

Симбіоз фундаментальних досліджень та розвитку технологій: приклад квантової фізики



COLLÈGE
DE FRANCE
—1530—

Серж Арош
Київ, травень 2018



Для чого потрібні наукові дослідження?

щоб задовольнити свою допитливість щодо Природи
(фундаментальні дослідження)?

або

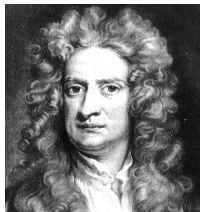
щоб досягти чогось корисного та задовольнити "соціальні"
запити (прикладні дослідження)?

Політики часто схиляються до короткострокової "корисності" та
вважають довгострокову допитливість за "розкіш"...

Історія науки показує нам, яким недалекоглядним це є:
фундаментальні дослідження та розвиток технології є двома
сторонами однієї монети, які не можуть бути відокремлені.

Основні дослідження керуються виключно допитливістю, як це показують великі відкриття природи світла та матерії

Фундаментальні питання до світла (хвилі чи частинки? яка його швидкість?)...



Ньютон



Гюйгенс



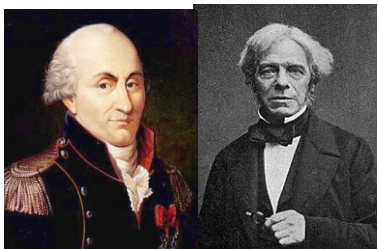
Френель



Фізо

...призвели до великих відкриттів:

...та фундаментальні питання до матерії (як вона проводить струм та проявляє магнітні властивості? як взаємодіє зі світлом?)...

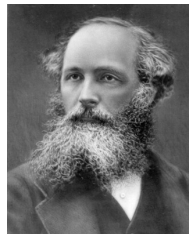


Кулон

Фарадей



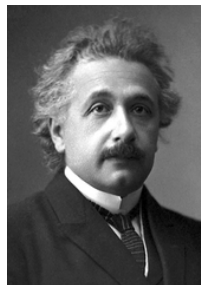
Ампер



Максвел



Планк



Ейнштейн



Бор

Світло – це електромагнітна хвиля, що розповсюджується зі швидкістю, незалежною від спостерігача, і в той самий час є набором частинок (фотонами) з енергією та імпульсом.

Матерія складається з атомів, в яких електрони знаходяться на дискретних енергетичних рівнях навколо ядра та мають малий магнітний момент....

Світло та матерія підкоряються дивним законам з суперечливими наслідками (суперпозиція, заплутаність)

Квантова фізика та
Реальність

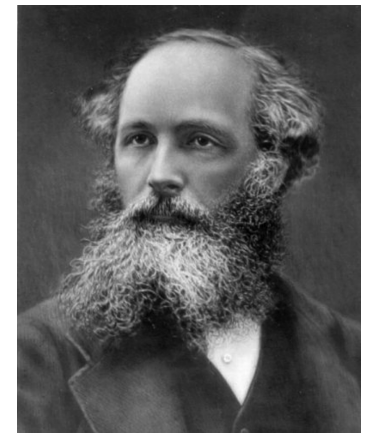
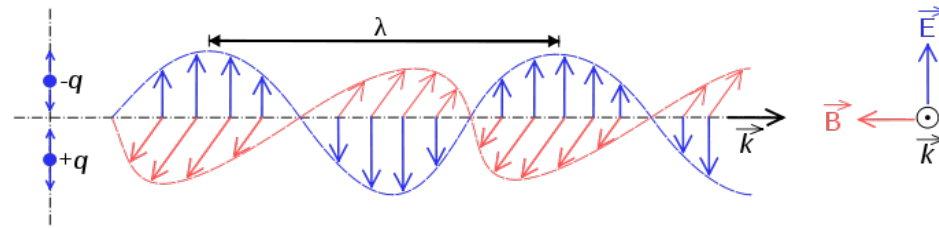
Вчені, які зробили ці великі відкриття, не мали жодної уяви про те, до чого вони були б корисними...

...але вони призвели до інновацій, що змінили наше життя, спосіб отримання енергії, можливості комунікації, збереження та обробки інформації, вивчення матерії, проведення медичної діагностики, тощо...

Ці застосування часто з'являлися цілком випадково з комбінації досягнень з різних фундаментальних досліджень після довгого часу "дозрівання"

Давайте-но переглянемо декілька прикладів

Електромагнітна хвиля:
Електричне та магнітне
поля підпитують одне
одного



Максвел

1865

Фізо

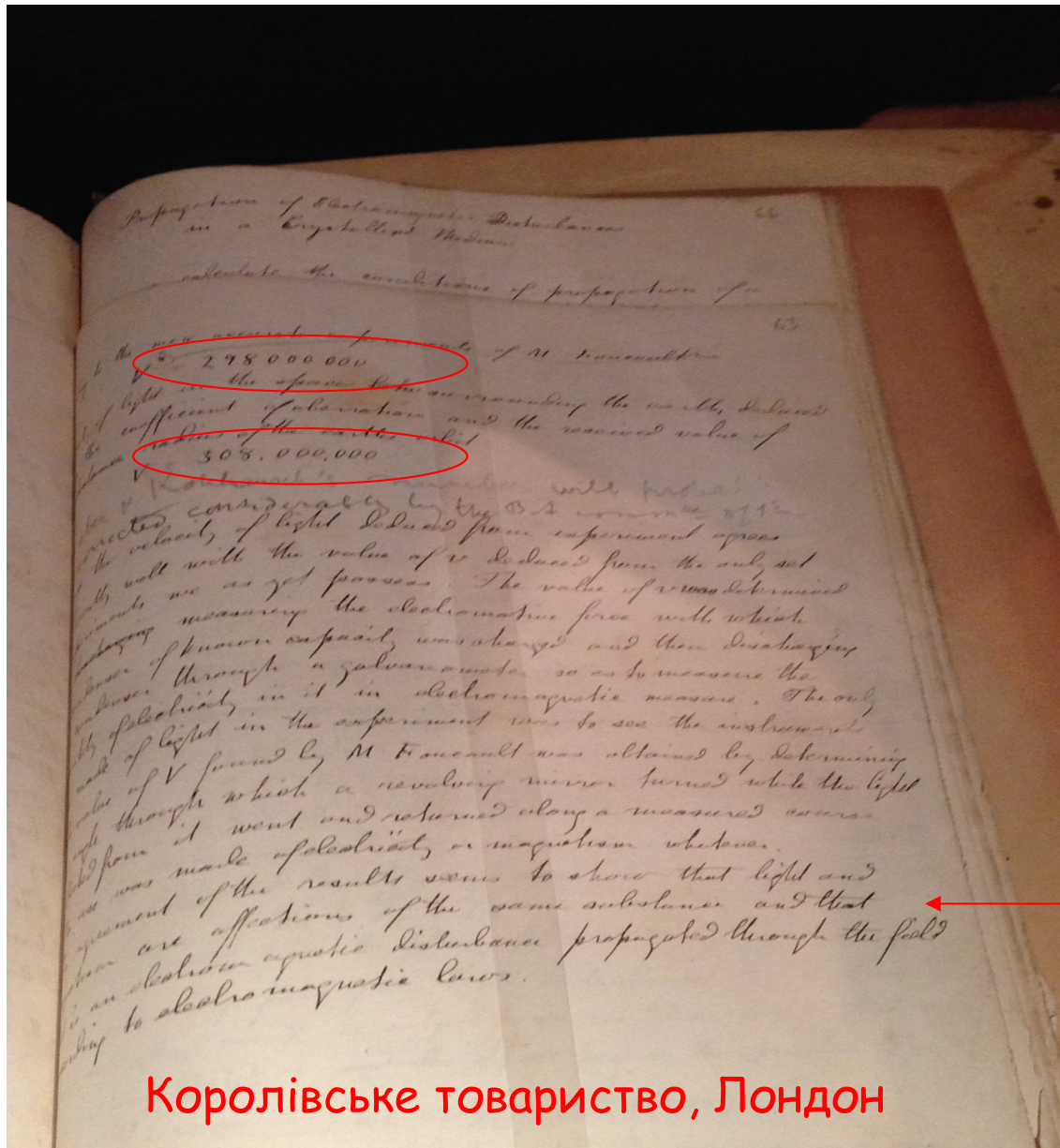
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon\mu}}$$

Кулон

Ампер

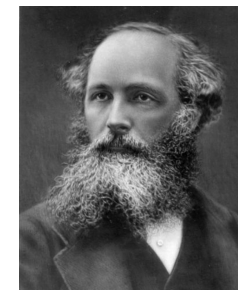
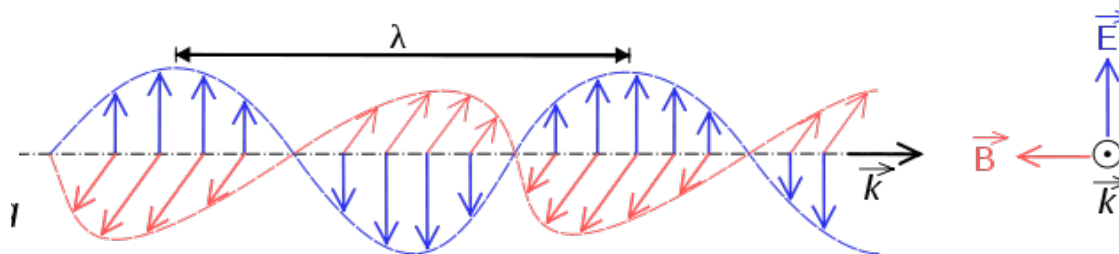
A Blue Sky Discovery:

"Узгодження результатів показує,
що струм та магнетизм є
проявами однієї сутності та що
світло - це електромагнітне
збудження, що розповсюджується
через поле згідно законам
електромагнетизму"

