

Motto:

W laboratorium fizyka prawie wszystko mierzone jest za pomocą linijek i zegarów”

Michio KAKU: - „Hiperprzestrzeń”

***LASERY W SŁUŻBIE POMIARÓW
CZASU I PRZESTRZENI***

Zdzisław Jankiewicz

Streszczenie

Dużo zastosowań techniki laserowej ma globalne, cywilizacyjne znaczeni. Najczęściej przywoływana jest przy tej okazji telekomunikacja światłowodowa, holografia czy poszukiwania możliwości realizacji kontrolowanej syntezy termojądrowej.

Jedno z bardzo istotnych tego typu zastosowań jest moim zdaniem niedoceniane. Mam tu na myśli rolę laserów, jaką odegrały one w rozwoju badań w zakresie pomiarów czasu i przestrzeni, a bardziej konkretnie w konstrukcji pierwotnego wzorca czasu i częstotliwości. Mało interesujemy się i może nie doceniamy wagi tych zagadnień, gdyż wystarcza nam posiadanie zegarów odmierzających czas z sekundową dokładnością, nadawanym codziennie przez radio sygnałom czasu, nie wspominając o automatycznym korygowaniu wskazań naszych czasomierzy połączonych z Internetem np. telefonu komórkowego. Tak rozumiane potrzeby pomiary czasu są daleko niewystarczające, że wspomnę chociażby pozycjonowanie położenia w przestrzeni za pomocą służby GPS, z czego korzystamy coraz powszechniej codziennie.

Pomiary czasu były potrzebą ludzi od zarania ich egzystencji. Sprzyjało temu istnienie naturalnych zjawisk cyklicznych takich jak: obrót ziemi dookoła swojej osi (**doba**) i obrót ziemi dookoła słońca (**rok**). Posłużyły one do wyznaczenia podstawowej jednostki czasu – **sekundy**, a „**rok astronomiczny**” w dalszym ciągu przyjmowany jest, jako **praworzec czasu** przy jego pomiarach, pomimo że już od dawna sztucznie wytworzone przez człowieka zegary są znacznie bardziej stabilne i dokładniej odmierzają czas.

Prezentowana tu prelekcja dotyczy zarówno pomiarów **czasu** jak i przestrzeni (**długości**). To wynik fundamentalnych prac A. Einsteina wykazujących współzależność i nierozłączność tych pojęć. Od momentu wprowadzenia wzorca czasu w postaci kwarcowego generatora przebiegów elektronicznych (W. Morrisona - 1929), a szczególnie atomowego wzorca cezowego (1967) i wyznaczenia z wystarczającą dokładnością prędkości światła w próżni, zaistniała możliwość ustanowienia wspólnego wzorca dla obydwu tych wielkości: **czasu (sekundy)** i **długości (metra)**. Nastąpiło to stosunkowo niedawno, ale od 1983 r. w pomiarach czasu i długości posługujemy się tym samym wzorcem pierwotnym „**fontanną cezową**”.

O udziale urządzeń elektroniki kwantowej w tym w szczególności laserów w budowie wzorców czasu i długości (dalej będziemy mówili raczej o wzorcach czasu, pamiętając o ich podwójnym wykorzystaniu) można mówić począwszy od 1950 roku tj. od momentu budowy pierwszych urządzeń elektroniki kwantowej – maserów. Tak się bowiem złożyło, że zarówno pierwszy maser amoniakalny Ch. Townes'a jak i pierwszy wzorcowy generator na parach cezu wykorzystywały ten sam efekt: wzmocnienie na zasadzie emisji wymuszonej w ośrodkach z inwersją obsadzeń. Ponieważ inwersję obsadzeń w obydwu ośrodkach otrzymywano przez wydzielenie obiektów wzbudzonych, związane z nimi przejścia kwantowe musiały charakteryzować się długimi czasami życia, a więc wąską linią (dużą dobrocią) i dużą stabilnością wytwarzanych drgań. Zwracał na to uwagę, a także pisał o tym, również Ch. Townes.

Prace nad wzorcem cezowym trwały przeszło pięćdziesiąt lat od 1950 do 2000 roku. W tym czasie poprawiono jego stabilność o pięć rzędów wielkości od $\sim 10^{-10}$ do $\sim 10^{-15}$. Ostatnią poprawę o blisko dwa rzędy wielkości osiągnięto wykorzystując promieniowanie laserowe bezpośrednio do chłodzenia i pułapkowania atomów i jonów. Osiągnięcia tych badań były na tyle doniosłe, że zostały wyróżnione dwiema Nagrodami Nobla:

1. Norman F. Ramsey, Hans G. Dehmelt, Wolfgang Paul: „**za wynalezienie metody oscylacyjnych pól i rozwój techniki pułapek jonowych**” - 1989 r.
2. Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William D. Philips: „**za rozwój metod chłodzenia i pułapkowania atomów promieniowaniem laserowym**” -1997 r.

Obowiązującym obecnie, pierwotnym wzorcem czasu, długości i częstotliwości jest tzw. „**fontanna cezowa**” charakteryzująca się stabilnością 10^{-15} .

Pojawienie się generatorów optycznych i szybki rozwój techniki laserowej stworzyły możliwość dalszego polepszenia stabilności wzorców czasu (częstotliwości) i długości i to skokowo aż o trzy rzędy wielkości do $\sim 10^{-18}$, biorąc pod uwagę fakt, że stosunek przewidywanej nowej częstotliwości wzorcowej do obowiązującej obecnie wynosi około 10^4 . Badania w tym zakresie formalnie rozpoczęto w 2006 r. powołaniem przez Międzynarodowy Komitet Miar i Wag grupy roboczej do śledzenia postępów w budowie różnych optycznych generatorów wzorcowych i rekomendacji rozwiązań przydatnych dla optycznych wzorców czasu. W badaniach zaangażowane są instytucje metrologiczne czołowych krajów i w międzyczasie osiągnięto znaczący postęp. Do redefinicji „sekundy” w oparciu o optyczny wzorzec czasu konieczne jest spełnienie dwóch warunków:

1. Budowa wzorcowego generatora fal optycznych o stabilności $\sim 10^{-18}$,
2. Zapewnienie dostępności optycznego sygnału wzorcowego w pełnym pasmie częstotliwości, do częstotliwości radiowych włącznie.

Równie istotne jak pierwszego, okazuje się spełnienie warunku drugiego. Wynika on stąd, że częstotliwość nowego wzorca będzie znacząco większa, aż o kilka rzędów wielkości (4 – 5) od częstotliwości radiowych, które powinny także podlegać pomiarom tzn. porównaniu z nową częstotliwością wzorcową. Uniwersalne rozwiązanie tego niezwykle kłopotliwego problemu oferuje także technika laserowa (patrz p. VI. Pomiar częstotliwości optycznych – prelekcji). Generatory impulsów o femtosekundowych czasach trwania w połączeniu z generacją supercontinuum oferują wytwarzanie w zakresie optycznym ciągu równoodległych prążków (tzw. **grzebienia częstotliwości**) tworzącego skalę częstotliwości o znanych wartościach. Ponieważ różnica częstotliwości poszczególnych prążków jest stała i leży w zakresie mikrofalowym, stanowi ona łącznik pomiędzy pasmami optycznym i mikrofalowym i zapewnia pomiary w całym pasmie częstotliwości niezależnie od zakresu, w którym generuje wzorzec.

Badania z zakresie „grzebień częstotliwości” zostały również wyróżnione Nagrodą Nobla (John L. Hall, Theodor W. Hansch: **„za wkład w rozwój precyzyjnej spektroskopii laserowej w szczególności za technikę optycznego grzebień częstotliwości” – 2005**). Liczba Nagród Nobla dotyczących techniki laserowej, jaką uzyskano w trakcie badań w dziedzinie pomiarów czasu i przestrzeni świadczy o doniosłości tego zagadnienia i roli laserów, jaką odegrały one w osiągnięciu jego obecnego kształtu.

Biorąc pod uwagę fakt, że w 2013 r. opublikowano informację o uruchomieniu w NIST (National Institute of Standard and Technology – USA) lasera o stabilności 2×10^{-18} , udowodniono, że techniczne warunki redefinicji sekundy mogą być spełnione i że w przyszłości kolejna definicja jednostki czasu oparta o wzorzec optyczny, (choć nie wiadomo, kiedy) na pewno nastąpi. Wprowadzenie nowej definicji sekundy, to nie tylko problem techniczny, ale również skomplikowany problem prawny i organizacyjny. Ponadto nowe urządzenia, by zastąpić dotąd powszechnie używane, muszą nie tylko osiągnąć zadowalający poziom techniczny, ale także ekonomiczne uzasadnienie.

Jednak „grzebień częstotliwości” i optyczne stabilne zjawiska referencyjne znajdują już dziś zastosowania w wielu badaniach naukowych. Powstał **„astro – comb”**, specyficzna odmiana „grzebień częstotliwości” przystosowanego do badania Dopplerowskich zmian składowych widma promieniowania gwiazd, wywoływanych obecnością krążących wokół nich planet. Po praktycznie jedyna metoda pozwalająca na wykrywanie niewielkich, ziemio podobnych planet daleko oddalonych gwiazd.

Pomiary czasu należą do najdokładniejszych. Żadna inna wielkość fizyczna nie jest mierzona z tak małą niepewnością. Wprowadzenie optycznego wzorca niepewność pomiaru czasu zmniejszy o dalsze trzy rzędy wielkości. Konsekwencje dla rozwoju nauki tego kroku są trudne do przecenienia. Przewiduje się, że nowe możliwości pomiaru czasu wpłyną na zrozumienie wielu faktów z zakresu fizyki i kosmologii, między innymi udokładnione zostaną wartości podstawowych stałych fizycznych i ewentualnie ich dryf w czasie. Zagadnieniu powyższemu poświęcane są także inne badania np. pomiary odległości Ziemia – Księżyc i jej zmiany w czasie. To także realizowane jest dzięki technice laserowej. Można przyjąć, iż jesteśmy świadkami rewolucji w rozwoju nauk fizycznych, u których podstaw leżą możliwości zastosowań laserów o globalnym, cywilizacyjnym zasięgu.

I. Wstęp

Czym jest czas i przestrzeń?



„Jeżeli nikt nie pyta czym jest czas, wiem czym on jest; gdy chcę to wytłumaczyć komuś kto mnie pyta, nie wiem.”

Aurelius Augustinus (354 - 430)



„Nic nie jest dla mnie większą zagadką niż czas i przestrzeń, a jednocześnie nic nie jest dla mnie mniejszym problemem niż czas i przestrzeń, gdyż nigdy o nich nie myślę”.

