 1915 року Айнштайн виступив з чотирма доповідями на засіданнях Пруської академії наук у Берліні (усі доповіді оприлюднювалися рівно через тиждень після виступів).



**Фрагмент доповіді
Айнштайна
в листопаді 1915 р.**

Доповіді були опубліковані в журналі "Sitzungsberichte der Königlich preussischen Akademie der Wissenschaften" і називалися: "До загальної теорії відносності", "До загальної теорії відносності (доповнення)", "Пояснення руху перигелію Меркурія у загальній теорії відносності", "Рівняння гравітаційного поля".

У перших двох доповідях обговорювалися загальні питання теорії, у третій була пояснена аномалія в русі перигелію Меркурія (43"/100 років) і правильно розраховане відхилення променя світла гравітаційним полем Сонця (1,75"), що було у два рази більшим, ніж помилковий результат 1911 року. Нарешті, 25 листопада Айнштайн повідомив про отримані ним остаточні рівняння тяжіння:

$$G_{im} = -\kappa(T_{im} - \frac{1}{2}g_{im}T).$$

Теорія була завершена. Зоммерфельд у 1921 р. захоплено відгукнувся на нову теорію Айнштайна:

"... ідеальні достоїнства теорії і суб'єктивні заслуги Айнштайна нечувані і не можуть ні з чим зрівнятися. Зі сміливістю і логічністю філософського розуму, котрі ніколи раніш не зустрічалися у науковця-природника, з математичною потужністю, що викликає в пам'яті імена Гаусса і Рімана, з безпомилковим розумінням фізичної дійсності, яке він продемонстрував і в інших областях фізики, Айнштайн протягом десяти років зводив будову своєї теорії, перед якою навіть ми, ті, що давно напружено стежили за його роботою, сьогодні стоїмо вражені і приголомшені..."

Один із співробітників Айнштайна — польський фізик Леопольд Інфельд — так писав у своїй книзі "Айнштайн" про сприйняття загальної теорії відносності: "Визнання теорії відносності повільно поширювалося від фізиків-теоретиків до фізиків-експериментаторів, астрономів, математиків і філософів. Вона розглядалася як украй важкий предмет. У Кембриджі мені розповідали про доповідь із загальної теорії відносності, з яким виступав під час війни сер Артур Еддінгтон. Після доповіді один з фізиків зауважив серу Артурові: "Це була прекрасна доповідь. Ви один із трьох людей у цьому світі, хто розуміє і знає загальну теорію відносності". Коли на обличчі Еддінгтона з'явився вираз сумніву, цей фізик сказав: "Пане професоре, не варто бентежитися. Ви занадто скромні". Сер Артур відповів: "Я не збентежений, я тільки думаю над тим, хто ж третій"".

Про відношення математиків до теорії Айнштайна можна судити з таких слів Інфельда: "Один мій колега — видатний математик — висловив серйозний сумнів у тому, що сам Айнштайн — один з тих трьох людей, які найкраще розуміють теорію Айнштайна".

Однак згодом положення змінилося, і вже в 1933 році Айнштайн міг сказати:

"У світлі вже досягнутих результатів щасливо знайдене здається таким, що майже саме собою розуміється, і будь-який розумний студент засвоює теорію без великих труднощів. Позаду залишилися довгі роки пошуків у темряві, повних передчуттів, напружене очікування, чередування надій і знемоги і, нарешті, прорив до ясності. Але зрозуміє це тільки той, хто пережив усе сам".

Айнштайн і Гільберт

*Будь-який хлопчисько в Геттінгені розуміє
в чотиривимірній геометрії більше, ніж Айнштайн.
І проте якраз Айнштайн, а не математики, зробив цю роботу.
Д. Гільберт*

*Геттінгенська публіка іноді вражає мене тим, що вона
не стільки хоче кому-небудь допомогти щось ясно
сформулювати, скільки прагне показати нам,
фізикам, наскільки вона розумніша за нас.
А. Айнштайн*

Давид Гільберт і Альберт Айнштайн познайомилися влітку 1915 року. Запрошений Гільбертом, Айнштайн відвідав Геттінген, де прочитав шість двогодинних лекцій про свою, ще незавершену тоді загальну теорію відносності. Айнштайн і Гільберт дуже сподобалися один одному. "У Геттінгені в мене була велика радість: я зрозумів усе до останніх деталей. Гільберт мене зачарував. Видатна людина!" — писав Айнштайн Зоммерфельду в липні 1915 року. Гільберт був вражений красою теорії Айнштайна, на своїх лекціях він говорив про "велику ідею", яка належить Айнштайну. В тому ж 1915 році Гільберт рекомендував присудити Айнштайну премію Бояї "за високий математичний дух, що стоїть за всіма його досягненнями".