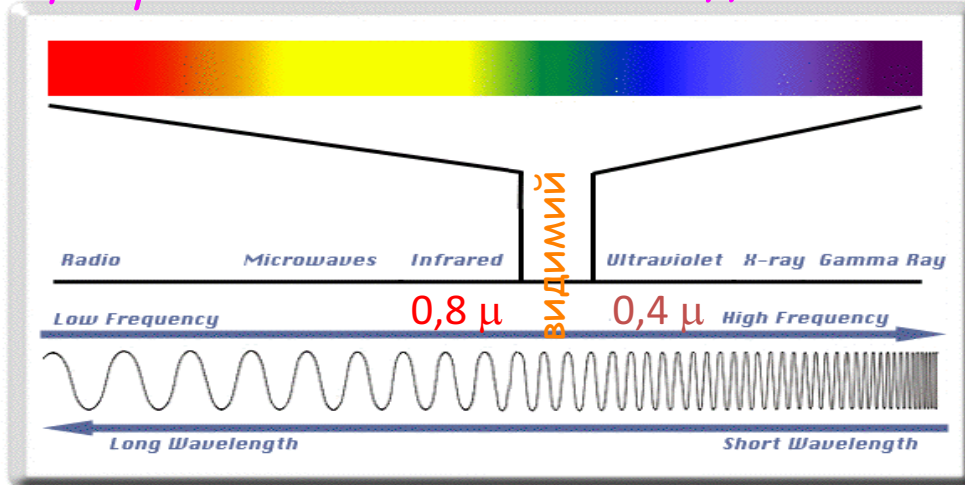


Королівське товариство, Лондон

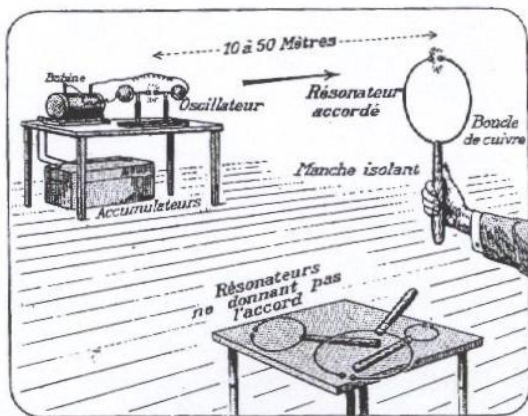
Світло - це електромагнітна хвиля (1865)...



...що простягається за межі видимого спектру



радіохвилі (1885)



Герц

Технологічна революція:
радіозв'язок, мікрохвильові
застосування, рентгенівська
медична діагностика, тощо...

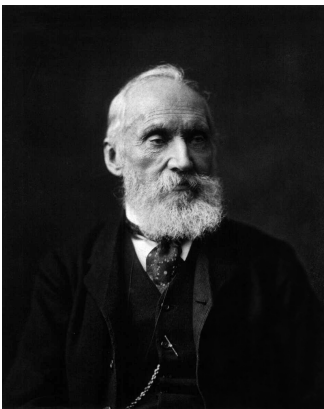
...та нові питання, що
привели до Релятивізму
та Квантової фізики

Рентгенівські
хвилі (1895)



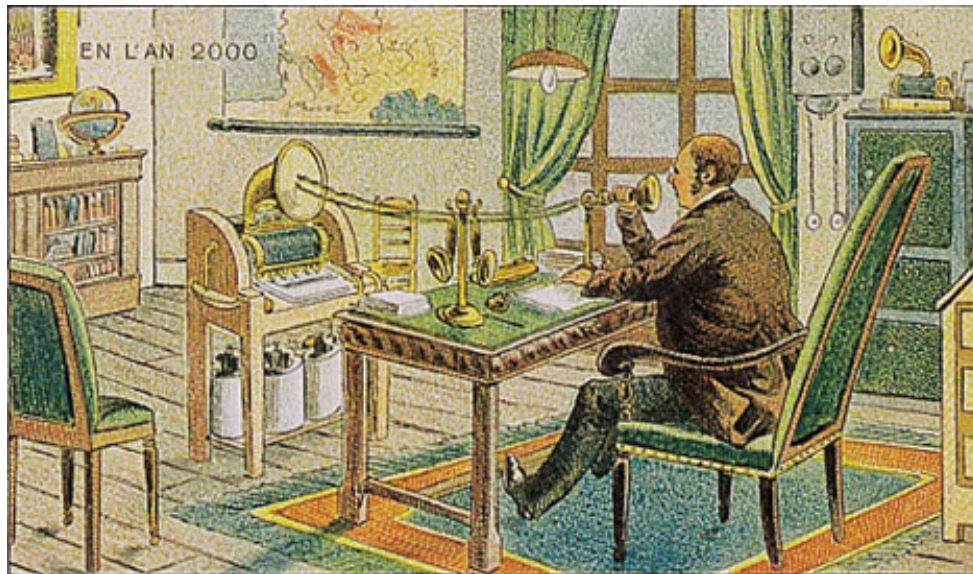
Рентген



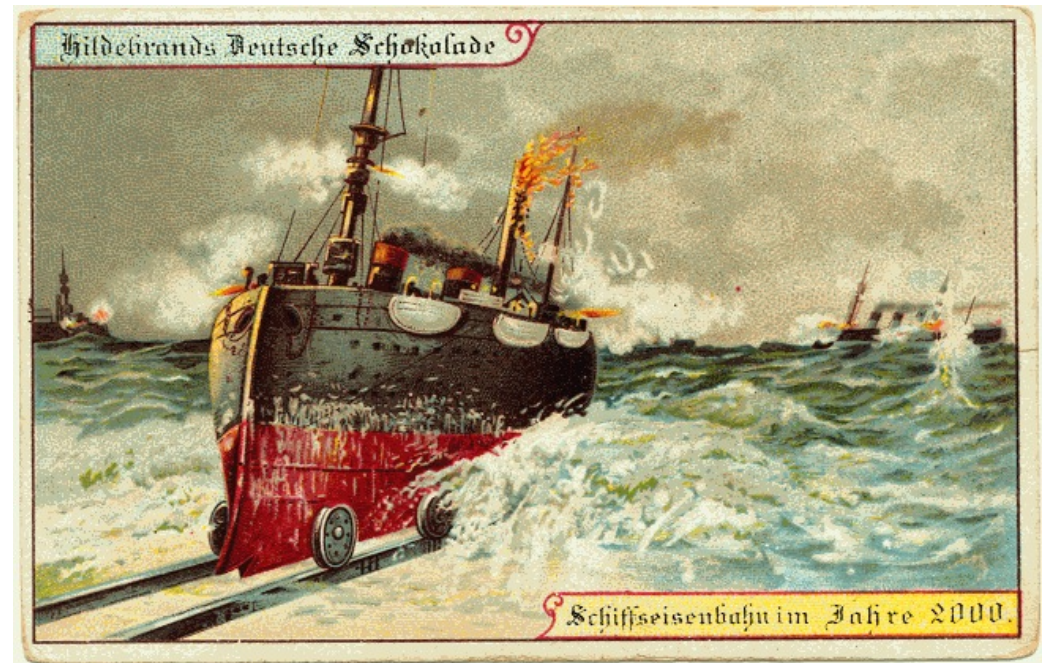


Лорд Кельвін

Сучасні технології
були за межами
уяви фізиків
"доквантової" ери



Наївні пророцтва 1900
року зроблені стосовно
майбутніх технологій
20-го століття



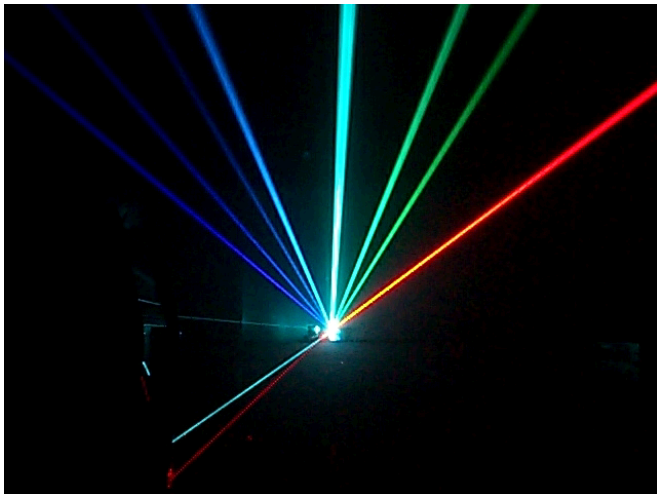
Приклади квантових технологій, абсолютно неочікуваних в 1900 році



Комп'ютери



Атомні годинники
та GPS



Лазери

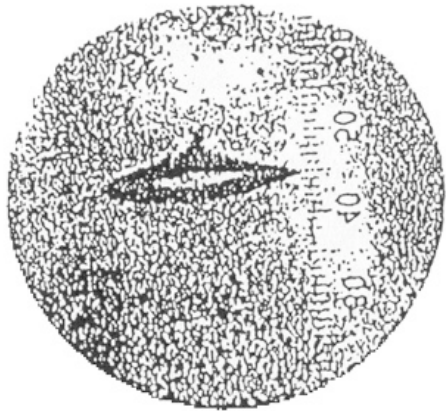


МРТ сканери

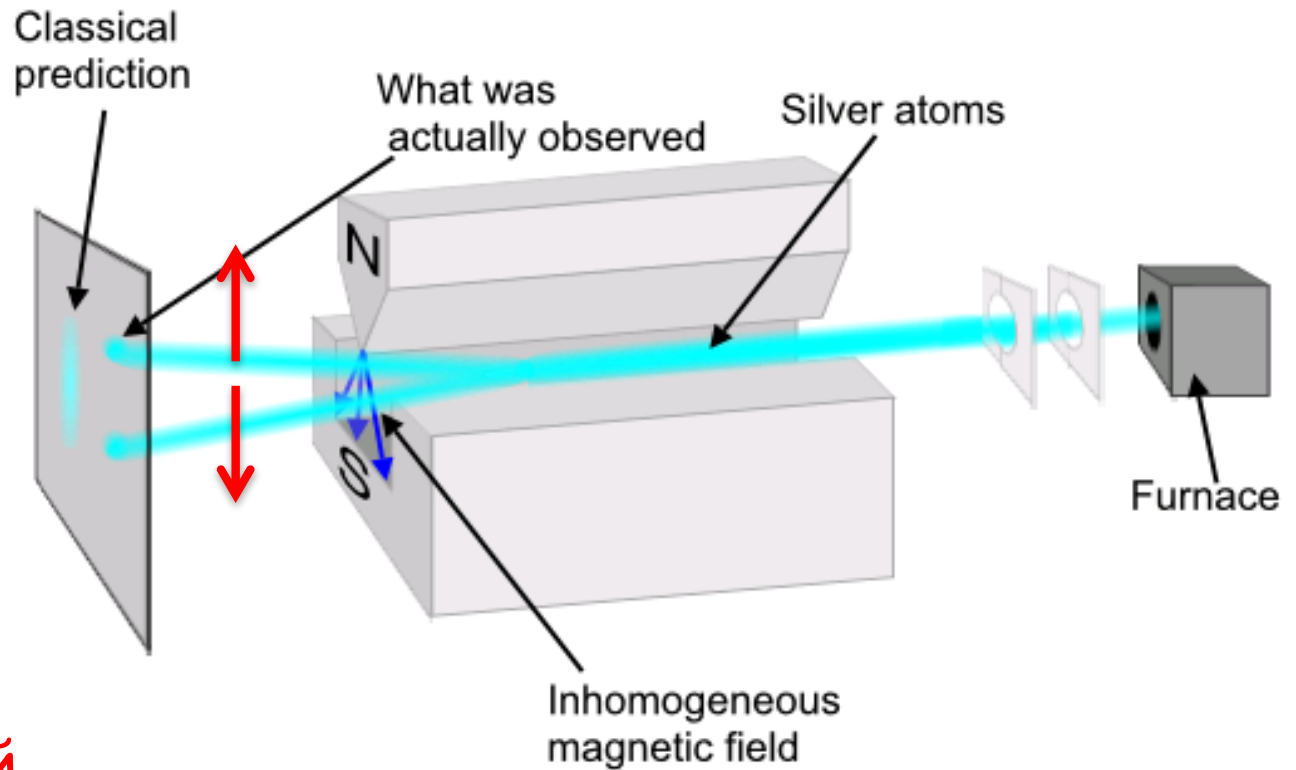


О. Штерн

Почалося з елементарного відкриття: Штерн та магнітний момент електрона (1922)