Charles Lamb (1775 – 1834)

Czas i przestrzeń jako kategorie filozoficzne

Stephen Hawking



1942 - 2018

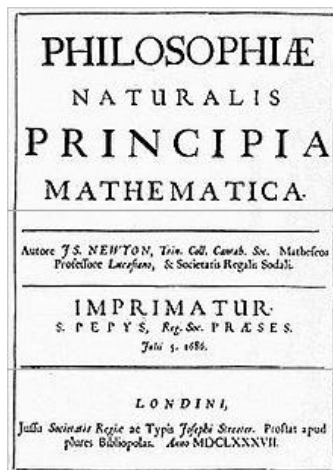
>>Przyjmując pozytywistyczne stanowiska nie można stwierdzić czym rzeczywiście jest czas i przestrzeń. Można jedynie opisać matematycznie ich modele i wyjaśnić wynikające z nich przewidywania i konsekwencje.<<

**Stephen Hawking - „Krótka historia czasu”,
„Wszechświat w skorupce orzecha”**

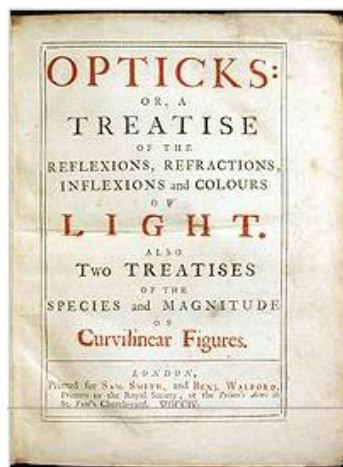
Izaak Newton twórca teorii grawitacji



Izaak Newton 1643-1727

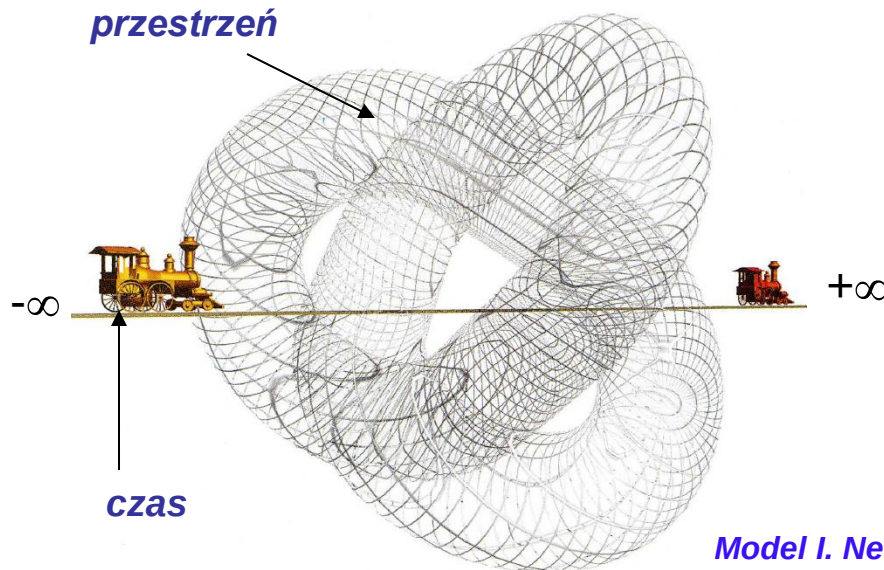


**„Podstawy matematyczne
filozofii przyrody”
(1687)**



„Optyka” - 1704

Czas i przestrzeń wg modelu I. Newton'a



1. Czas i przestrzeń tworzą stabilną scenę dla zdarzeń fizycznych, lecz od nich nie zależą.
2. Czas i przestrzeń są oddzielone od siebie i są od siebie niezależne.
3. Czas jest wieczny, istniał i będzie istniał zawsze (od $-\infty$ do $+\infty$).

Model I. Newtona widziany przez S. Hawking'a

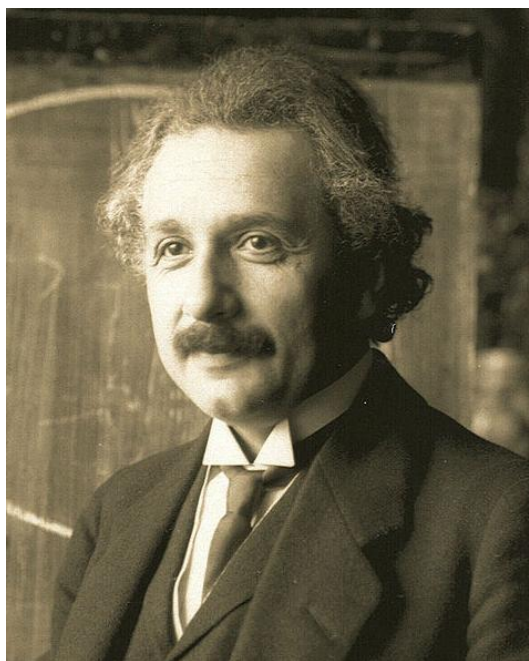
Sprzeczności trudne do wyjaśnienia modelem Newtona

1. Religia zakładała stworzenie wszechświata kilka tysięcy lat wstecz, a św. Augustyn twierdził nawet, że czas przed stworzeniem świata nie istniał.
2. Jeżeli czas jest wieczny, dlaczego świat czekał na stworzenie nieskończenie długo.
3. Jeżeli wszechświat trwa nieskończenie długo, wszystko powinno się już zdarzyć.
4. Jeżeli wszechświat trwa nieskończenie długo, powinien być w równowadze termodynamicznej.

„W przyrodzie realizowana jest idea matematycznej prostoty”

A. Einstein

Albert Einstein twórca teorii względności



Albert Einstein 1879 - 1955

Ważniejsze prace (dla poruszanych zagadnień)

1905 – STW (Szczególna Teoria Względności)

- pojęcie czasoprzestrzeni, względność ruchu;
- ograniczenie prędkości $v < c$, przy $c = \text{const}$;
- dylatacja czasu i kontrakcja przestrzeni;
- równoważność masy i energii $E = mc^2$.

1907 – Dowód, że wzór Planck’a $E = h\nu^*)$ jest uniwersalnym prawem fizyki.

1915 – OTW (Ogólna Teoria Względności)

- grawitacja jako zakrzywienie czasoprzestrzeni.

1917 – Emisja wymuszona promieniowania e-m

- podstawy teoretyczne działania laserów.

^{*)} Na niektórych przeźroczach częstotliwość „ ν ” oznaczana będzie symbolem „ f ”.

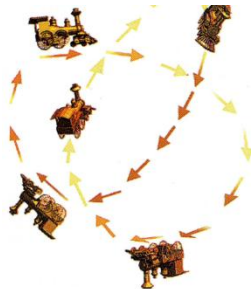
Czas i przestrzeń wg modelu A. Einsteina



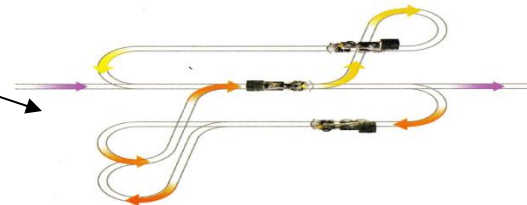
U podstaw teorii względności jest założenie, że prędkość światła w próżni „ c ” jest stała, niezależnie od ruchu źródła i obserwatora

1. Czas i przestrzeń tworzą jednolitą czasoprzestrzeń;
2. Czas i przestrzeń są współzależne i na siebie wpływają;
3. Każdemu zdarzeniu towarzyszy lokalny czas i wymiar;
4. W szczególności czas i droga zależą od prędkości ruchu;
5. Dylatacja czasu i kontrakcja przestrzeni;
6. Równoważność masy i energii $E = mc^2$;
7. Ograniczenie maksymalnej prędkości $v < c$

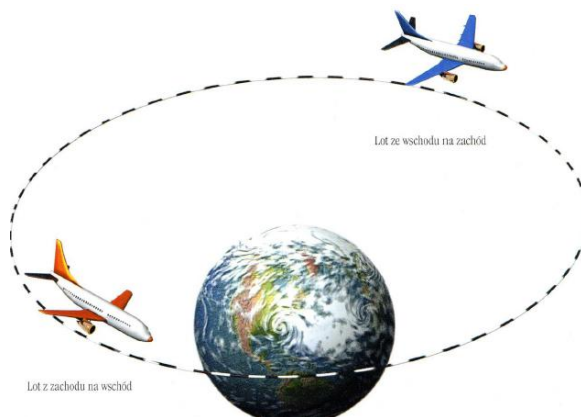
Wizja S. Howking'a modelu czasu i przestrzeni Einsteina



Czas może być wielkością ukierunkowaną co nie wyklucza podróży w czasie



Czas nie jest wielkością absolutną – to $c = \text{const}$



A. A. Michelson



1852 – 1931;

1907 – Nagroda Nobla

Fakty potwierdzone eksperymentalnie:

Zegary umieszczone **w samolotach chodzą wolniej** niż znajdujące się na ziemi i inaczej w statku lecącym ze wschodu na zachód niż przeciwnie, z zachodu na wschód (wpływ prędkości ziemi). **Zegary** umieszczone **u podstawy i na wierzchołku wieży** inaczej **odmierzają czas** (wpływ grawitacji).

....„to pańskie pomiary pierwsze oparte na szczególnej teorii względności na realnej podstawie” - opinia A. Einstein na bankiecie w czasie Konferencji w Pasadenie w 1931 o pracach A. Michelsona i A. Marleya z 1887.

Wpływ dylatacji czasu i możliwość jego kontroli

$$t_v = t_s - \Delta t \longrightarrow \frac{\Delta t}{t_s} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \cong \frac{v^2}{2c^2}$$

	<i>Auto</i>	<i>Dźwięk - Samolot</i>	<i>I szybk. kosm.</i>	<i>II szybk. kosm.</i>	<i>III szybk. kosm.</i>	<i>IV szybk. kosm.</i>
$v [m/s]$	30	300	$7,9 \times 10^3$	$11,2 \times 10^3$	$16,7 \times 10^3$	130×10^3
$\Delta t/t_s$	5×10^{-15}	5×10^{-13}	$3,5 \times 10^{-10}$	$0,7 \times 10^{-9}$	$1,5 \times 10^{-9}$	$0,9 \times 10^{-8}$

Dziś potrzeba pomiaru i korekcji czasu na poziomie 10^{-13} 10^{-15} jest wystarczająca, ale jak wiadomo „apetyt rośnie w miarę jedzenia”.

***II. Istota pomiaru czasu i przestrzeni.
Wymagania odnoście wzorców***

Pomiar jako metoda poznawania przyrody



„Zaprawdę powiadam wam, jeśli to o czym mówicie potraficie zmierzyć i wyrazić przy pomocy liczb, to wiecie o czym mówicie, w przeciwnym razie wasza wiedza jest jałowa i próżna”

Lord Kelvin (Wiliam Thomson)
1834-1907

Pomiar – jest to doświadczalne porównanie wielkości mierzonej z **wzorcem** tej wielkości przyjętym **za jednostkę miary**, którego wynikiem jest przyporządkowanie **wielkości mierzonej** pewnej wartości liczbowej wskazującej ile razy jest ona **większa (mniejsza)** od wartości wzorca.

Do realizacji pomiaru danej wielkości fizycznej potrzebne są:

1. definicja jednostki (system jednostek);
2. wzorzec (system wzorców) będący nośnikiem wartości jednostki;
3. układ porównujący wartość wielkości mierzonej z wzorcową.

Definicje jednostki czasu SI

Jednostka podstawowa: sekunda

Definicja sekundy zmieniała się wraz ze zmianą wzorców które ją określały.