Давид Гільберт

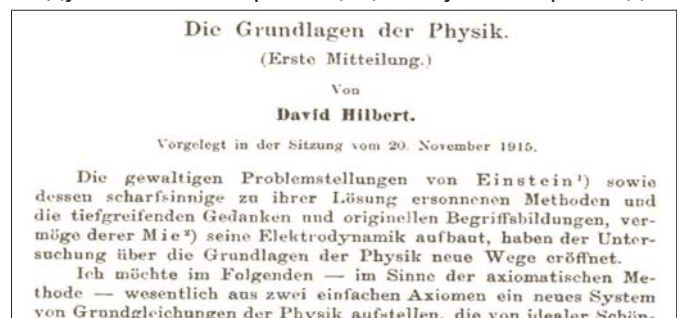
Але зрозумів усе не лише Айнштайн, але і геніальний математик Гільберт. На початку 1920-х років, побувавши у Геттінгені, Ю.Б. Румер написав: "У цей час там жив один з найвидатніших математиків усіх часів і всіх народів — Давид Гільберт, який відрізнявся безмежним тугодумством. Він до того повільно міркував, що його не пускали на жодне засідання, бо він починав задавати найдурніші запитання, що зовсім зривало роботу. Йому говорили: "Ви сидіть дома. Без Вас зрозуміють, потім прийдуть і пояснять". По черзі ходили пояснювати. Але вже якщо він розумів, то розумів чудово" [3].

Нам з цієї характеристики важливо, що Гільберт, — це один з найвидатніших математиків усіх часів і всіх народів, і те, що якщо він щось розумів, то розумів чудово. Гільберт так захопився ідеями Айнштайна, що почав інтенсивно їх розвивати. 20 листопада 1915 року Гільберт зробив доповідь у Геттінгені, у якій сформулював ті ж самі рівняння гравітації, що були викладені Айнштайном у Берліні 25 листопада. З'ясувалося, що в цей час Гільберт і Айнштайн жваво листувалися; стало відомо, що

18 листопада Айнштайн одержав копію доповіді Гільберта, зробленої ним 20 листопада.

Почалися розмови, нібито Айнштайн "підглянув" у Гільберта "правильні" рівняння. Потім знайшли оригінал доповіді Гільберта і виявилось, що в ній взагалі немає рівнянь гравітації. Таким чином, питання про "пріоритет" Гільберта відпало. Згодом з'ясувалося, що рівнянь не "знайшли" тому, що хтось акуратно вирізував з доповіді саме ті місця, де повинні були бути рівняння, і неіснуюча "проблема" знову почала жваво обговорюватися. Багатьом (невідомо чому) хочеться, щоб рівняння гравітації називалися не "рівняннями Айнштайна", а "рівняннями Гільберта—Айнштайна" чи навіть "рівняннями Гільберта". Але при цьому забувають, що Гільберт ґрунтувався на ідеях Айнштайна, про що він сам засвідчив у друкованій версії своєї доповіді, названої ним "Основи фізики" і опублікованої 31 березня 1916 року. Гільберт послався на всі 4 опубліковані доповіді Айнштайна і почав свої "Основи фізики" такими словами: "Грандіозні задачі, поставлені Айнштайном, а також дотепно розроблені для їхнього вирішення методи, його глибокі думки й утворення нових понять ... відкрили для досліджень основ фізики нові шляхи".

Нові [4] і новітні [5] матеріали з проблеми "Айнштайн—Гільберт" цікаві як у науковому, так і в психологічному відношенні. Але неупередженим і розуміючим проблему (а тому дуже нечисленним) сучасникам Айнштайна і Гільберта з самого початку було ясно, що вони у своїх дослідженнях переслідували зовсім різні цілі, тому й обрали для



Фрагмент доповіді Гільберта "Основи фізики"

досягнення цих цілей кардинально різні шляхи. І якщо Гільберт міг посміятися над математичним рівнем Айнштайна, то, у свою чергу, Айнштайн вважав "хлоп'яцтвом" програму Гільберта з "аксіоматизації" фізики, прекрасно розуміючи, наскільки фізика — наука експериментальна.