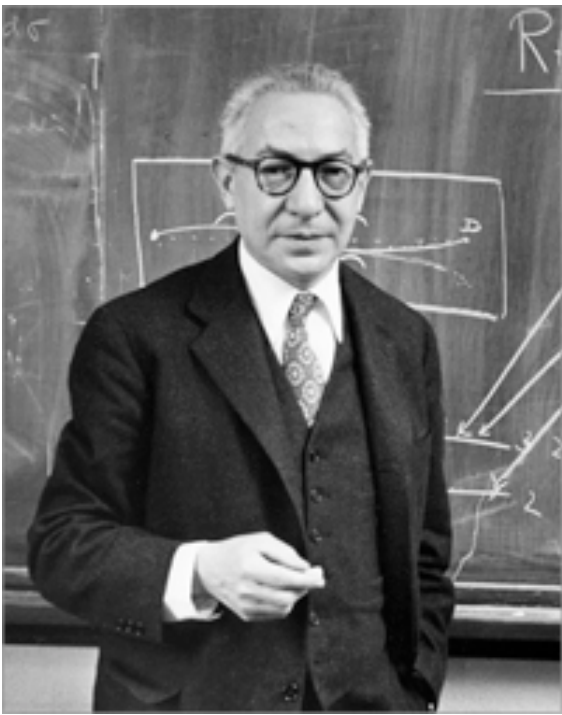


Простий роздвоєний слід, що спричинив квантову технологічну революцію!



Магнітний момент є квантованим

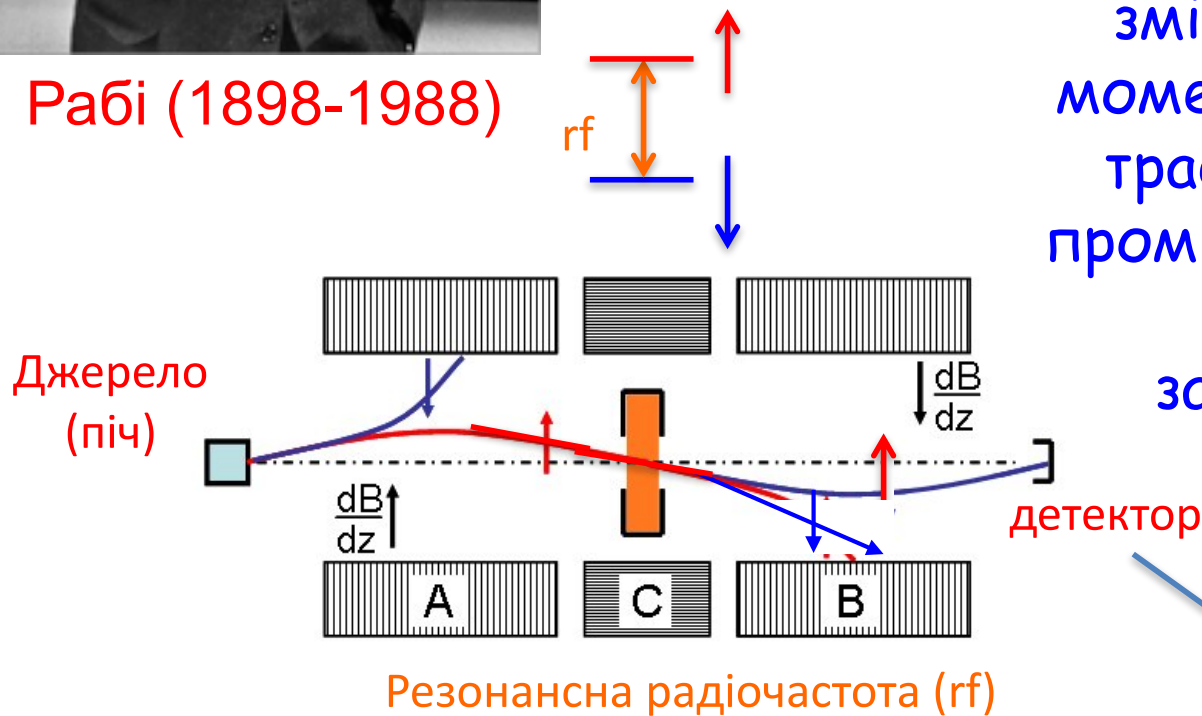
Установка розчіпляє магнітні моменти (спіни), орієнтовані вгору та вниз



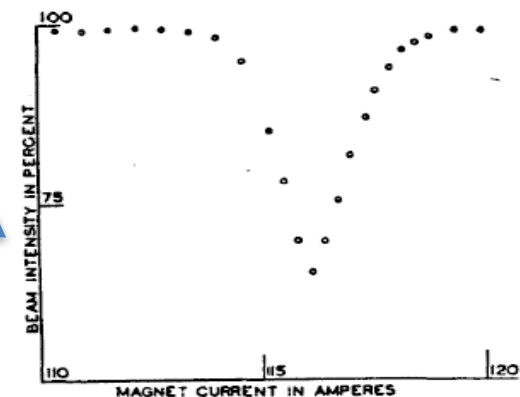
Рабі (1898-1988)

Більше фундаментальної науки: Рабі та метод радіочастотного молекулярного проміння для вимірювання магнітного моменту ядра

Резонансне радіочастотне поле змінює напрям магнітного моменту (зона C), відхиляючи траєкторію молекулярного проміння (зона B) в магнітному полі та зменшуючи задетектований сигнал.



Відкриття Рабі відкрило шлях до МРТ, атомних годинників, GPS та лазерів....



Пророцький заголовок

We're All Radio Stations, Columbia Scientists Report

*All Atoms, in Humans or in Steel, Found
to Emit and Receive Long Waves*

COLUMBUS, Ohio, Dec. 29 (AP).—Every living thing on earth is a radio broadcasting and receiving set unconsciously sending out and receiving long-wave wireless messages.

Professor C. I. Rabl, Dr. P. Kusch and Dr. S. Millman of Columbia University told the American Association for the Advancement of Science today that all

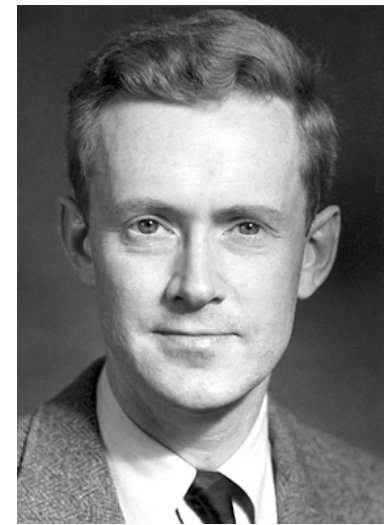
New York Post, Грудень 1939



Ф. Блох

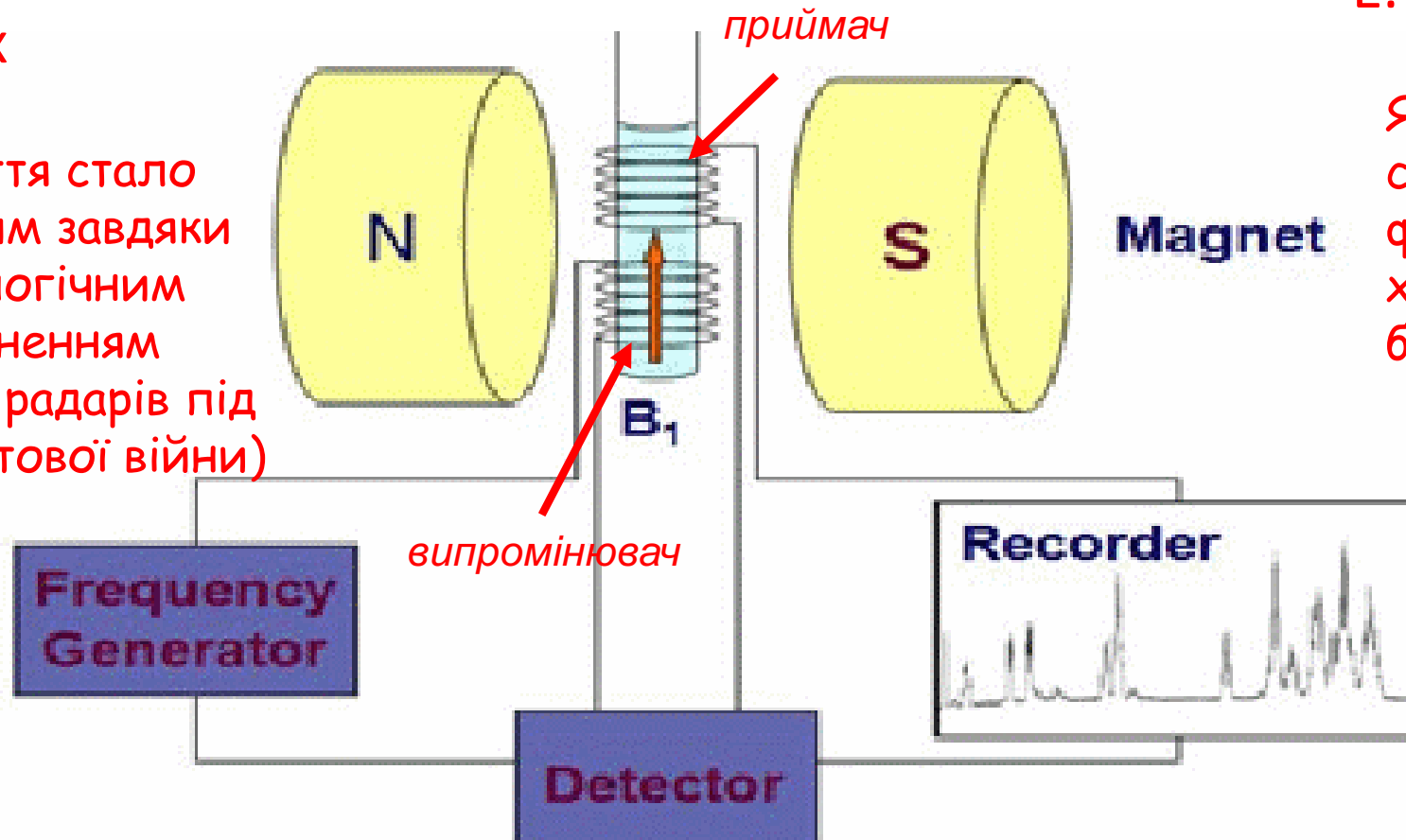
Відкриття стало
можливим завдяки
технологічним
досягненням
(розробка радарів під
час 2-ї Світової війни)