1820: 1 Sekunda to - 1/86400 część średniej doby słonecznej (K. Gauss).

1956: 1 Sekunda to - 1/31 556 925,9747 część roku zwrotnikowego z 1900 r.

1967: 1 Sekunda to - 9 192 631 770 okresów promieniowania odpowiadającego przejściu między dwoma poziomami $F = 3$ i $F = 4$ struktury nad subtelnej stanu podstawowego $^2S_{1/2}$ izotopu atomu cezu ^{133}Cs w spoczynku i w temperaturze 0 K.

(Uchwała XIII Generalnej Konferencji Miar (GKM) z października 1967 r.)

Jednostki (miary) mniejsze podawane są w systemie dziesiętnym:

milisekunda [ms] = 10^{-3} [s]

nanosekunda [ns] = 10^{-9} [s]

femtosekunda [fs] = 10^{-15} [s]

mikrosekunda [μ s] = 10^{-6} [s]

pikosekunda [ps] = 10^{-12} [s]

atosekunda [as] = 10^{-18} [s]

Podstawowe definicje metra SI (historycznie)

1791 – 1 metr = $1/4 \times 10^7$ część południka przechodzącego przez Paryż [wzorzec naturalny, wyjściowy: (0,15 0,2)mm].

1799 – wzorzec archiwalny: $\pm(0,01 \div 0,02)$ mm

1889 – międzynarodowy prototyp metra [wzorzec kreskowy: ± 200 nm]

1960 – wielokrotność długości fali izotopu 86 kryptonu: ± 4 nm

1983 - 1 metr jest to odległość równa drodze przebytej przez światło w próżni w czasie równym $1/299792458$ s: $\pm 0,13$ nm

Niepewność ($\pm 0,13$ nm) wynika z dokładności: 1. wzorca częstotliwości (czasu) i 2. wyznaczenia prędkości światła w próżni $c = 299792458$ m/s.

Przyczyną przyjęcia tej definicji metra było wyznaczenie z dużą dokładnością prędkości rozchodzenia się światła w próżni.

$$c = \nu \cdot \lambda_0$$

Prędkość światła - podstawa

A. A. Michelson



1852 - 1931

1879 – 299 910 50 km/s

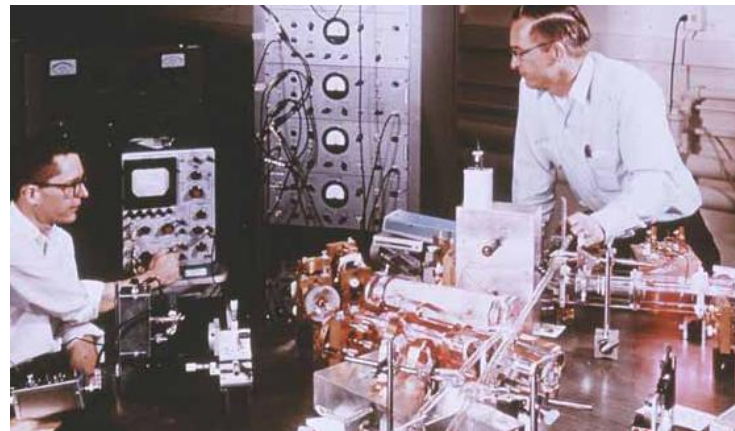
1883 – 299 853 ± 60 km/s

1924 – 299 796 ± 4 km/s

1907 Nagroda Nobela

„za precyzyjne przyrządy optyczne i wykonane za ich pomocą spektroskopowe oraz metrologiczne badania”

J. Hall & D. Barger - 1972



Laser He-Ne (3,39μm) ze stabilizacją CH₄

$\lambda = 3\,392\,231\,390 \pm 10^{-5} \text{ nm}$

$\nu = 88\,376\,181\,627 \pm 50 \text{ kHz}$

$c = 299\,792\,458,7 \pm 1,1 \text{ m/s}$

Od 1983

$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$

→
Wniosek generalny: Od 1983 r. w pomiarach czasu i długości posługujemy się tym samym atomowym wzorcem: maserem cezowym

Jedność pomiaru częstotliwości, czasu i długości

Wielkości: częstotliwość, czas i długość tworzą ścisły związek funkcyjny

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{c}{\lambda}$$

Częstotliwości: „ ν ” przyznaje się priorytet – wzorce pośrednio dają wielkość czasu: – okres „ T ”; po wypromieniowaniu w postaci fali, jej długość: „ λ ” - jeżeli znamy wartość prędkości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej w próżni: „ c ”.

Równoważność tych wielkości z punktu widzenia metrologii jest pozorna.

Każdą z tych wielkości można wyznaczyć mierząc dowolną z pozostałych, jednak zarówno metody pomiarowe, jak i uzyskiwane dokładności wyników nie są identyczne. Dlatego metrologia rozróżnia pomiary częstotliwości, pomiary interwałów czasowych i pomiary długości fali mimo, że wiąże je ścisła zależność.

III. Wzorce czasu i częstotliwości (zegary wzorcowe)

„Punktami na skali czasu są zdarzenia; sekwencja zdarzeń to zegar”

Leon Lederman: „Boska cząstka”

Zjawiska referencyjne

Pomiary czasu były pierwszą potrzebą ludzkiej cywilizacji

Istnieją naturalne zjawiska cykliczne służące do odmierzania czasu: doba, miesiąc, rok słoneczny. Trudności w rejestracji punktów granicznych

Prawzorzec czasu (zegar): **rok astronomiczny**

Znaczenie praktyczne mają wzorce sztuczne; obecnie budowane jako generatory elektroniczne, których częstotliwość jest odnoszona do coraz bardziej stabilnego wzorcowego zjawiska referencyjnego

Wybrane zegary wzorcowe do których odnoszone są wskazania pozostałych noszą nazwę wzorców pierwotnych

(Od 1983r wzorce czasu i częstotliwości spełniają jednocześnie rolę wzorców długości)

Wahadło jako zjawisko referencyjne

Leonardo da Vinci



1452 - 1519

Christian Huygens



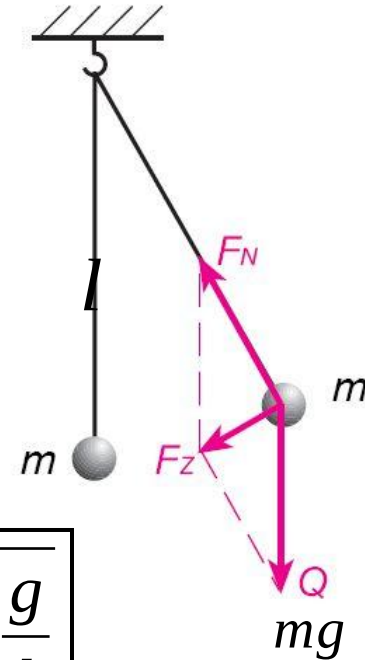
1629 - 1695

„Horologium
oscilatorium”

Galileo Galilei



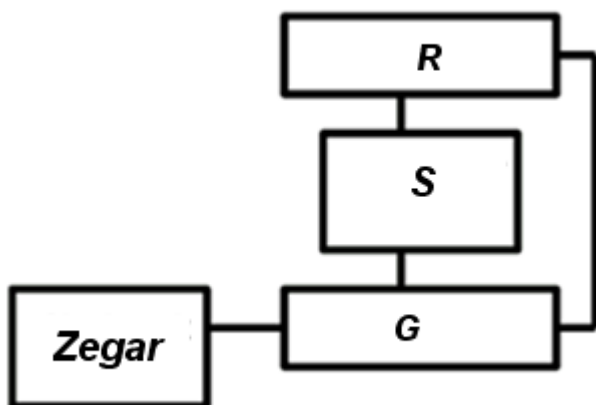
1564 -1642 (1581)



$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{l}}$$

Wahadło przez stulecia służyło jako „zjawisko cykliczne” odmierzające czas. Do dziś w wielu domach zegary wahadłowe są ozdobą i pamiątką minionej świetności.

Koncepcja zegara jako generatora o częstotliwości odniesionej do zjawiska referencyjnego



R – zjawisko referencyjne

G – generator

S – syntetyzer częstości

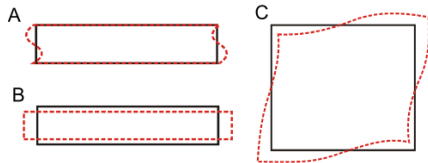
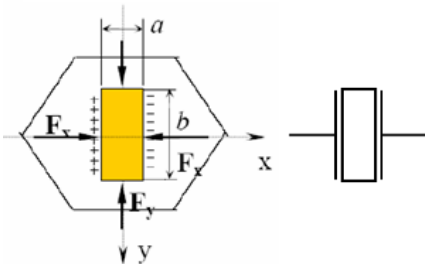
Rozwój tej koncepcji generacji sygnałów wzorcowych na przestrzeni lat następował głównie w ślad za odkrywaniem i konstruowaniem coraz lepszych i bardziej dokładnych periodycznych zjawisk referencyjnych

Rezonator kwarcowy

Pierre Curie



1859-1906



1880 – Pierre i Jacques Curie, odkrycie
efektu piezoelektrycznego

Deformacji mechanicznej płytki z kryształu kwarcu towarzyszy pojawianie się ładunków na ich powierzchni i odwrotnie umieszczenie kryształu w polu elektrycznym wywołuje jego deformacje mechaniczne.

Rezonansowe, mechaniczne *drgania* własne *płytek kwarcowych* ($Q \sim 10^6$) stosowane są do *stabilizacji* częstotliwości generatorów elektronicznych.

Kwarcowe wzorce częstotliwości (czasu) – zegary kwarcowe

Warren Marrison



1929 – W. Marrison.
Konstrukcja zegara kwarcowego -
sztucznego wzorca czasu.

Obecnie



$f = 32768 \text{ Hz}$

$$2^{15} = 32768$$

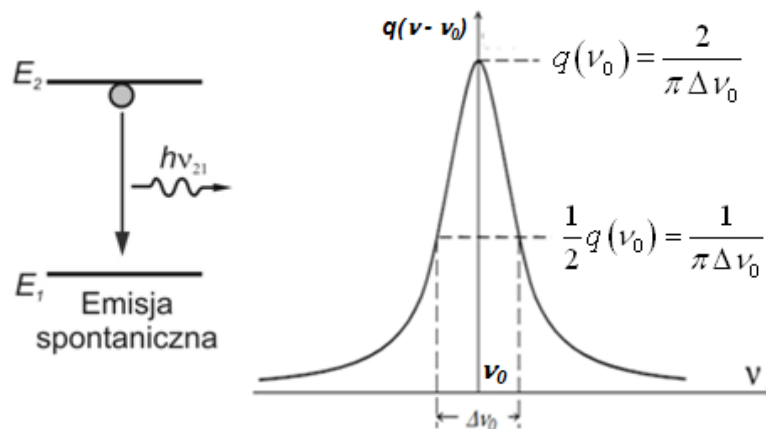
To co w latach 30. ubiegłego wieku było wielkim osiągnięciem technicznym – zegar kwarcowy o stabilności częstotliwości $\pm 10^{-(7-8)}$ – dziś realizowane jest w naręcznych zegarkach elektronicznych (kwarcowych) wartych $\sim 100 \text{ zł}$.