"Фізика занадто складна для фізиків!" — кепкував Гільберт і був правий, але фізика ще більш складна для математиків, зазвичай позбавлених фізичної інтуїції. Айнштайн же був генієм фізичної інтуїції, і в цьому відношенні він був і залишається недосяжним.

Про "червоне зміщення"

Пояснення має бути простим, наскільки це можливо, але не простішим!
А. Айнштайн

Ще в 1907 році Айнштайн установив: якщо фізичний об'єкт знаходиться в гравітаційному полі якого-небудь небесного тіла, то швидкість протікання усіх фізичних процесів у ньому сповільнюється і у випадку, коли небесне тіло сферичне, визначається формулою:

$$T' = T \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

Але швидкість $V = V(r)$ у цьому випадку — це швидкість, яка формально збігається зі швидкістю переміщення фізичного об'єкта з даної точки r на нескінченність (у випадку Землі ця швидкість називається другою космічною), $V_2(r) = 2GM/r$, де G — ньютонівська постійна тяжіння, M — маса небесного тіла, Таким чином, r — відстань до центра небесного тіла.

$$T' = T \sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}}$$

У цій формулі T — час, відрахований у точці простору, де гравітаційного поля немає, тобто на нескінченності, T' — час, що проходить у точці r . За останні 50 років точність виміру часу зросла приблизно в мільйон разів. Цей прогрес пов'язаний з атомними годинниками. Точність і стабільність цезієвого атомного годинника порядку 10^{-13} . Іноді потрібна ще більша точність. Тоді використовується водневий мазер зі стабільністю 10^{-15} на інтервалі кількох годин. Нині час і частота вимірюються настільки точно, що доцільно будь-які інші фундаментальні вимірювання (там, де це можливо) зводити до вимірювань часу і частоти.

У 1960 році вдалося вимірити, наскільки швидше плине час на висоті $H = 20$ м порівняно з перебігом часу на поверхні Землі.

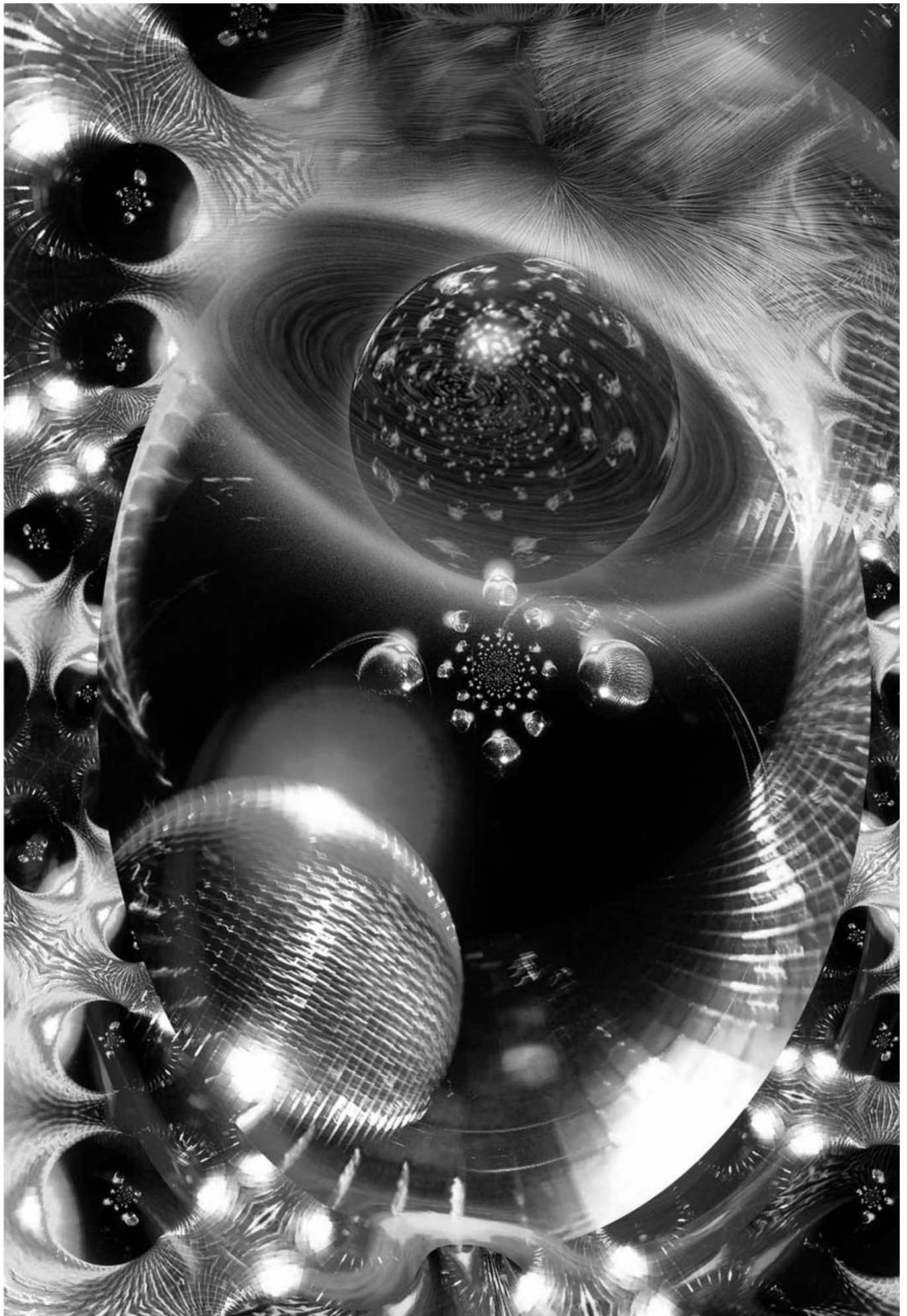
Цей ефект визначається простою формулою (g — прискорення вільного падіння):