Ядерний магнітний резонанс (ЯМР) 1945



Е. Пурсел

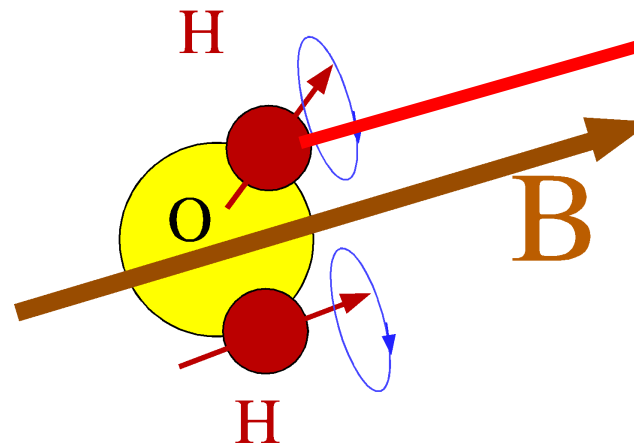
ЯМР
сенсори в
фізиці,
хімії,
біології...



Неочікуване застосування: Магнітно-резонансна томографія (МРТ)



Атоми водню мають
дворівневу магнітну
структуру з різницею
енергій, що пропорційна
до прикладеного
магнітного поля



$$E_e - E_f = h \gamma B$$
$$= h \nu_{rf}$$

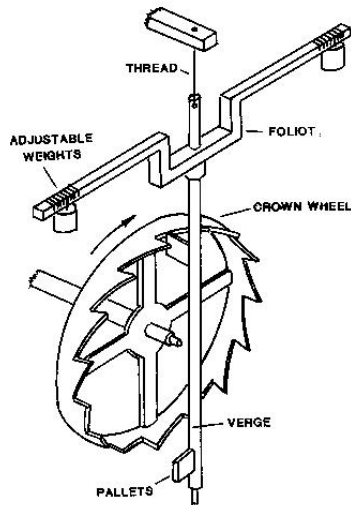
Розсіювання радіохвиль різної частоти
в неоднорідному магнітному полі
робить можливим тривимірне
зображення людського тіла



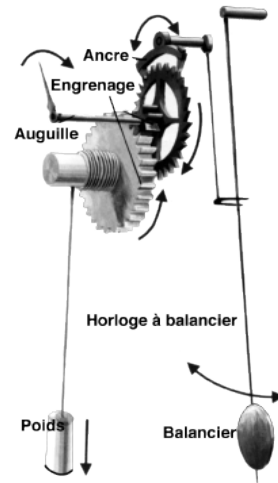
Статичне та динамічне спостереження
за мозком....

Дослідження роботи мозку та
вивчення походження свідомості

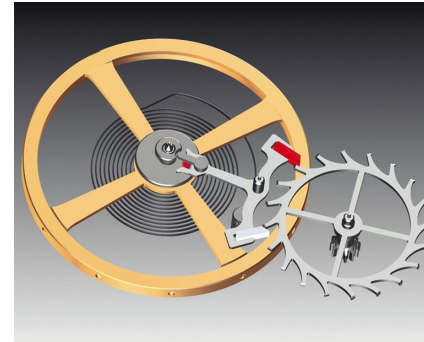
Коротка історія вимірювання часу



14 століття
Баштовий
годинник



17 століття
Маятник
(Галілей, Гюйгенс)



18 століття
Морський годинник
та кишеньковий
годинник
(Хук, Харісон)



1920's
Кварцовий
годинник
(п'єзоелектр.
ефект)

Відносна точність

10^{-2}

10^{-4}

10^{-6}

10^{-8}

Загальний принцип: осцилятор з'єднаний з пристроєм, що рахує періоди осциляцій (чим вища частота, тим краще)

Величезний прогрес дякуючи атомному осцилятору: Звичайний цезієвий годинник досягає точності 10^{-14} , тоді як вдосконалені годинники з використанням лазерів мають точність 10^{-18} (похибка менше секунди за час життя всесвіту!)



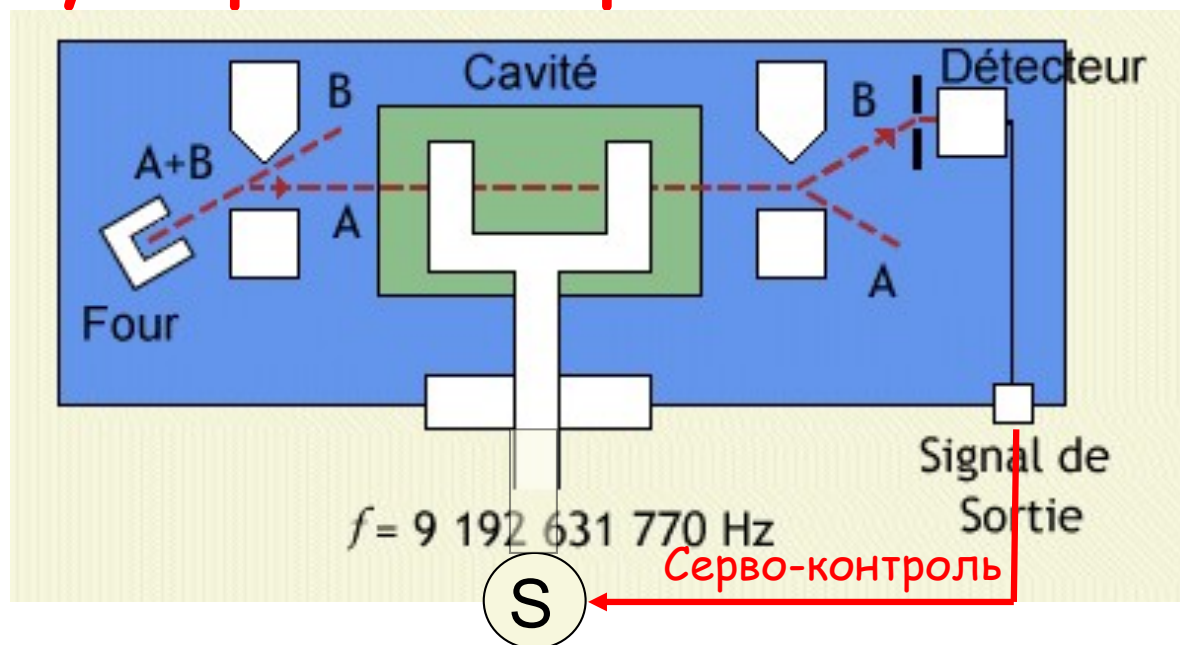
Н. Рамзей
(студент Рабі)

Цезієвий годинник

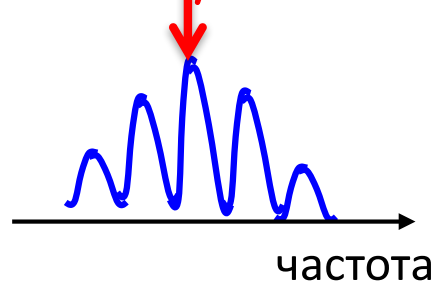
Коливання електронів в атомі більш стабільні за коливання маятника, пружини чи, навіть, кварца!

Точність близько 10^{-14}
(1 секунда на мільйон років!)

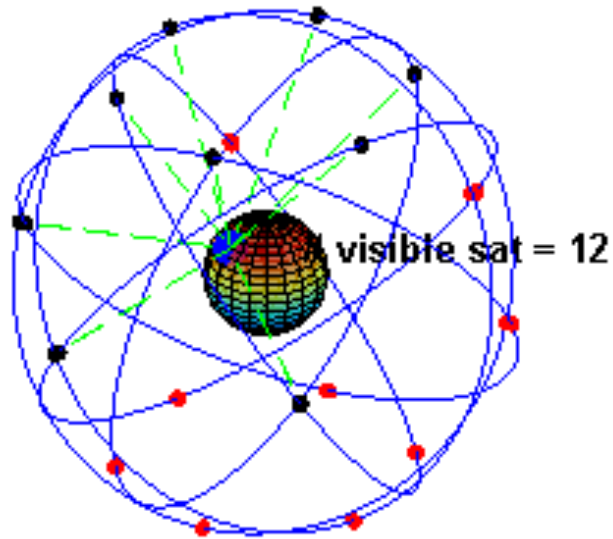
Мікрохвильовий атомний годинник перероблений з молекулярного променя Рабі



Промін Цезію опромінюється подвійним мікрохвильовим імпульсом: резонанс проявляється у вигляді смуг Рамзея



Безпосереднє використання атомного годинника: GPS



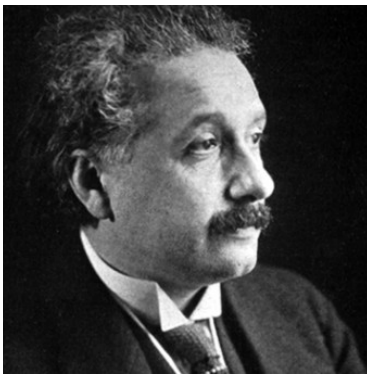
Тріангуляція сигналів
отриманих від декількох
синхронізованих атомних
годинників розміщених в
супутниковій мережі

точність близько 1 метра!