Atomowe zjawiska referencyjne

– współczesne zegary atomowe

Przejścia rezonansowe pomiędzy poziomami energetycznymi wybranych elementów kwantowych mogą służyć jako wzorcowe zjawiska referencyjne.

Emisja spontaniczna pomiędzy wąskimi poziomami energetycznymi ma charakter rezonansowy i matematycznie opisywana jest funkcją Lorentz 'a.



A – współcz. emisji spontanicznej wyznacza parametry charakterystyki rezonansowej:

$\tau_0 = A^{-1}$ – czas życia poziomu wzbudzonego

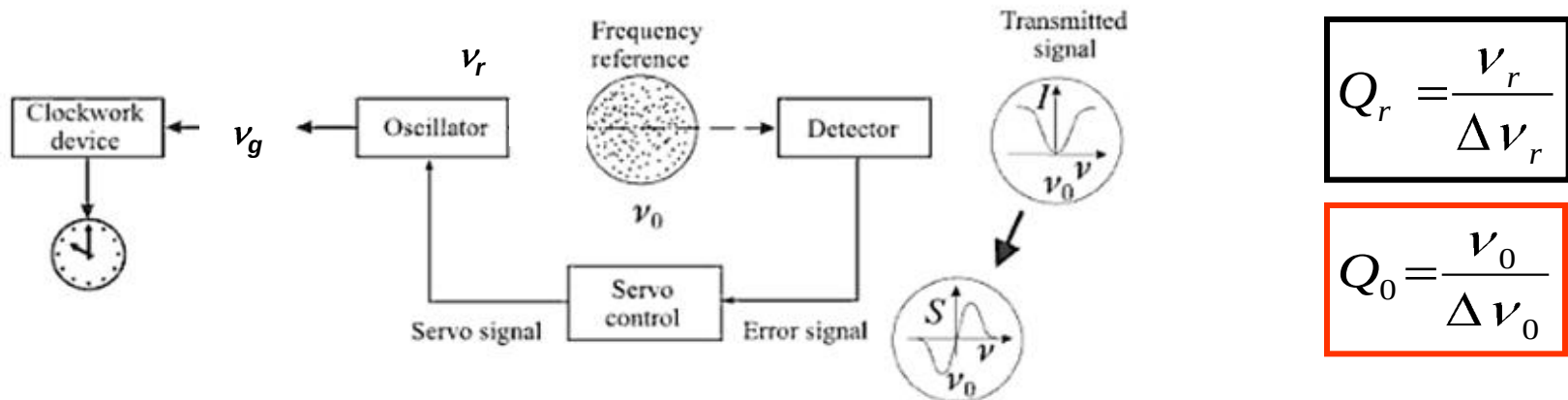
$\Delta\nu_0 = (2\pi\tau_0)^{-1} = A/2\pi$ - szerokość pasma

$Q = \nu_0 / \Delta\nu_0$ - współczynnik dobroci

Można dobrać ośrodki o dużej dobroci rezonansu: dużym ν_0 (mikrofae, optyka) i małym $\Delta\nu_0$ - (długi czas życia), by spełniały kryteria wzorcowych zjawisk referencyjnych.

Idea budowy zegarów atomowych

Współczesne zegary atomowe (1954 formalnie 1967) – to precyzyjne, stabilizowane generatory fal e – m. Wytwarzane sygnały są stabilizowane:- pasywnie – ograniczanie wpływów zewnętrznych (temperatury) i aktywnie – porównywane i dostrajane do referencyjnego zjawiska kwantowego.



Rezonatory odniesienia (o) i oscylatora (r) należy traktować jako sprzężone:

$$\nu_g = \nu_0 + \nu_r - \nu_0 \frac{Q_r}{Q_0}$$

ν_g ma cechy ν_0 gdy $\nu_r \sim \nu_0$; i $Q_0 > Q_r$

Dokładność, Stabilność, Niepewność

Dokładność – stopień zgodności wartości mierzonej wielkości z jej wartością nominalną (definicyjną). **Dokładność** wyrażana (mierzona) jest wartością względnego **uchybu** wartości mierzonej od nominalnej

Uchyb (offset) częstotliwości:

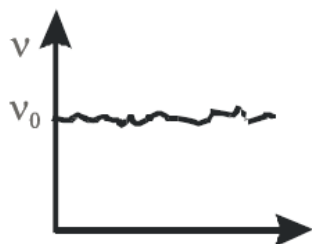
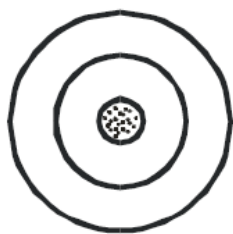
$\nu(\text{nom.})$ – wartość z tabliczki znamionowej

$$\partial \nu_{\text{offset}} = \frac{\nu_{\text{mierz.}} - \nu_{\text{nom.}}}{\nu_{\text{nom.}}}$$

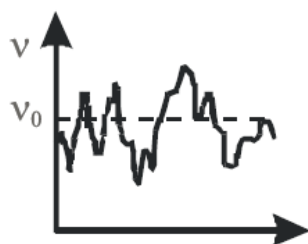
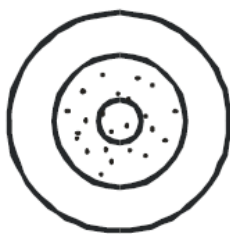
Stabilność wskazuje na ile generator jest zdolny wytwarzać przebieg o określonym uchybie częstotliwości w pewnym odcinku czasu.

Dla **stabilności** nie jest ważne czy wytwarzana częstość jest „**dobra**” (**bliska nominalnej**) czy „**zła**” (**daleka od nominalnej**), ona wskazuje tylko na ile leżą one bliskie sobie (**wskazuje na stopień skupienia**)

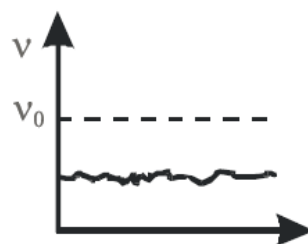
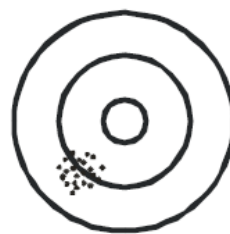
Ilustracja graficzna dokładności i stabilności



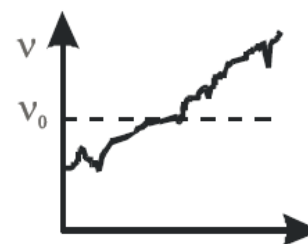
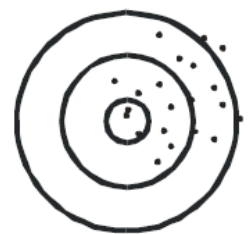
*dokładny i
stabilny*



*dokładny lecz
niestabilny*



*stabilny lecz
nieprecyzyjny*



*niestabilny i
nieprecyzyjny*

Wariancja (odchylenie) Allana jako **miara stabilności**



Proces niestacjonarny – odchylenie średniokwadratowe jest złą miarą

$$\sigma_{SD} = \sqrt{\frac{1}{M-1} \sum_{i=1}^M (v_i - \bar{v})^2}$$

$$\sigma_{\partial v} = \sqrt{\frac{1}{2(M+1)} \sum_{i=1}^{M-1} (v_{i+1} - v_i)^2}$$

Q_0^{-1}

$$\sigma = \frac{\Delta \nu}{\pi \nu_0} \sqrt{\frac{T}{\tau N}}$$

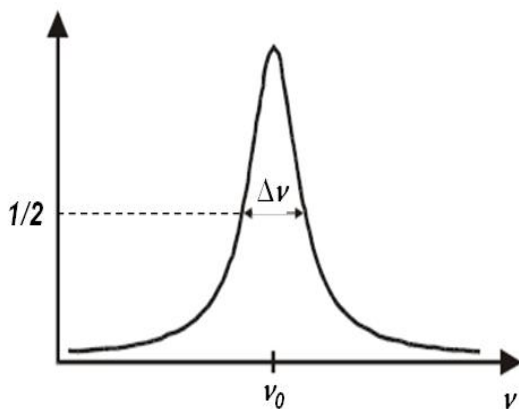
Wzorce atomowe

N – liczba cząstek układu referencyjnego,
 T – czas określający szerokość linii
 τ – czas uśredniania

Niepewność: wyznacza błąd częstotliwości urządzenia w stosunku do międzynarodowej skali czasu UTC (Coordinate Universal Time).

„Dobroć” referencyjnego układu periodycznego jest wyznacznikiem jego jakości jako wzorca

Dokładność pomiaru czasu (częstotliwości) i długości zależą od dokładności i stabilności wzorców, które określone są generalnie przez smukłość zjawiska periodycznego (rezonatora) uznanego za referencyjne (wzorcowe):



$$Q^{-1} = \frac{\Delta \nu_0}{\nu_0}$$

- smukłość rezonansu

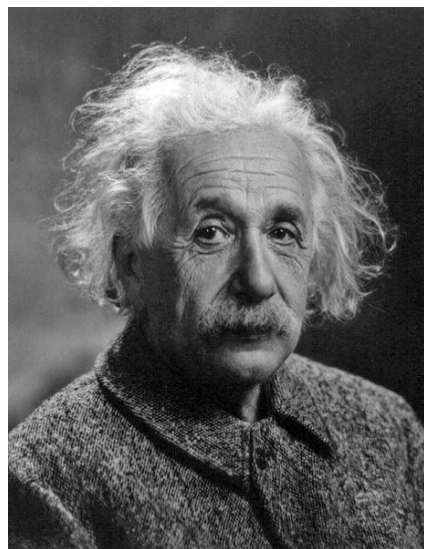
$\Delta \nu_0$ i ν_0 – dwie niezależne wielkości

Poszukuje się zjawiska periodycznego:

1. o możliwie małym rozrzucie częstości $\Delta \nu$,
2. drgającego z możliwie wysoką częstością
(obecnie mikrofae, w przyszłości fae optyczne).

Jak wzmacniacze kwantowe: masery i lasery spełniają te warunki?

A. Einstein - Teoria emisji wymuszonej - 1917



*Ch. Townes
(1915 – 2015)*



*N. Basow
(1922-2001)*



*A. Prochorow
(1916-2002)*

Albert Einstein – 1947 (1879 – 1955)

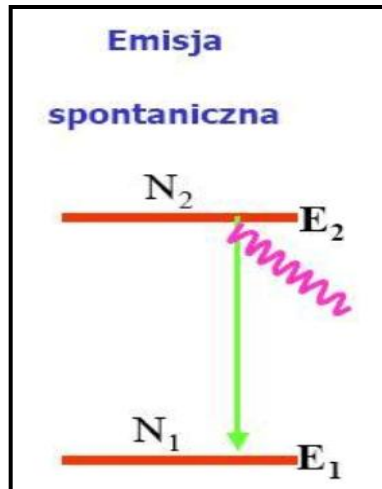
1954 – uruchomienie pierwszego masera na parach amoniaku – NH_3

1964 – już po skonstruowaniu lasera, dla całej trójki Nagroda Nobla

Emisja spontaniczna

$$h\nu_s = E_2 - E_1 - \text{ma charakter rezonansowy}$$

Położenie wzbudzone obiektu jest nietrwałe; wyższy poziom może on opuścić także bez przyczyny zewnętrznej – w sposób spontaniczny.