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta \omega}{\omega} = \frac{gH}{c^2} = \frac{9,8 \times 20}{(299792458)^2} \approx 0,000000000000002 = 2 \cdot 10^{-15},$$

де ω і $\Delta \omega$ — частота фотона, що випромінюється яким-небудь ядром чи атомом, та зміщення цієї частоти. Для того, щоб перевірити цю формулу, Р. Паунд і Г. Ребка вимірили вплив гравітаційного поля на частоту переходу в атомному ядрі ^{57}Fe . Ядро, що знаходилося на поверхні Землі, випускало фотон. Ядро, що знаходилося на висоті 20 м, було не здатне поглинути цей фотон, оскільки частота переходу зміщувалася на величину $\Delta \omega$. А ядра того чи іншого конкретного ізотопу можуть мати переходи з випромінюванням або поглинанням фотонів тільки на одній і тій самій для обох випадків, характерній для даного ізотопу, частоті. Зміщення ж $\Delta \omega$ порушувало цю умову резонансу. Тут мова йде про так звані мессбауерівські ядра, що "вморожуються" у кристал і поглинають та випромінюють фотони, не відчуваючи віддачі. Для того, щоб відновити резонанс (за рахунок ефекту Допплера), "верхнє" ядро переміщували вниз із деякою швидкістю V такою, що $V/c = \omega/\Delta \omega$. Вимірюючи V , знаходили $\omega/\Delta \omega$.

Як це не дивно, але в літературі цей експеримент і, взагалі, розглянутий нами ефект "червоного зміщення" часто трактується неправильно. У серйозних книгах і статтях дуже серйозні автори пишуть, що фотон, піднімаючись вгору, "червоніє", оскільки зменшується його енергія, а отже, і частота. Але це не так: фотон не "червоніє", а більш "червоним" випускається. Докладне роз'яснення цього питання можна знайти в порівняно недавній статті [6], наприкінці якої автори справедливо пишуть: "Оскільки гравітаційне червоне зміщення є одним з наріжних каменів загальної теорії відносності, то як з теоретичної, так і з експериментальної точок зору дуже важливо, щоб його пояснювали максимально просто, але при цьому правильно".

Довгий час спеціальна та загальна теорії відносності вважалися далекими від повсякденного життя, хоча й визнавалися небезпідставно перлинами людської думки. Але уже в наші дні обидві теорії Айнштайна використовуються, наприклад, водіями, зокрема для запобігання наїзду на пішоходів уночі. Справа в тім, що для визначення координат водіїв та пішоходів використовується супутникова ГПС (глобальна позиційна система), а якщо не враховувати уповільнення часу за ефектами спеціальної та загальної теорій відносності, то похибки при визначенні координат дорівнюватимуть декільком кілометрам.