GPS використовує принципи квантової фізики та поправки спеціальної та загальної теорії відносності.

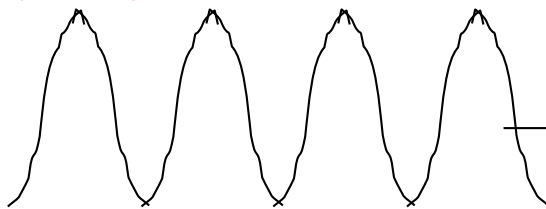
Без релятивістських поправок, GPS помилявся б на декілька кілометрів і тому був би абсолютно непридатний!



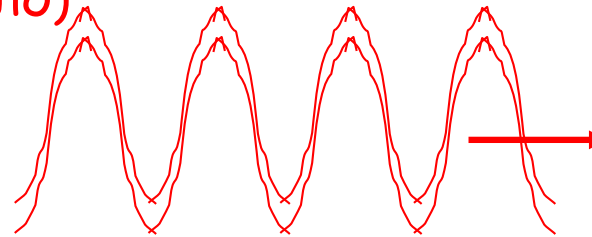


Стимульоване випромінювання світла: ще одне відкриття без очевидної користі...

Ейнштейн
(1916)



Підсилення (стимульоване
випромінювання: світло
"викликає" світло)



Один фотон викликає випромінювання
другого ідентичного фотона, і так далі...

атом
в збудженому стані

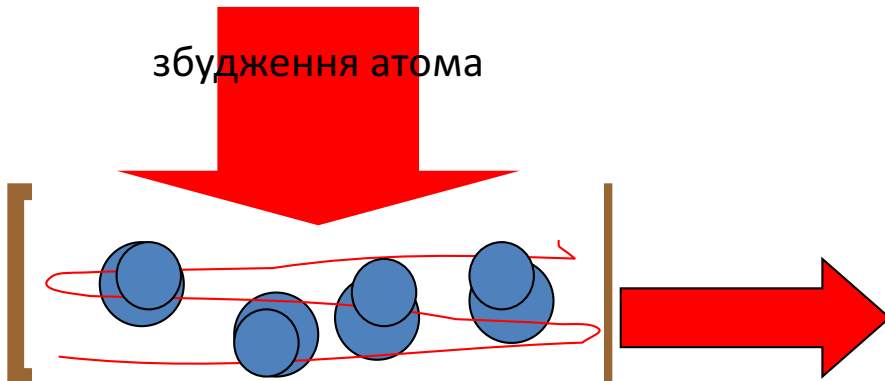


спонтанне
випромінювання
фотона
(Бор, 1912)



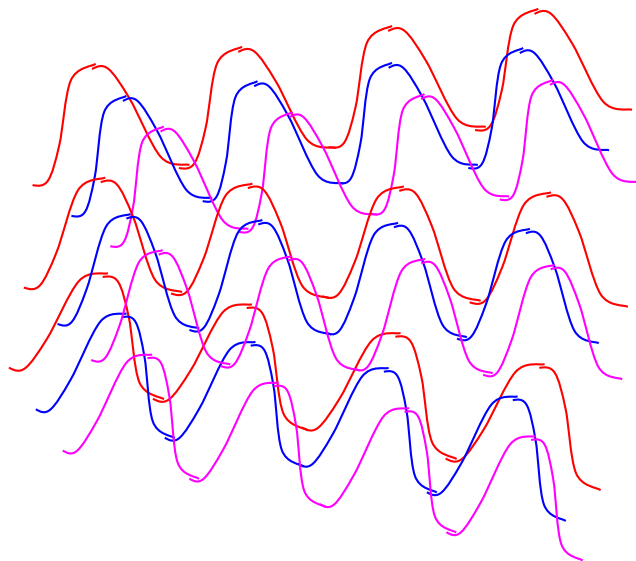
...що призвело до виникнення мазера, а трохи згодом і до лазера

збудження атома

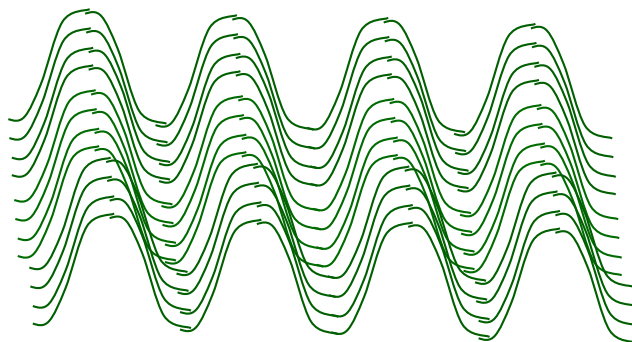
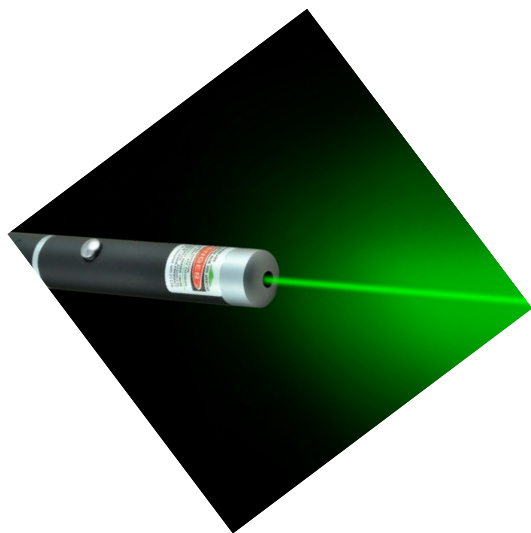


Світло між дзеркалами підсилюється
збудженими атомами. Частина світла
витікає через вихідне дзеркало:
лазерний промінь

Класичне світло проти лазерного

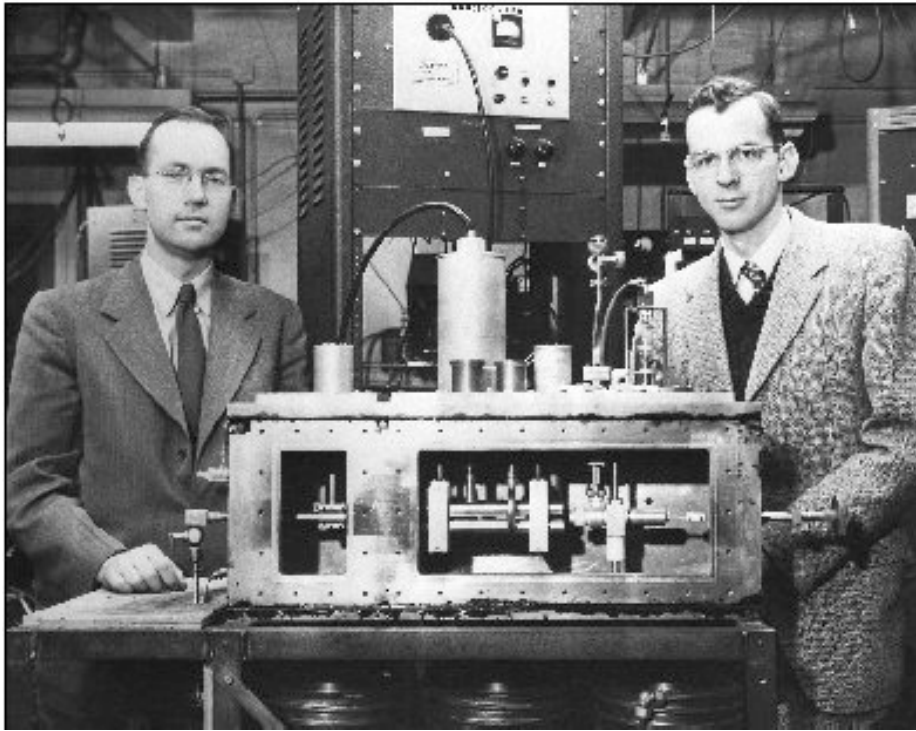


Класичне світло (Сонце, лампа):
атоми випромінюють **незалежно**
один від одного з **різною фазою** та
дисперсією за частотою та
напрямком



Лазерне світло: атоми
випромінюють світло
“порціями” з однаковою
фазою, частотою та
напрямком.

Це -приборкане світло



Тоунс та Гордон в
Колумбійському
університеті (1954) перед
своїм аміачним
променем, що створив
перше мазерне
випромінювання

Знову почалося в мікро-
хвильовому діапазоні!

Перший мазер (Microwave Amplifier by Stimulated Emission of Radiation)

Варіант променевої установки
Рабі, що випромінює
когерентні мікрохвилі на
молекулярних переходах

Яка з цього користь?

Лазер, фантастичне приручене світло

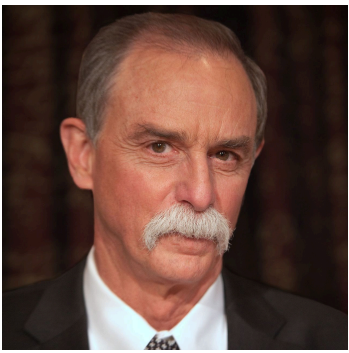
Інтенсивне, направлене, монохроматичне, когерентне...

Плавка та випаровування матерії, охолодження та утримання атомів: лазери можуть досягти найвищих температур, що існують всередині зірок,... а також створити найхолоднішу речовину у Всесвіті (конденсат Бозе-Ейнштейна)

Надстабільний світовий промінь осцилюючий без жодного відхилення протягом мільйонів кілометрів... або надкороткі світові імпульси недовші за кілька нанометрів, що проходять через матерію за декілька аттосекунд (одна мільярдна однієї мільярдної секунди).

Дуже гнучкий інструмент для фундаментальних досліджень у фізиці, хімії, біології, а також для застосування в метрології, медицині, зв'язку, тощо

Ми розглянемо лише три області: маніпулювання окремими атомними системами для квантової інформації, надточні атомні годинники та детектування гравітаційних хвиль



Д. Вайнланд

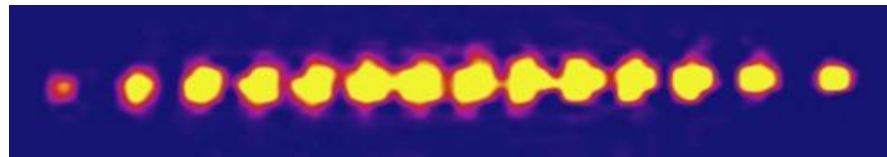
Використання лазерів для контролю за окремими атомами:
5 іонів Берилію в лабораторії Девіда Вайнланда (2000)...