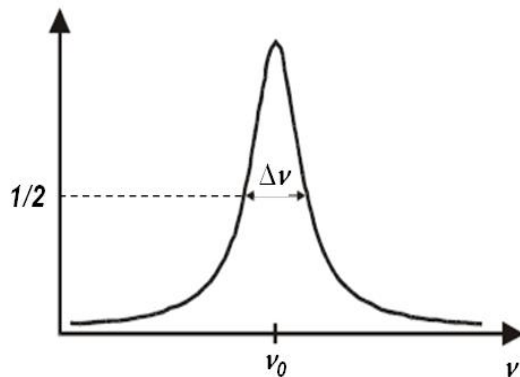


Emisja spontaniczna jest cechą charakterystyczną stanów wzbudzonych.

$$\frac{dW_s}{dt} = A_{21}.$$

A_{21} – współczynnik Einsteina dla emisji spontanicznej.

Współczynnik Einsteina a smukłość rezonansu kwantowego



$$A_{21} = \frac{1}{\tau_0} = \pi \Delta \nu_0$$

τ_0 – **najdłuższa stała czasu zaniku**
obsadzenia poziomu wzbudzonego-
czas życia w stanie wzbudzonym

$\Delta \nu_0$ – **najmniejsza szerokość linii (Lorentza)**

**Długi czas życia cząstki na poziomie wzbudzonym oznacza wąską
linię przejścia kwantowego lecz jednocześnie zmniejszenie wartości
współczynników Einsteina A i B (tzw. przejścia wzbronione).**

**Wartości τ_0 i $\Delta \nu_0$ wynikające z wartości A_{21} są ekstremalne. Nie biorą
pod uwagę wpływu ruchu i koncentracji obiektów kwantowych oraz
termostatu. Warunki rzeczywiste zasadniczo modyfikują te wielkości**

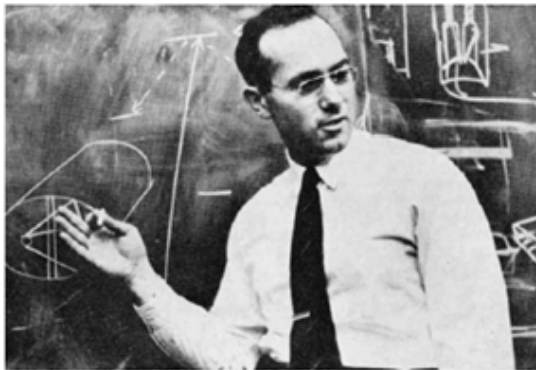
Maser amoniakalny

Pierwszy maser

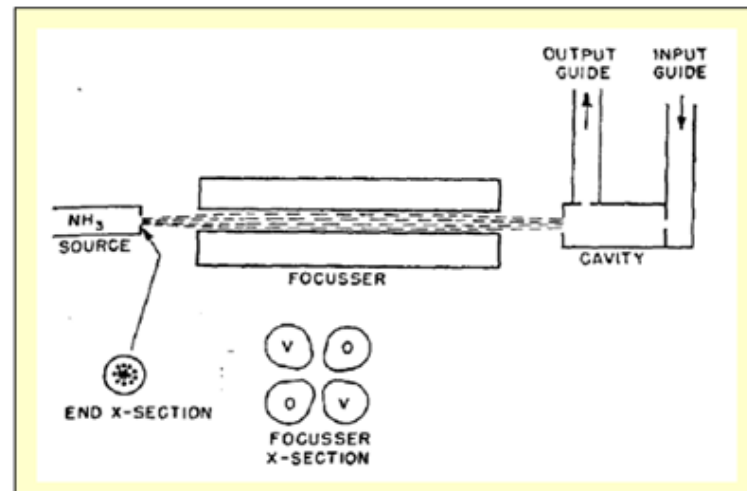
(**M**icrowave **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation)

Maser amoniakalny – NH_3 [1]

$\nu_w = 23870,14 \text{ MHz}$.



Charles Townes



Schemat aparatury pierwszego masera

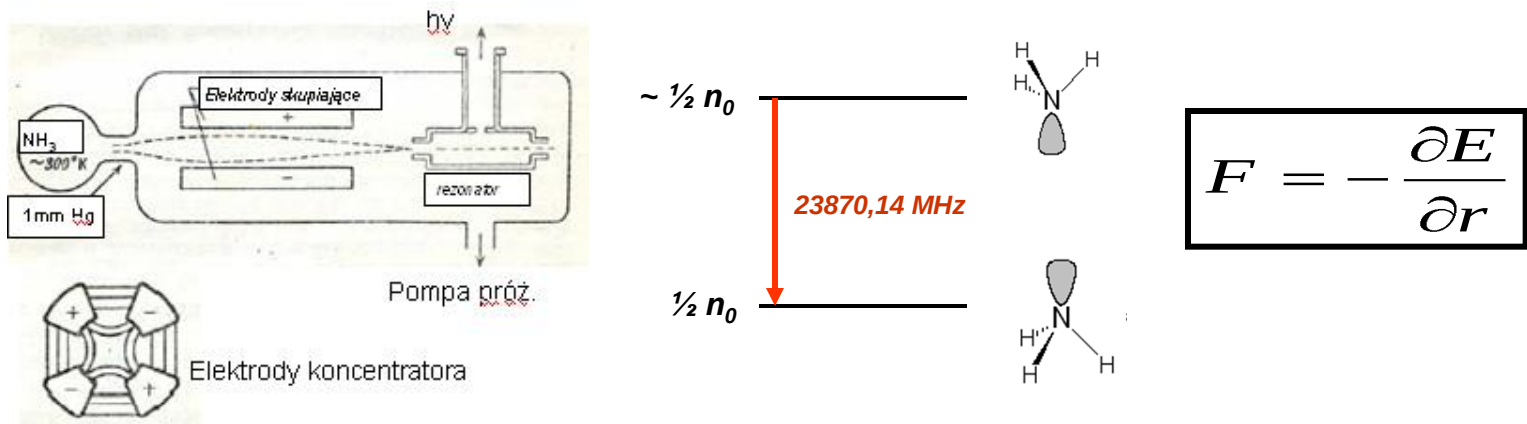
[1] J. P. Gordon, W. J. Zeiger, CH. Townes „Molecular Microwave Oscillator and New Hyperfine Structure in the Microwave Spectrum of NH_3 ”, *Phys. Rev.* 95, 282, (1954)

Inwersja obsadzeń poprzez wyodrębnienie cząstek wzbudzonych

Możliwa dla swobodnych jonów, atomów i molekuł (gazy lub pary).

Dla mikrofal i $T \sim 300\text{K}$ liczba cząstek wzbudzonych $n_2 \approx \frac{1}{2} n_0$

A. Pole elektrostatyczne – separacja dipoli elektrycznych (np. NH_3)



Niejednorodne, zanikające na osi koncentratora, pole elektrostatyczne skupia cząstki wzbudzone, które trafiają w szczelinę rezonatora. Cząstki w stanie podstawowym (nie wzbudzone) są rozpraszane.

„How the laser happened” - Wspomnienia Ch. Townsa

>>Llewelyn H. Thomas, wybitny teoretyk z Uniwersytetu Columbia powiedział mi, że z fundamentalnych praw fizyki wynika wprost, iż **maser nie może dawać tak czystej częstości**. Był tak pewny siebie, że właściwie odmówił słuchania moich wyjaśnień. Po uruchomieniu masera po prostu przestał się do mnie odzywać.<<

Ch. Towns (wkrótce przekonali się o tym inni), zdawał sobie sprawę z faktu, że smukłość linii rezonansu atomowego zapewnia niezwykłą, niespotykaną dotąd stabilność generowanej fali elektromagnetycznej [2]. **Nie sposób by na ten fakt nie zwrócili uwagi specjaliści metrologzy, w szczególności zajmujący się wzorcami czasu i częstotliwości.**

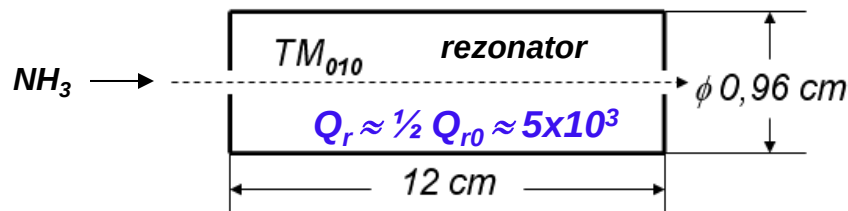
Intensywne badania prowadzono w **NBS** (National Bureau of Standard)

[2] Towns C. H. „ NH_3 - Quantum Oscillator like Frequency Standard” Nuovo Cimento, Suppl. V, N_o 1 (1957)

Maser Townes'a - wyniki i wnioski

$$A = 10^{-8} \text{ s}^{-1}$$

→ Czas życia $\tau_0 = A^{-1}$ jest więc liczony w latach i nie czas życia wyznacza pasmo referencyjne.



$T=300\text{K}$; $v \approx 4 \times 10^4 \text{ cm/s}$; $\Delta t \approx 300 \mu\text{s}$;
 Δt – czas przebywania cząstki w rezonatorze

$$2\Delta\nu_0 = \frac{1,2\nu}{L}$$

Dla NH_3 w $T = 300\text{K}$, $2\Delta\nu_0 \approx 4 \times 10^3 \text{ Hz}$ i $Q_0 \approx 5 \times 10^6$

To nie są satysfakcjonujące wyniki **głównie** $\Delta\nu$ i Q_0 : **należy** $\nu \searrow$ lub $L \nearrow$

Stosowane są w tym celu dwie metody (NBS):

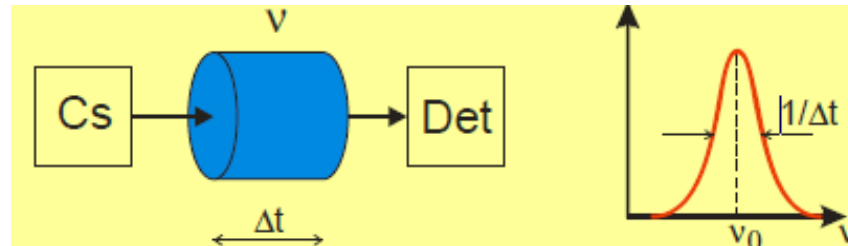
- Metoda **prążków Ramsey'a** (Separated Oscillatory Field Method)- **większe** L ;
- Fotonowe (**laserowe**) **chłodzenie cząstek** – **mniejsze** ν (konsekwencja badań chłodzenia laserowego - **kondensat Bosego-Einsteina**)