Слава і самотність Айнштайна

Чому всесвітня цікавість обрала своїм об'єктом мене — вченого, який займається абстрактними речами і щасливого, коли йому дають спокій? Це один із проявів психології мас, недоступних моєму розумінню. Жахливо, що так сталося. Я страждаю від цього більше, ніж можна собі уявити.
А. Айнштайн

Чи можете ви зрозуміти, що я стомився скрізь фігурувати як символічний ватажок баранячої череди з німбом над головою? Дайте, нарешті мені спокій!
А. Айнштайн

Навесні 1919 р. дві англійські експедиції (одна в Бразилії, друга на острові Принсіпі біля берегів Африки), спостерігаючи зорі під час сонячного затемнення, підтвердили передбачене Айнштайном у 1915 р. відхилення променя світла (на 1,75"), обумовлене гравітаційним полем Сонця.

До Айнштайна прийшла світова слава.

Як свідчив його сучасник А. Мошковський у 1920 році: "Це було щось небувале. Загальне здивування пронеслося хвилиною по всьому світі... Ніяке ім'я не повторювалося в цей час так часто, як ім'я цієї людини. Усе померкло перед універсальною темою, що опанувала людством... Дами забули про свої домашні турботи і розмовляли про координатні системи, про принцип одночасності і від'ємно заряджені електрони... Відносність стала пануючим, все пояснюючим словом... Вже одна думка: серед нас є живий Копернік, — містила в собі щось звеличуче".



Айнштайн, 1920 р.

Наприкінці ХХ ст. Айнштайна було обрано "людиною століття", його ідеї геометризації фізики знайшли блискуче втілення в сучасній фізиці елементарних частинок. 2005-й рік був оголошений "Роком фізики" на честь його епохальних робіт 1905 року.

Але наукова доля самого Айнштайна склалася так, що після надзвичайно яскравих триумфів в молодості другу половину життя він провів практично в повній науковій

самотності. Дж. Гамов, який близько знав Айнштайна, писав у своїй "Біографії фізики":

"Досягнувши таких значних результатів, Айнштайн направив усю свою енергію на спроби геометризувати електромагнітне поле. Яка, ще невідома, геометрична властивість чотиривимірного простору-часу могла б проявлятися у вигляді електромагнітних взаємодій? І сам Айнштайн, і багато інших учених (наприклад, знаменитий німецький математик Герман Вейль) намагались інтерпретувати електромагнітне поле в чисто геометричних категоріях. Але дітище Джеймса Кл. Максвелла — електромагнітне поле — з типово шотландською завзятістю не бажало піддаватися

геометризації. Майже сорок років, до своєї смерті в 1955 році, працював Айнштайн над так званою єдиною теорією поля, тобто теорією, що геометрично поєднує поля — гравітаційне й електромагнітне. Проте роки минали, а проблема уявлялася усе більш безнадійною. Час від часу Айнштайн повідомляв про нові рівняння, що (як він стверджував) повинні були б розв'язати проблему єдиної теорії поля. Ці складні тензорні рівняння друкувалися на перших сторінках "Нью-Йорк Таймс" та інших газет усього світу. Однак рівняння завжди виявлялися недосконалими, про них забували і чекали нових.

Фізики-теоретики — старі і молоді — поступово зневірялися в можливості чисто геометричної інтерпретації електромагнітного поля. Було б чудово, якби вдалося це зробити, але не можна змусити природу зробити те, що їй не притаманне. Водночас фізика швидко просувалася у нових відкритих областях, і до класичних полів — гравітаційного та електромагнітного — додалися нові поля, введені хвильовою механікою. Бажаючи надати електромагнітному полю чисто геометричну інтерпретацію, ми повинні не забувати мезонних, гіперонних і багато інших нових полів, щоб мати можливість сказати: фізика — це тільки геометрія. Під час одного зі своїх візитів в Англію, на початку 1930-х років, Айнштайн прочитав лекцію про єдину теорію поля в одній із жіночих шкіл у північній Англії (дирекція школи зберегла до сьогодні дошку із записами складних тензорних виразів), але відмовився обговорювати цю теорію в університеті в Кембриджі. Сам Айнштайн ставав усе більш дратівливим, коли мова заходила про його роботу, і неохоче обговорював її з іншими фізиками. Увагу Айнштайна все більше привертала проблема сіонізму і боротьби за мир, але його наукові таланти залишалися такими ж блискучими, як і раніше. Коли я під час Другої світової війни відвідував Айнштайна в його тихому будинку в Принстоні, то знаходив його завжди повним чарівності; було багато повчальних і цікавих розмов про всілякі досягнення сучасної фізики. На столі Айнштайна лежали розкидані аркуші паперу, заповнені складними тензорними виразами, що стосувалися, безсумнівно, єдиної теорії поля. Але про це Айнштайн ніколи не говорив. Зараз він, напевно, в раю і певно знає, чи на правильному шляху він знаходився, намагаючись геометризувати фізику".