Кожен атом –
це дворівневий
квантовий біт
(кубіт)...

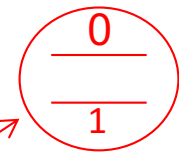
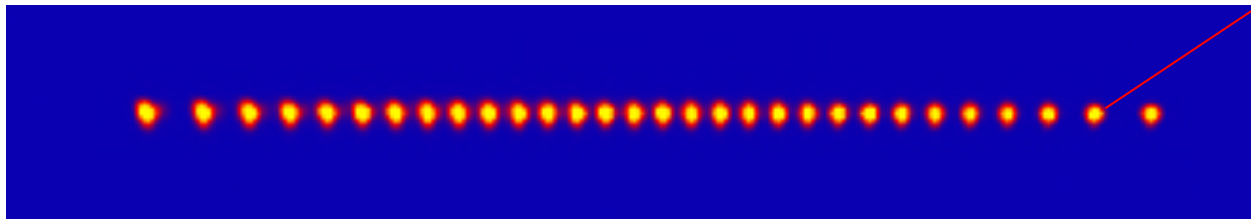


... який може бути
в суперпозиції
двох станів:
0 та 1

... та 14 і 30 іонів Кальцію в лабораторії Р. Блата в Інсбруці (2012-2013)



$2^{30} \sim$
1 мільярд
станів!



2012

Атомна рахівниця для квантової інформації

Збудженні лазером Рідберівські атоми дозволяють нам вивчати взаємодію між світлом та матерією на самому фундаментальному рівні

ENS-Collège de France, Paris

Один атом взаємодіє з одним або декількома фотонами в коробці



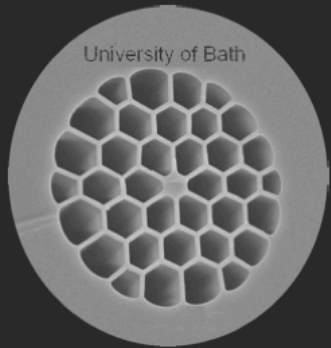
Послідовність атомів пролітаючи через резонатор зв'язується з його полем та отримує інформацію про утримане світло, не поглинаючи його фотони

Фотони утримуються протягом 1/10 секунди!

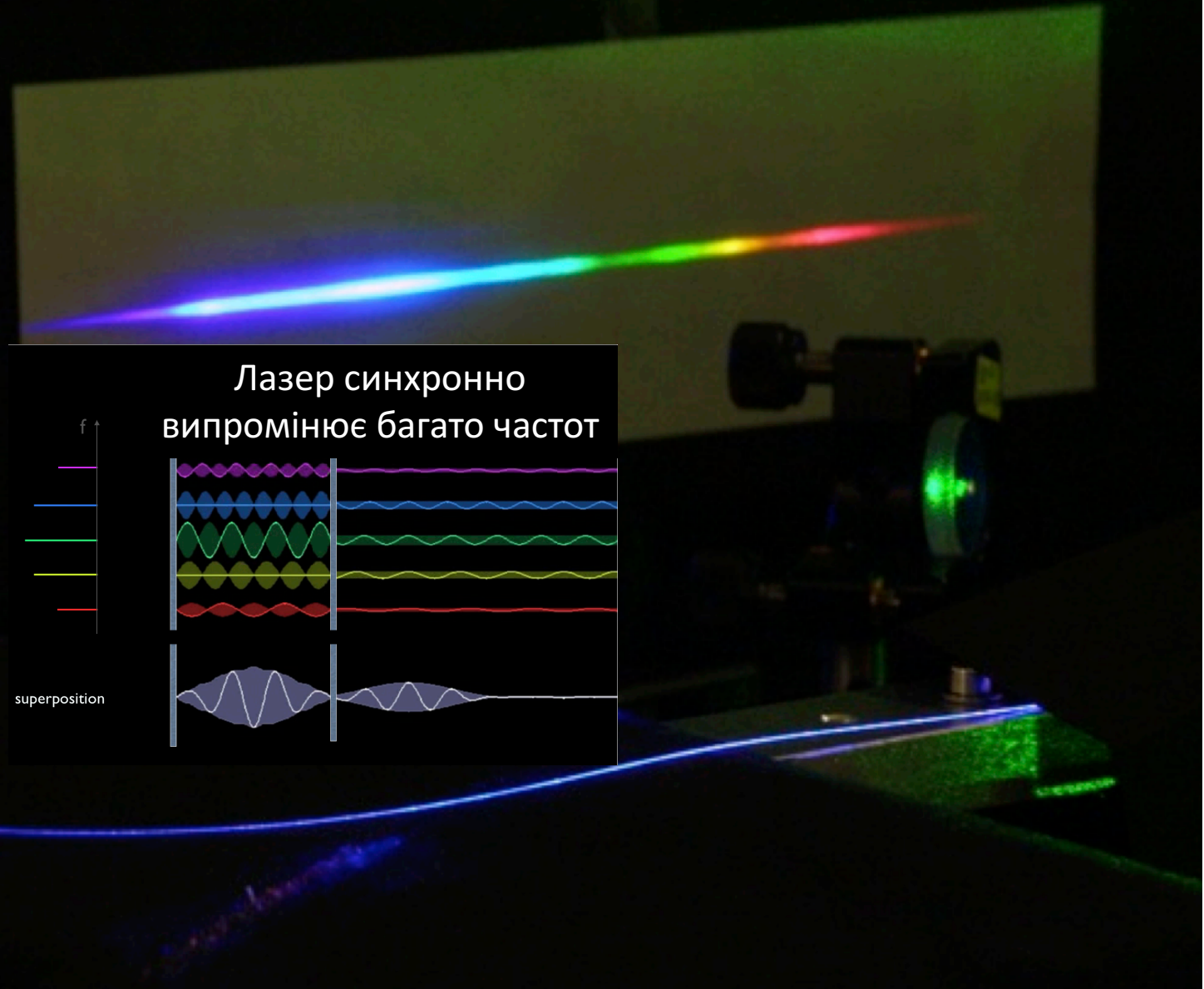
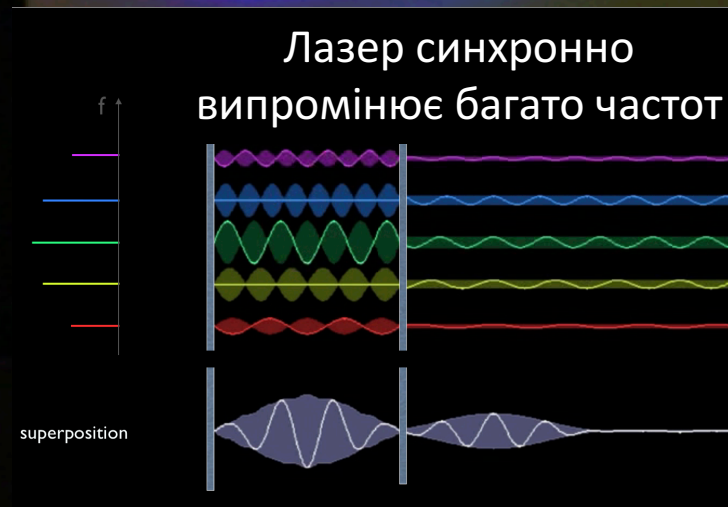


2012

Синтезатор оптичної частотної гребінки



Структуроване оптичне волокно розширює світловий спектр до однієї октави: $\sim 100\,000$ окремих частот рознесених на кілька GHz