Metoda rozdzielania pól Ramsey'a

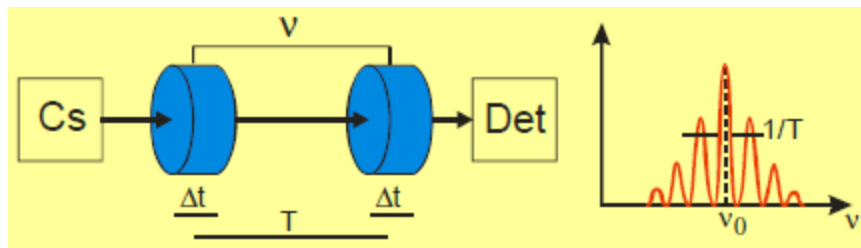
Norman F. Ramsey - 1915



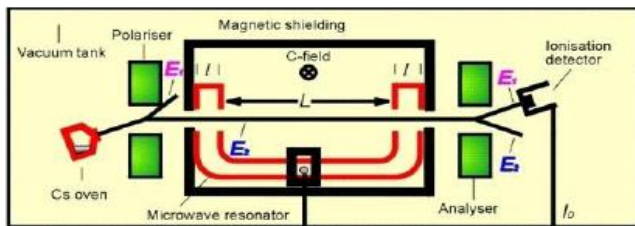
Klasyczny układ: szerokość linii określa $\Delta t = L/v$



Metoda **prążków** zaproponowana przez Ramsey'a



Rezonator składa się z dwóch wnęk sprzężonych. Obwiednia linii dana jest przez Δt , zaś szerokość listka centralnego przez $T = L_0/v$; L_0 – odstęp pomiędzy wnękami^{*)}.



$$P(\Delta t + T + \Delta t) \approx \frac{1}{2} \sin^2 \Omega_{R\tau} \left[1 + \cos 2\pi (\nu - \nu_{12}) T \right]$$

^{*)} Nagroda Nobla 1989

Laserowe chłodzenie – Nobel 1989

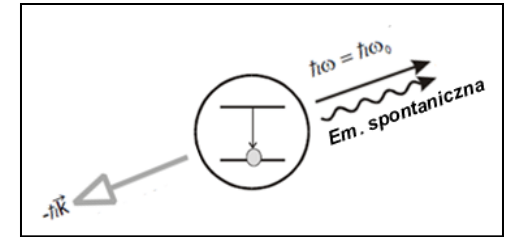
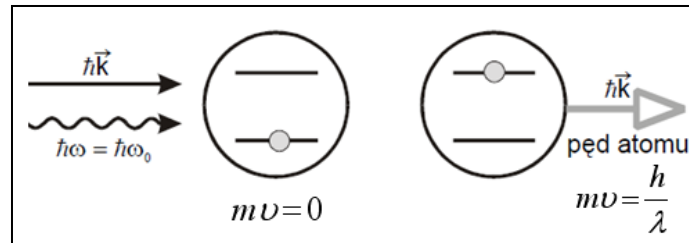
Hans G. Delhmelt - 1922



Zmniejszanie v jest równoznaczne z obniżeniem temperatury cząstek:

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{3}{2} k T$$

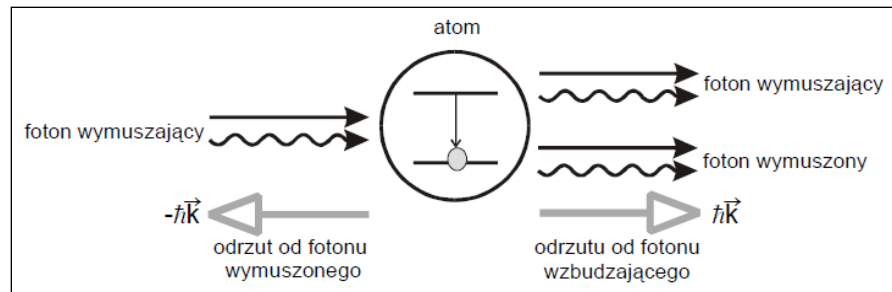
Idea laserowego chłodzenia polega na ukierunkowanym przekazywaniu cząstkom pędu fotonów



Wolfgang Paul

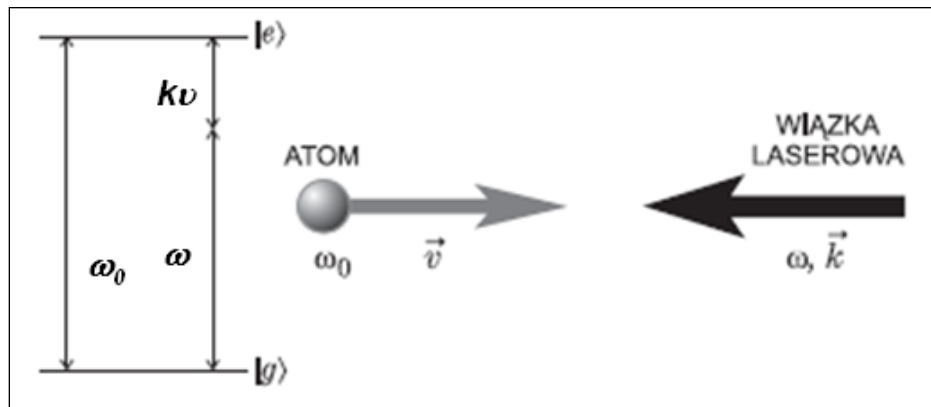


1913 - 1993



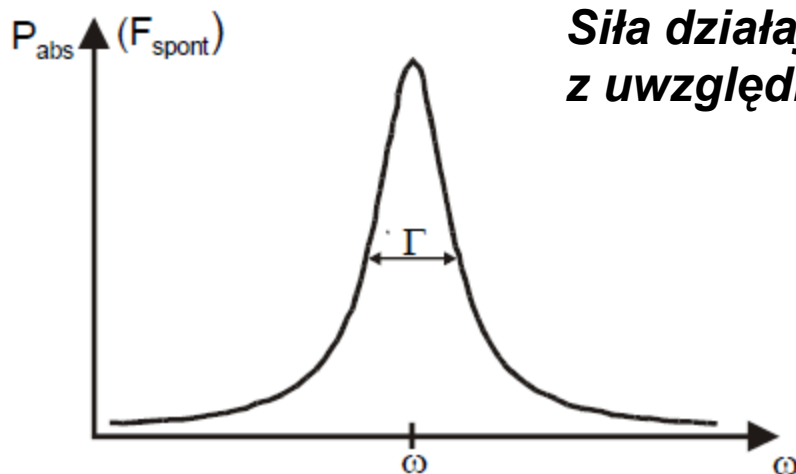
Emisja wymuszona – kompensacja wpływu pędu fotonów.

Chłodzenie dopplerowskie cząstek w ruchu



Kierunek wiązki chłodzącej przeciwny do kierunku ruchu cząstki, a częstość powinna być mniejsza o energię kinetyczną ruchu.

Fotony działają jedynie na v_z składową styczną prędkości o jednej, określonej wartości.



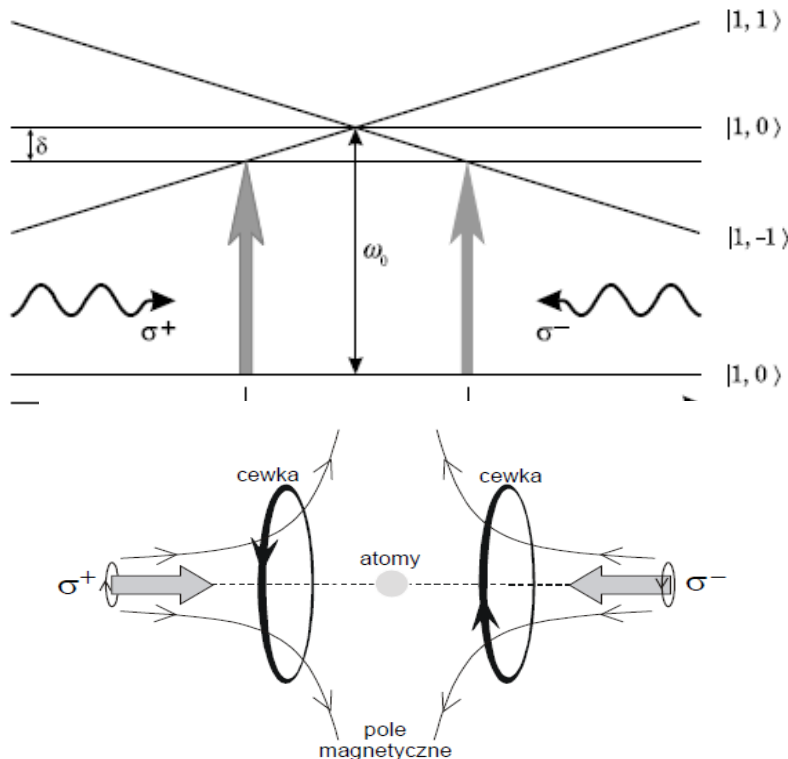
Siła działająca na cząstkę odzwierciedla kształt linii z uwzględnieniem przesunięcia Dopplera.

$$F_z = \frac{\Delta\omega^2}{\omega - kv_z - \omega_0 + i\Gamma/2}$$

Aby hamować cząstki o innych prędkościach należy przestrajać laser.

Pułapki magneto-optyczne (MOT – Magneto Optical Trap)

Zadaniem pułapek magneto - optycznych jest hamowanie cząstek o różnych prędkościach i gromadzenie ich w określonym miejscu.



Na drodze ruchu cząstek jest pole magnetyczne niejednorodne: $B=0$ dla $z=0$ i narasta dla $(0; \pm z)$ rozszczepiając poziom wzbudzony. Dwie wiązki laserowe o kołowych polaryzacjach $\sigma^\pm$ przeciwbieżnie oddziałują na cząstki: $\sigma^+ \rightarrow 1,1>$; $\sigma^- \rightarrow 1,-1>$. Siły wynikające z pędu fotonów gromadzą cząsteczki w $z=0$

Jednokierunkowa realizacja magneto-optycznego pułapkowania cząstek.