Останні 22 роки свого життя Альберт Айнштайн прожив у США, у невеликому університетському містечку Принстоні (штат Нью-Джерсі, кілометрів 40 від Нью-Йорка). Мешканці Принстона пишуться



Айнштайн у Принстоні

тим, що в їхньому місті жив і працював геніальний вчений. Айнштайн запам'ятався їм не лише як великий фізик, але ще й як людина, яка захоплювалася плаванням на яхті і була далеко не байдужою до котячого племені. Вони не дивувалися, коли Айнштайн проходив немалу відстань, щоб відвідати знайому кішку з котятками (у самого Айнштайна в будинку бувало до 30 котів).

Принстонцям було відомо, що колись, дуже давно, він зробив щось дуже важливе в науці. Одного разу Айнштайн навіть привернув до себе увагу однієї з мешканок Принстона як учений. Дівчинка, якій ніяк не давалася арифметика, раптово стала виявляти несподівані успіхи з цього предмету. Мамі дівчинка пояснила, що вона якось почула, що в місті живе професор, який добре розбирається в арифметиці. Довідавшись, де він живе, прийшла до нього, і з тих пір вони роблять

уроки разом. "Зовуть його, здається, Айнштайном чи якимось дуже схоже", — сказала дівчинка.

Варто зауважити, що діти за межами Принстона знали більше про те, хто такий Айнштайн. У 1946 році Айнштайн одержав листа з Кейптауна: "Мені було б слід давно Вам написати, якби знати, що Ви ще живі. Я історією не дуже цікавлюся, і мені здавалося, що Ви жили у вісімнадцятому столітті чи щось подібне до цього. Для мене переплуталися Ви і сер Ісаак Ньютон..." Айнштайн відповів: "Любий... Спасибі тобі за лист від 10 липня. Приношу вибачення за те, що ще живу. Утім це поправно...Щиро твій..." Айнштайн не зрозумів, що лист писала дівчинка, і одержав відповідь: "Я забула повідомити Вам, що я дівчинка. Завжди шкодувала про це, але тепер більш-менш примирилася... Я зовсім не розчарована тим, що Ви живі..." Айнштайн відповів: "Нічого не маю проти того, що ти дівчинка, але головне все-таки полягає в тому, що ти саме не проти. Та й немає причин..."