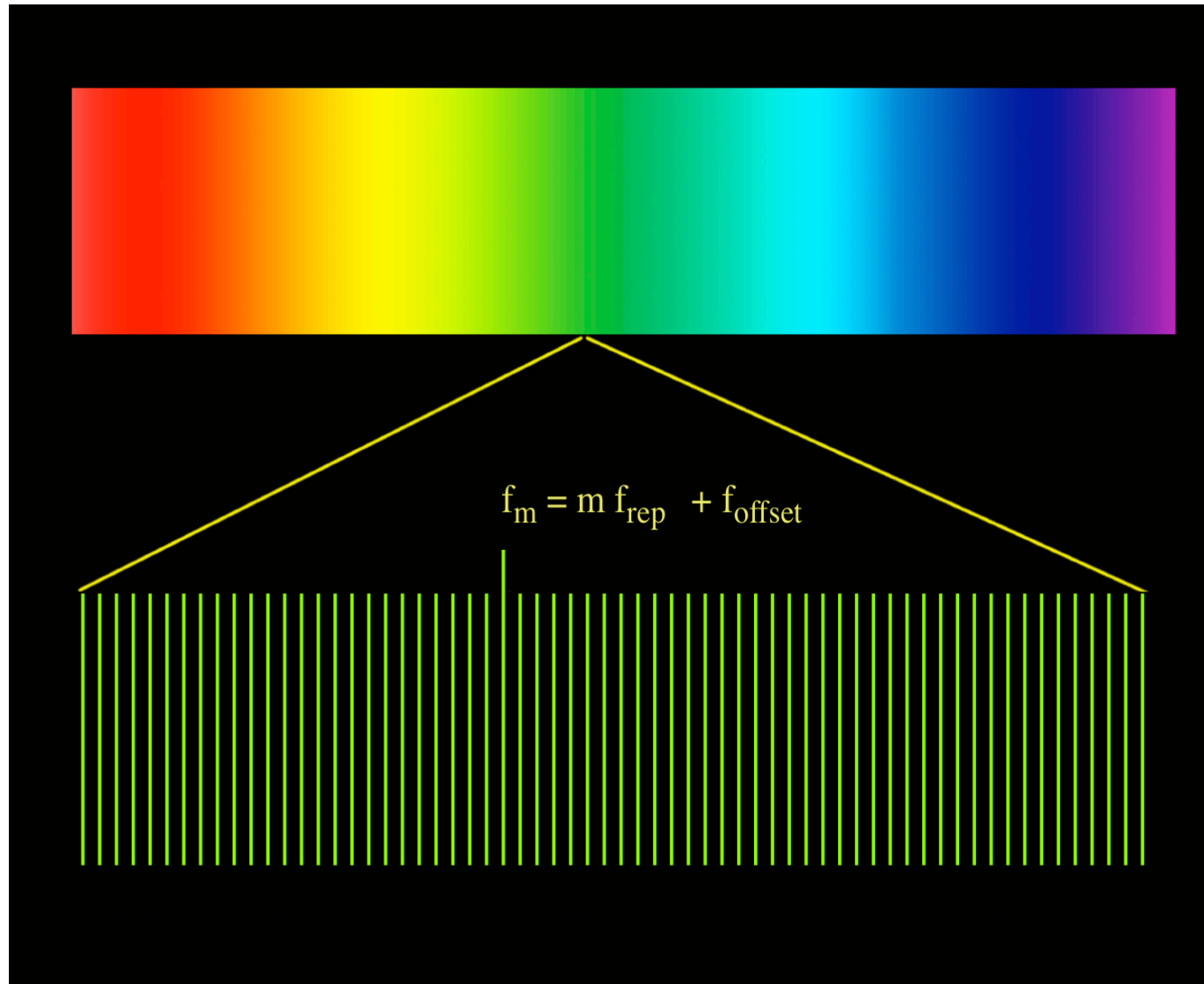


Т. Хенш



Дж. Хол

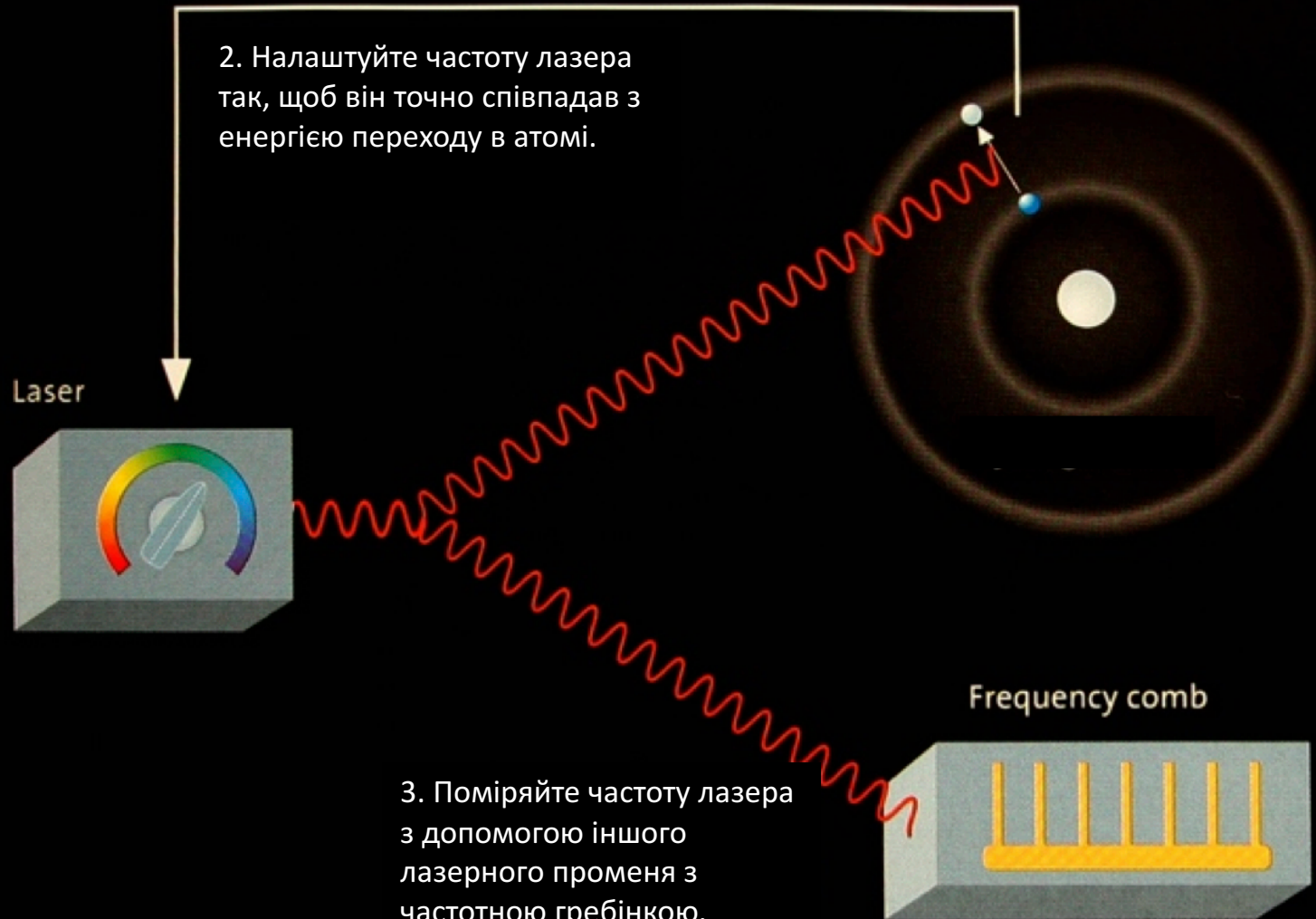
Ідеальне рішення для оптичного годинника: частотна гребінка



“Лінійка”, що покриває цілу частотну октаву

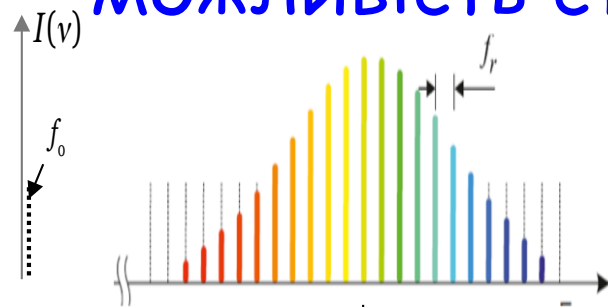
Вимірювання частоти атома з допомогою частотної гребінки

1. Візьміть стабільний лазер та розділіть його промінь навпіл.

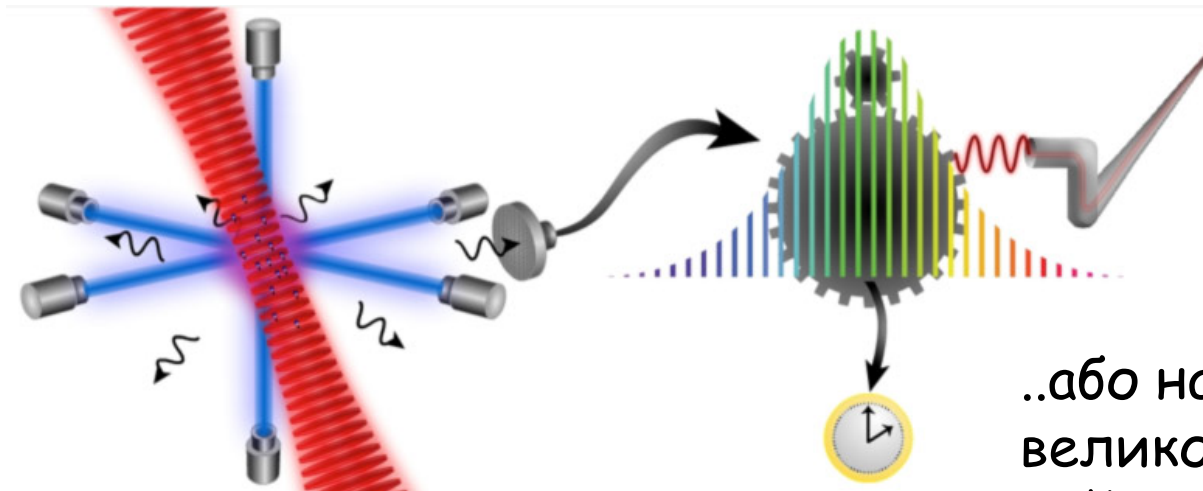
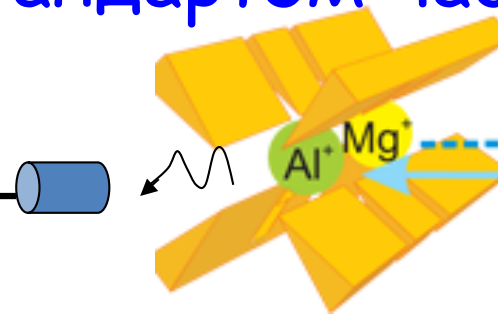


Лазерна гребінка стабілізована на атомному оптичному переході поводить себе як надзвичайно точний зчитувальний механізм годинника

Два типи оптичних годинників, які змагаються за можливість стати новим стандартом часу



Стабілізуючи частотну гребінку на оптичний перехід окремого іону Hg або Al в іонній пасці (NIST...)