Trójwymiarowa pułapka magneto optyczna (MOT - magneto - optical trap) - Nobel 1997



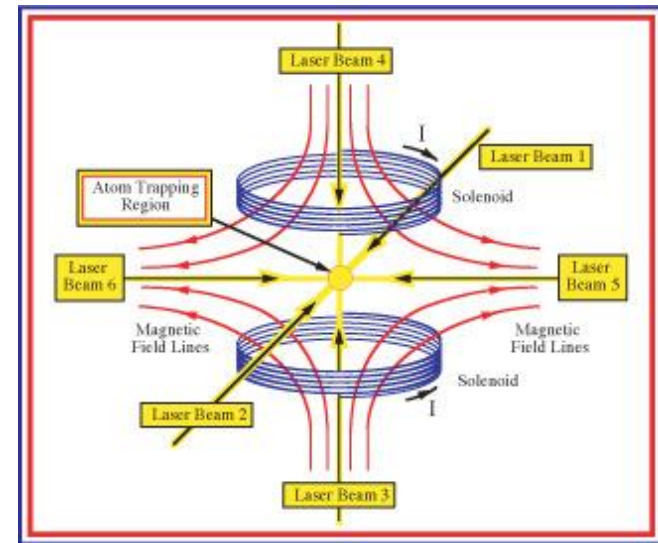
Steven Chu



Claude Cohen-Tannoudji

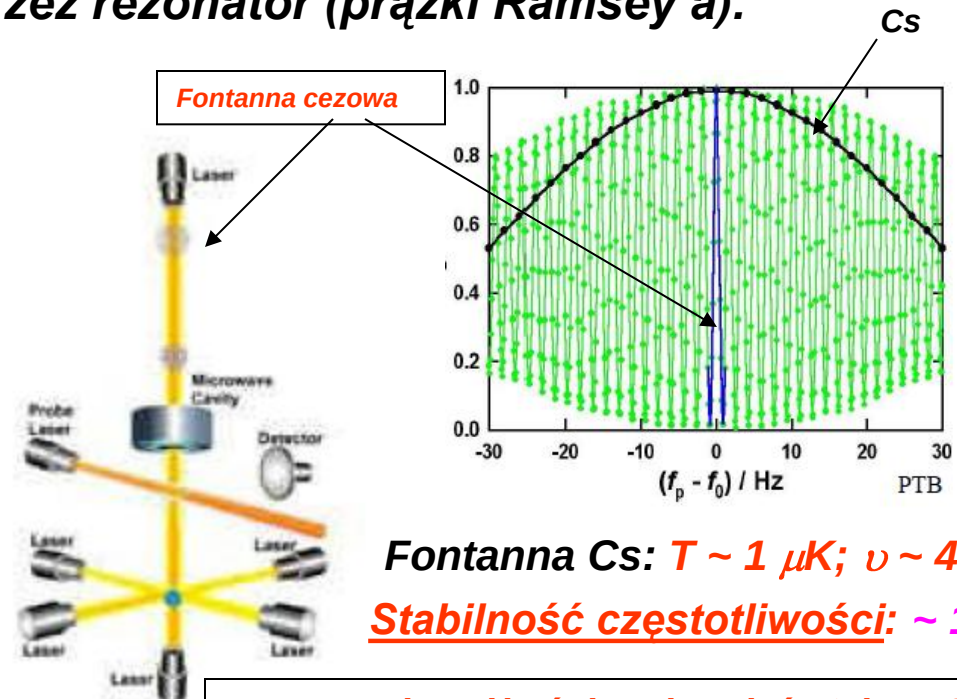
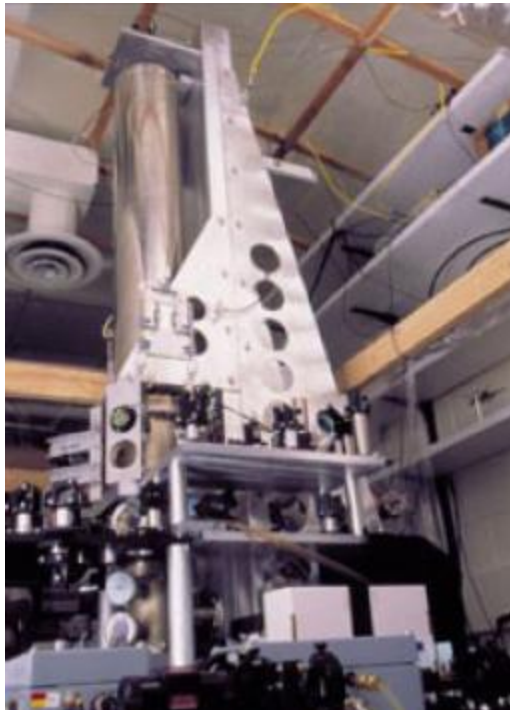


William D. Phillips



„Fontanna cezowa” - obowiązujący pierwotny wzorzec czasu i długości

Układ z laserowym chłodzeniem i pułapkowaniem atomów pionowo wyrzucanych do góry i grawitacyjnie zawracanych. W ten sposób przechodzą dwukrotnie przez rezonator (prążki Ramsey’a).



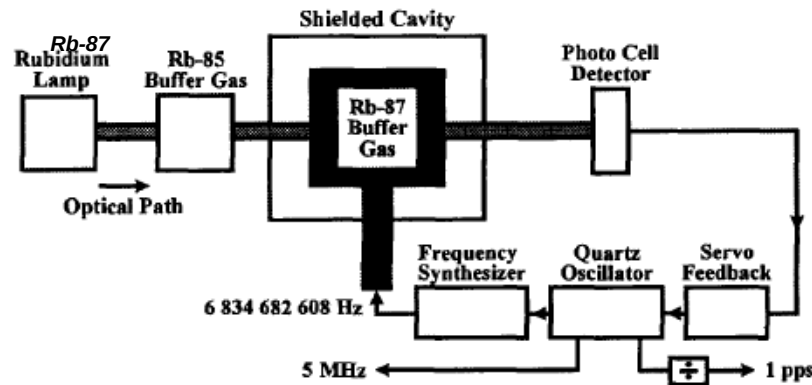
**Fontanna Cs: $T \sim 1 \mu\text{K}$; $v \sim 4 \text{ m/s}$;
Stabilność częstotliwości: $\sim 10^{-15}$**

**Zegar w nieważkości może mieć stab. $\sim 10^{-16}$
ale po uwzględnieniu efektów relatywistycznych**

Inne wzorce atomowe

Wzorzec cezowy jest skomplikowany, duży i drogi. Poszukiwane są inne metody. Jednym z najprostszych jest pasywny układ rubidowego atomowego wzorca.

Zegar rubidowy

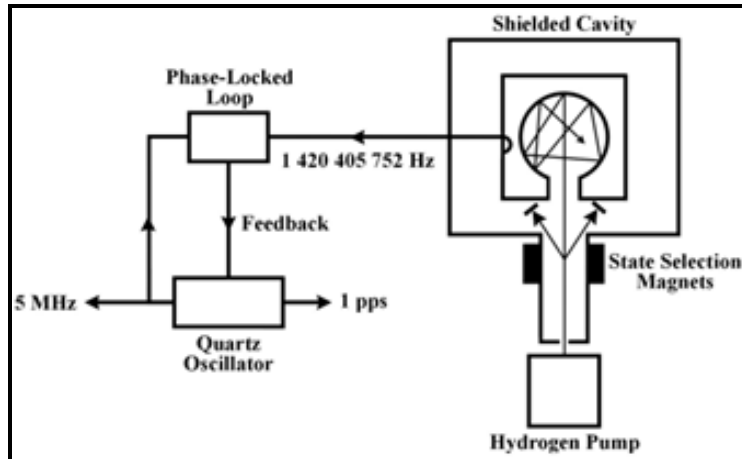


Dostrojenie częstości syntezy do przejścia atomowego Rb-87 objawia się maksymalnym tłumieniem wiązki optycznej (min. sygn. det.).

Najlepszy stosunek walorów technicznych do kosztów wytwarzania

Stabilność w granicach (10^{-11} – 10^{-12}). Wartość stabilności 5×10^{-12} osiągana jest po kilku minutach od włączenia. Parametry wystarczające w wielu zastosowaniach.
Układ powszechnie montowany na satelitach GPS.

Zegar wodorowy



Typowy **maser** – generator mikrofalowy z rezonatorem dostrajanym do przejścia atomowego **pompowany** przez **wydzielenie atomów wzbudzonych**. Mimo niskiej częstotliwości duże $Q_0 \sim 10^9$.

Stabilność: 10^{-12} ($\tau = 1s$); 10^{-15} ($10^3 - 10^5 s$); ustępuje ^{133}Cs w okresie roku.

Wzorzec wodorowy z wszystkich dostępnych komercyjnie zegarów atomowych należy do najdroższych w wykonaniu i eksploatacji.

Najbardziej liczne zastosowania wzorców atomowych – satelity GPS (każdy wyposażony jest w kilka zegarów) wykorzystują zegary rubidowe i cezowe

Fontanna cezowa od 1967 pełni rolę pierwotnego wzorca czasu i częstotliwości

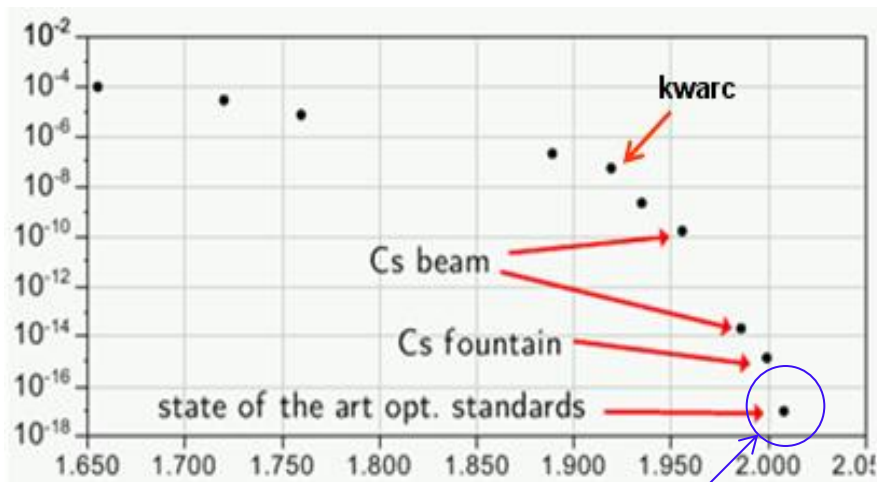
Porównanie stabilności dotychczasowych wzorców częstotliwości

The Evolution of Time and Frequency Standards

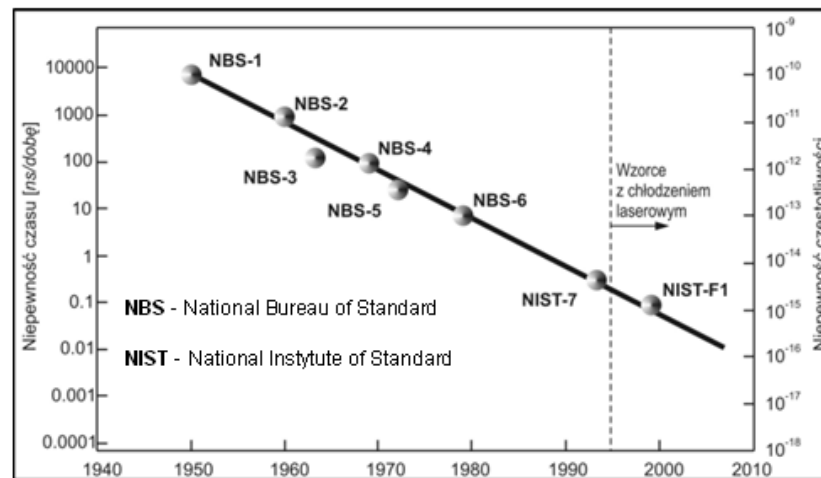
Standard	Resonator	Date of origin	Timing uncertainty (24 hr)	Frequency uncertainty (24 hr)
Sundial	Apparent motion of sun	3500 B.C.	NA	NA
Verge escapement	Verge and foliet mechanism	14th century	15 min	1×10^{-2}
Pendulum	Pendulum	1656	10 sec	7×10^{-4}
Harrison chronometer (H4)	Pendulum	1759	300 msec	3×10^{-6}
Shortt pendulum	Two pendulums, slave and master	1921	10 msec	1×10^{-7}
Quartz crystal	Quartz crystal	1927	10 μ sec	1×10^{-10}
Rubidium gas cell	^{87}Rb resonance (6,834,682,608 Hz)	1958	100 nsec	1×10^{-12}
Cesium beam	^{133}Cs resonance (9,192,631,770 Hz)	1952	1 nsec	1×10^{-14}
Hydrogen maser	Hydrogen resonance (1,420,405,752 Hz)	1960	1 nsec	1×10^{-14}
Cesium fountain	^{133}Cs resonance (9,192,631,770 Hz)	1991	100 psec	1×10^{-15}

Historia rozwoju mikrofalowych wzorców częstotliwości

Zmiana niepewności częstotliwości wzorca Cs: ~ 1 rząd wielkości na dekadę lat.