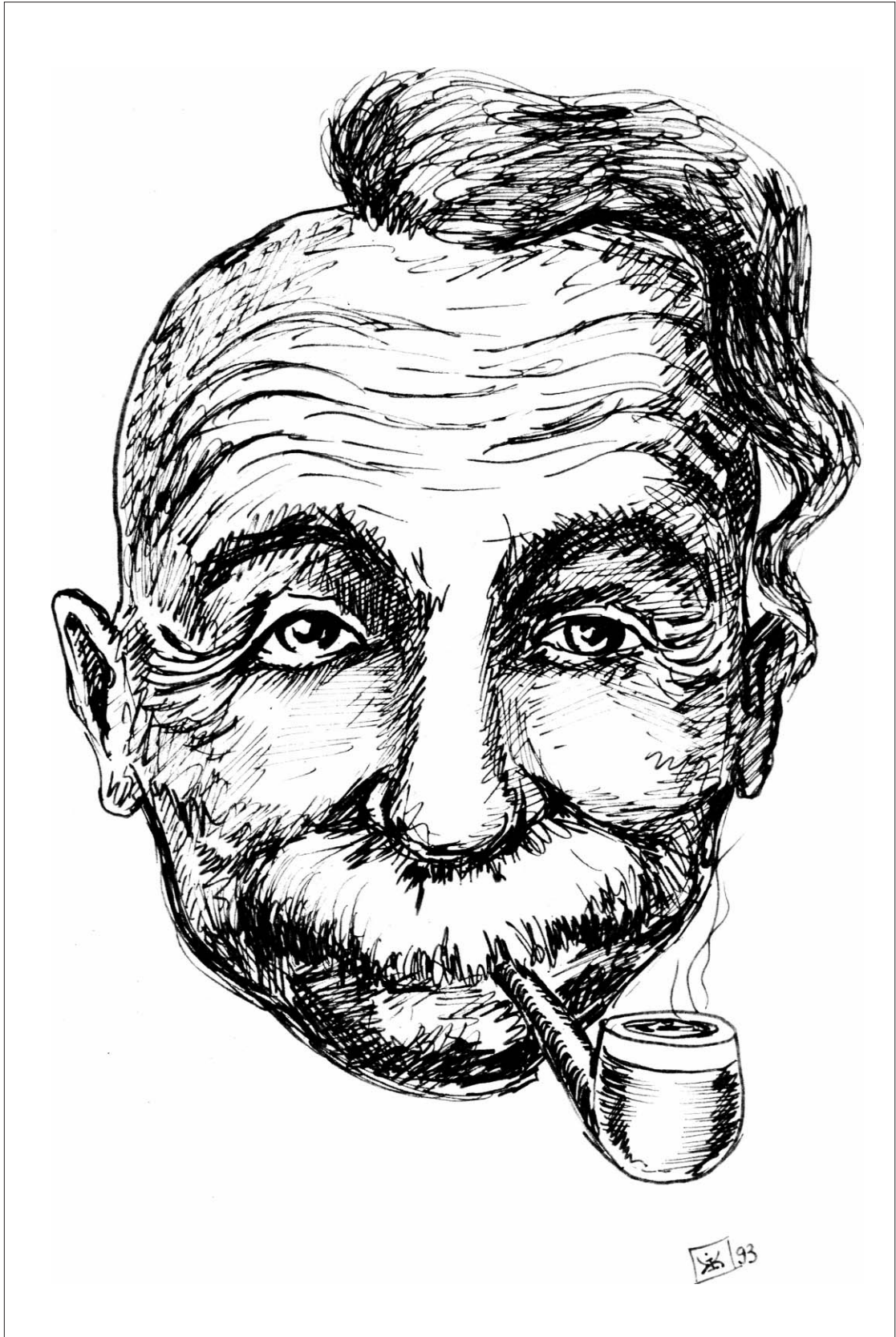
Почуття гумору не залишало Айнштайна до кінця його днів. Коли незадовго перед смертю лікарі запропонували його прооперувати, він відмовився, сказавши, що "може вмерти і без сторонньої допомоги", що він і зробив 18 квітня 1955 року, незабаром після того, як йому виповнилося 76 років.



Пам'ятник Айнштайну у Вашингтоні

ЛІТЕРАТУРА

1. Окунь Л. Б. Понятие массы (масса, энергия, относительность) // УФН. — 1989. — Т. 158, вып. 3. — С. 511—530.
2. Голдберг С. Молчание Пуанкаре и теория относительности // Эйнштейновский сборник, 1972. — М.: Наука, 1974. — С. 341—358.
3. Румер Ю. Б. Рассказы Юрия Борисовича Румера // УФН. — 2001. — Т. 171, № 10. — С. 1137—1142.
4. Визгин В. П. Об открытии уравнений гравитационного поля Эйнштейном и Гильбертом (новые материалы) // УФН. — 2001. — Т. 171, № 12. — С. 1347—1363.
5. Логунов А. А., Мествиришвили М. А., Петров В. А. Как были открыты уравнения Гильберта—Эйнштейна? // УФН. — 2004. — Т. 174, № 6. — С. 663—678.
6. Окунь Л. Б., Селиванов К. Г., Телегди В. Л. Гравитация, фотоны, часы // УФН. — 1999. — Т. 169, № 10. — С. 1141—1147.
7. Эйнштейн А. Собрания научных трудов, ТТ. I—IV. — М.: Наука, 1964. — 1967.
8. Пайс А. Научная деятельность и жизнь Альберта Эйнштейна. — М.: Наука, 1989. — 568 с.
9. Зелиг К. Альберт Эйнштейн. — М.: Атомиздат, 1966. — 232 с.
10. Рид К. Гильберт. — М.: Наука, 1977. — 368 с.



Ігор Жук. "Козацький" портрет Айнштейна