Точність

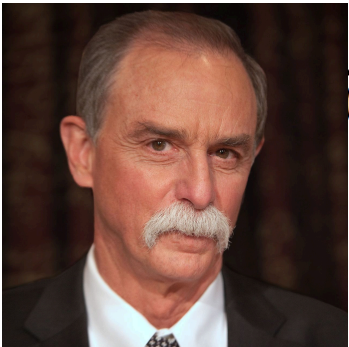
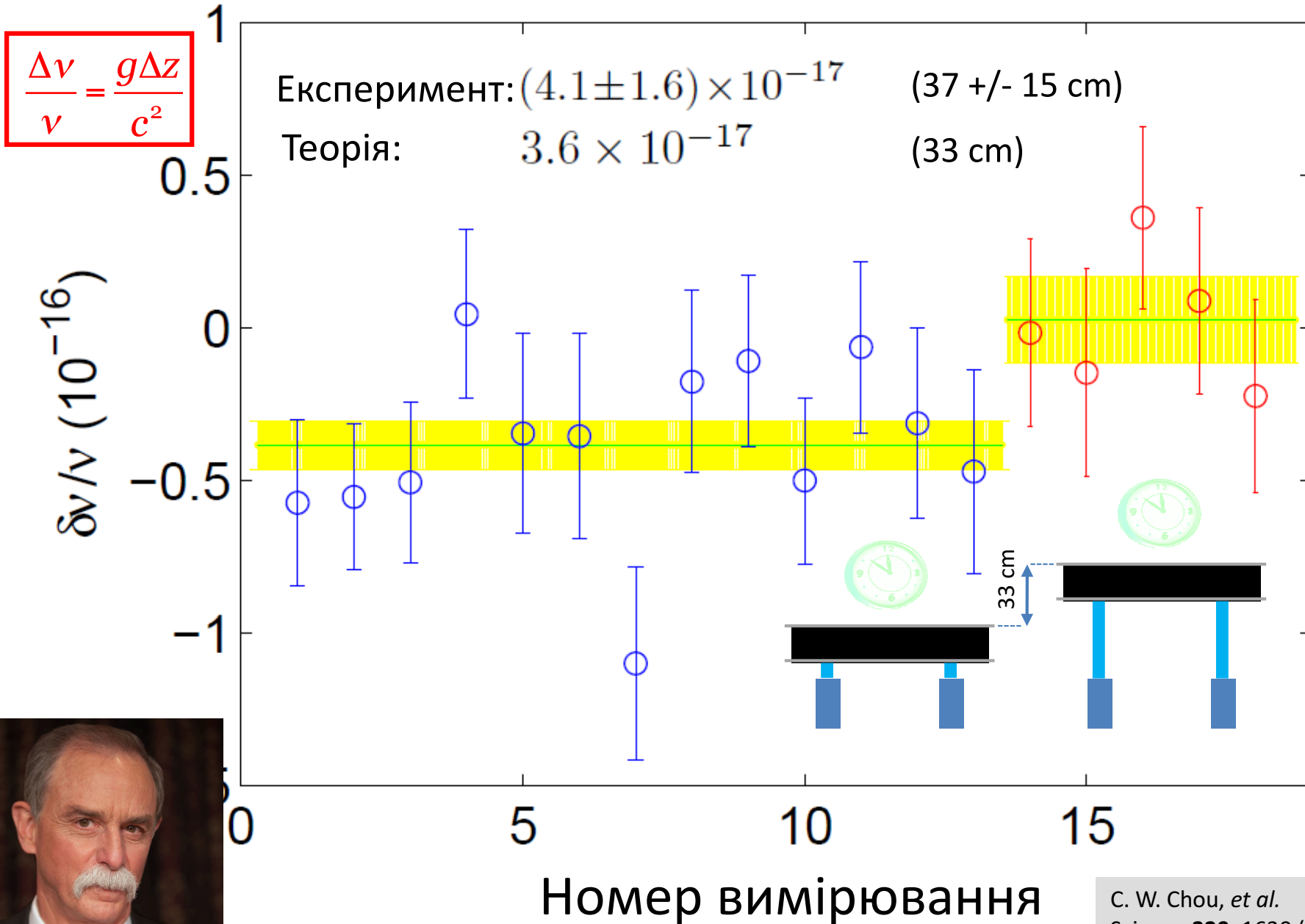
$10^{-17} - 10^{-18}$

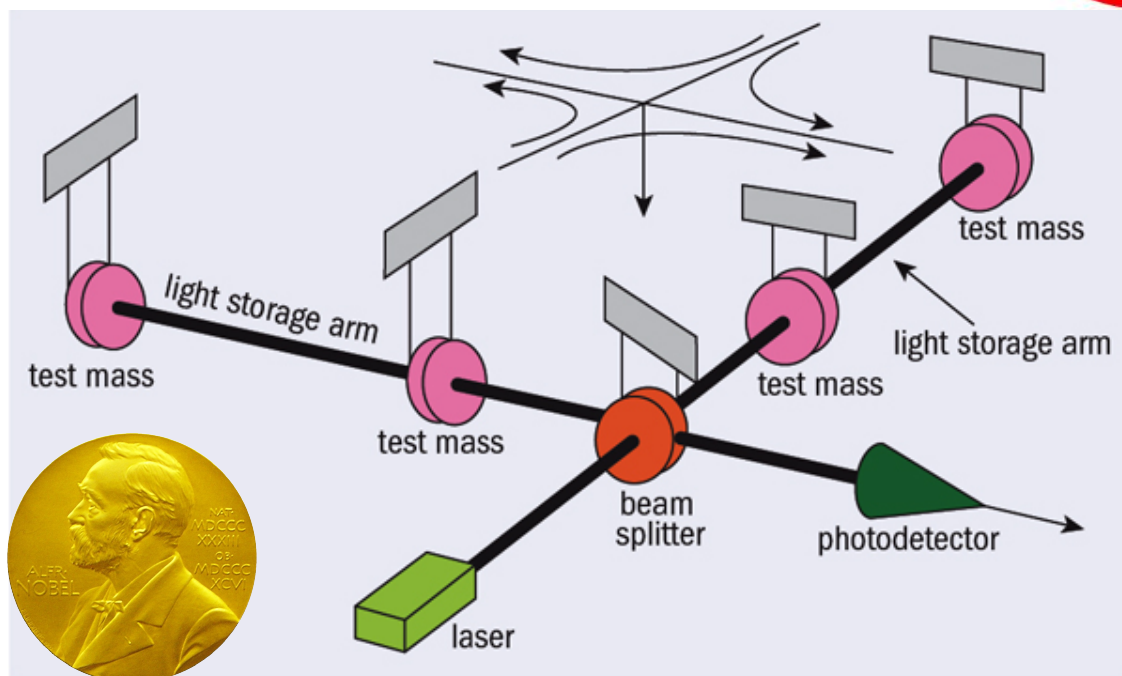
~1 s за вік
Всесвіту

..або на оптичний перехід великої кількості холодних нейтральних атомів Sr або Yb в оптичній пасці (NIST, PTB, SYRTE...)

Хенш, Хол

Перевірка загальної теорії відносності: різниця частот між двома іонами Al^+ рознесеними на 33 см по висоті!

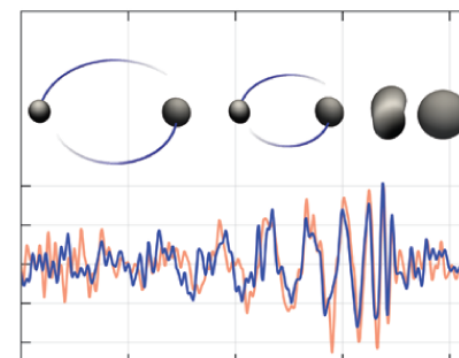




Ще одне використання надстабільних лазерів: детектори гравітаційних хвиль LIGO/VIRGO

(Нобелівська премія 2017 з фізики)

Інтерферометр Майкельсона, в якому лазерний промінь вимірює зміну відстані між двома 3-км рукавами з чутливістю 1 мільярдної частини розміру атома!



Детектування зіткнень чорних дір та нейтронних зірок: нові можливості в дослідженні Всесвіту

Зв'язок між фундаментальними дослідженнями та інноваціями в фізиці

Спостереження
природи

Теоретичні
моделі

Замкнене
коло!

Прогноз нових
ефектів

Більш точне спостереження
підтверджує (або спростовує) теорію.

Новітні
технології

революціонізують різноманітні
області (фізика, хімія, біологія,
медицина, ...)

*"Важко робити прогнози, особливо
стосовно майбутнього" (Нільс Бор)...*

*Згадайте листівки 1900 року з прогнозами на технології
XX століття....*

*Якою буде "друга квантова революція" ХХІ століття:
квантові комп'ютери, квантові комунікаційні мережі,
квантові сенсори, ще більш точні квантові годинники... або
щось зовсім інше та неочікуване?*

*... ми можемо тільки гадати, але одне ми
знаємо напевно: без фундаментальних
досліджень, нові технології не з'являться...*

*...та минуле вчить нас, що несподівані
чудові застосування часто виникають
несподівано з допитливих досліджень...*

Новітні технології....

...часто виникають несподівано з фундаментальних досліджень...

..які потребують два безцінних інгредієнта:

Час та Довіра

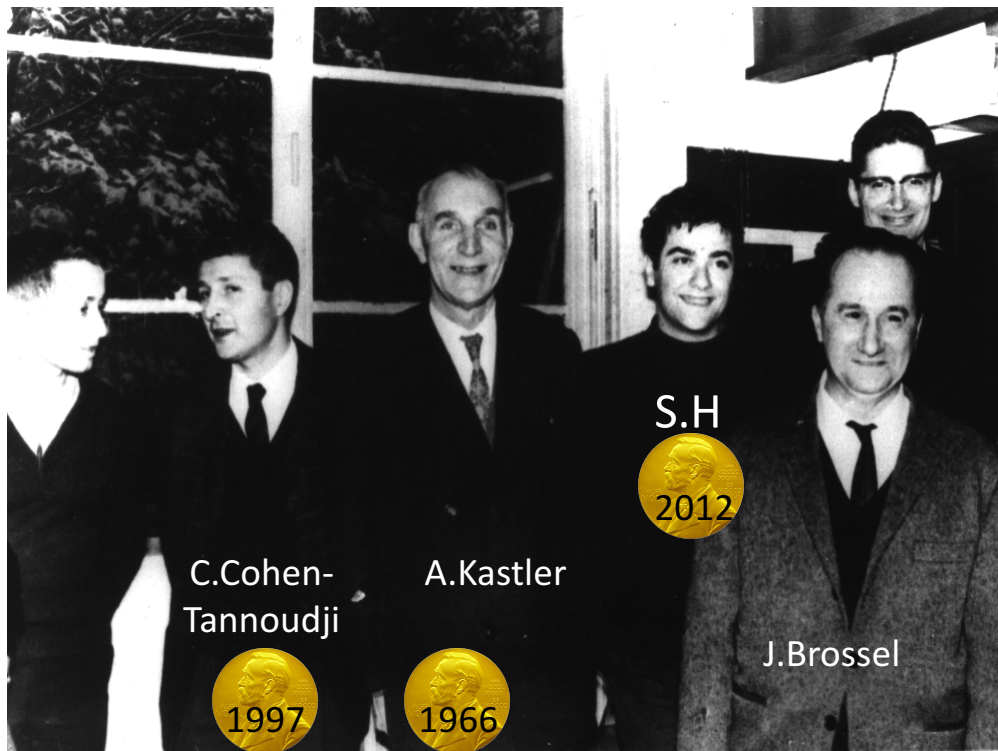
Деякі організації в світі намагаються захистити ці цінності...

... що, на жаль, не завжди знаходить розуміння у політиків та не зовсім підтримується законами глобального ринку, вимагаючого швидких маркетингових результатів!

Закінчуючи на позитивній ноті:
Як було показано на прикладі наукової школи Рабі,
дуже допомагає проведенню досліджень гарне
середовище видатних майстрів, колег та студентів!

Мій особистий досвід

...і та ж сама кімната в 2012
році, коли інша Нобелівська
премія була оголошена



Кімната в Лабораторії Каствлера та
Броселя в 1966 році (день, коли була
оголошена Нобелівська премія Каствлера)