Pierwsze wzorce optyczne



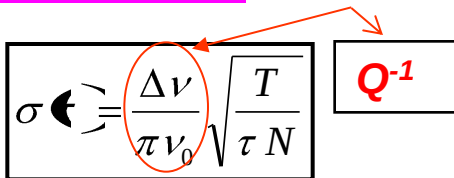
Zmiana czasu 1ns na dobę oznacza zmianę 1s na ok. $2,74 \times 10^6$ lat.

Stabilność wzorców mikrofalowych zbliżyła się do kresu możliwości, nie oznacza to kresu rozwoju wzorców jako takich. Nadzieja w optyce.

V. Optyczny wzorec

Możliwości poprawy stabilności wzorca czasu

Przypomnijmy: stabilność mierzona **Wariancją Allana** zależy od dobroci wzorca


$$\sigma_y \approx \frac{\Delta \nu}{\pi \nu_0} \sqrt{\frac{T}{\tau N}}$$

The diagram shows the formula for the Allan variance σ_y . A red circle highlights the term $\frac{\Delta \nu}{\pi \nu_0}$, and a red arrow points from a box containing Q^{-1} to this term, indicating that the stability is proportional to the inverse of the quality factor Q .

Przy ustalonym ν_0 , stabilność określa szerokość linii rezonansowej zjawiska referencyjnego $\Delta \nu$.

Dotychczasowy postęp osiągnięto przez obniżenia szerokości linii $\Delta \nu$.

Udział laserów w procesie poprawy stabilności mierzony był nagrodami Nobla:

1. 1989 – Norman F. Ramsey, Hans G. Dehmelt, Wolfgang Paul:

„Za wynalezienie metody oscylacyjnych pól i rozwój techniki pułapek jonowych”

2. 1997 – Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William D. Phillips:

„Za rozwój metod chłodzenia i pułapkowania atomów promieniowaniem laserowym

W fontannie obniżono prędkość przelotu Cs w rezonatorze do $v \sim 4 \text{ m/s}$; ($T \sim 1 \mu\text{K}$),
co dało obniżenie niepewności o 2-rzędę wielkości do $\sim 10^{-15}$

Dalszy postęp - przeniesienie częstotliwości wzorca w zakres optyczny

Ponieważ: $\nu_{\text{opt}} / \nu_{\text{mikr}} \sim 10^4$ spodziewana stab. wzorca optycznego wyniesie $\sim 10^{-18}$
Ustanowienie nowego wzorca optycznego wymaga redefinicji jednostki - sekundy

Czy i czym zastąpić można wzorzec cezowy? - - Należy wykorzystać zjawisko o większej „dobroci”

Wykorzystać przejścia energetyczne w atomach (jonach) w paśmie optycznym

$$\frac{\nu_{\text{opt}}}{\nu_{\text{mikr}}} \approx 10^4 \div 10^5$$

Zapewniając tego samego rzędu pasmo $\Delta\nu$ przejście do zakresu optycznego zdecydowanie może **zwiększyć Q i poprawić stabilność i dokładność częstotliwości.**

W 2006 Międzynarodowy Komitet Miar i Wag powołał Grupę Roboczą do śledzenia postępów w tym zagadnieniu i rekomendacji optycznego wzorca

Wymagania:

1. Naturalna szerokość linii poniżej 1 Hz
2. Możliwość detekcji rezonansu z najwyższą rozdzielczością
3. Niezależność częstości przejścia od zewnętrznych pól elektr. i magnet.

Kandydaci: Atomy: Mg; Ca; Sr; Yb. Jony: $^{191}\text{Hg}^+$; $^{171}\text{Yb}^+$; $^{88}\text{Sr}^+$; Ca^+ .

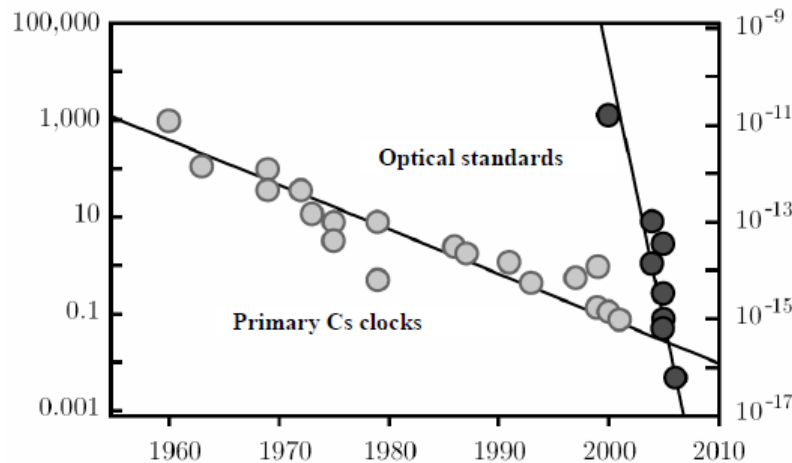
Prace nad wzorcami optycznymi są intensywnie prowadzone począwszy od lat 70. lecz największe postępy w tym zakresie poczyniono w ostatniej dekadzie.

Rekomendacja Grupy Roboczej Komitetu Międzynarodowego Wagi i Miar - CIMP 2006

Atom/ ion	Transition	Frequency of transition/ uncertainty
^{87}Sr	$5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$	429 228 004 229 877 Hz/ $1.5 \cdot 10^{-14}$
$^{88}\text{Sr}^+$	$5s\ ^2S_{1/2} - 4d\ ^2D_{5/2}$	444 779 044 095 484 Hz/ $7 \cdot 10^{-15}$
$^{171}\text{Yb}^+$	$6s\ ^2S_{1/2}(F=0) -$ $5d\ ^2D_{3/2}(F=2)$	688 358 979 309 308 Hz/ $9 \cdot 10^{-15}$
$^{191}\text{Hg}^+$	$5d^{10}6s\ ^2S_{1/2}(F=0) -$ $5d^96s^2\ ^2D_{5/2}(F=2)$	1 064 721 609 899 145 Hz/ $3 \cdot 10^{-15}$

Niepewność częstości optycznych jest lepsza niż niepewność wzorca cezowego

Rozwój stabilnych generatorów optycznych



Lata 2000 - 2010 zmiana **niepewności** o **pięć rzędów wielkości**

Jako **medium aktywne** stosowane są **chmury atomów** lub **pojedyncze jony** chłodzone laserowo i uwięzione w odpowiednich pułapkach

W obydwu przypadkach wykorzystuje się **przejścia wzbronione**

Typowy układ poziomów energetycznych



Do **chłodzenia** wykorzystywane jest przejście do poziomu o **krótkim czasie życia ~10 ns** i **emisję spontaniczną**. Wiele przejść schładza atomy lub jon. Jako **zegarowe** służy **przejście wzbronione o długim >1s czasie życia**.

Rezonans przejścia zegarowego wykrywa się przez **detekcję luminescencji w przejściu chłodzącym**

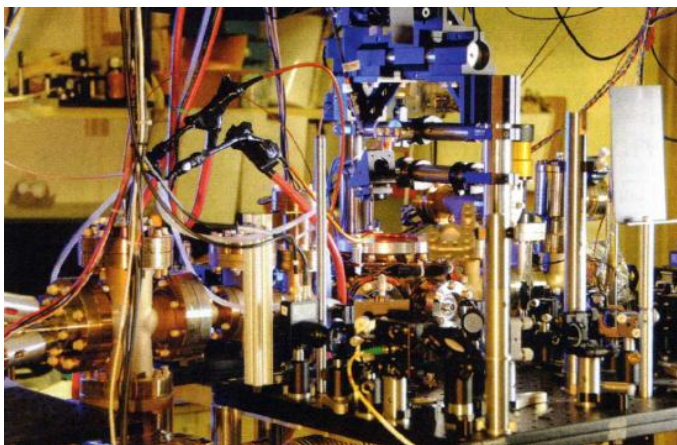
Główne ośrodki badawcze

<i>Skrót</i>	<i>Nazwa</i>	<i>jony</i>	<i>atomy</i>
NIST	<i>National Institute of Standard and Technology - USA</i>	$^{199}\text{Hg}^+; ^{27}\text{Al}^+$	$^{87}\text{Sr}, \text{Yb}$
PTB	<i>Physikalisch Technische Bundesanstalt - Germany</i>	$^{171}\text{Yb}^+$	^{87}Sr
NPL	<i>British National Physics Laboratory</i>	$^{171}\text{Yb}^+$	
NRC	<i>National Research Council - Canada</i>		^{87}Sr
LNE	<i>Laboratoire National de Metrologie et d'Essais</i>		^{87}Sr
NMIJ	<i>National Metrology Institute of Japan</i>		^{87}Sr

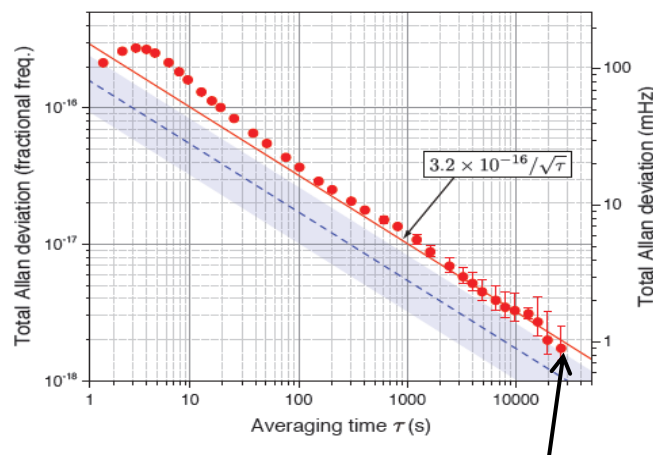
Wymienione w tabeli badania dotyczą wzorców wytypowanych przez Grupę Roboczą CIMP. Oprócz nich badana jest przydatność innych cząstek, szczególnie atomów: ^{40}Ca , ^{199}Hg , ^{171}Yb . Wysokie potencjalne możliwości prezentuje atom ^{199}Hg , ma niską czułość na wpływ promieniowania podczerwonego i niepewność rzędu 10^{-18} .

Pierwszy „optyczny zegar atomowy” na atomach Yb

NIST (USA) 2013r. [3]



Niepewność: < 2ps / dobę



Długoterminowa stabilność wzorca: < $2 \cdot 10^{-18}$

„Zegar” wykorzystuje ok. 10 000 atomów Yb o temp. 10μK, unieruchomionych w studniach utworzonych przez interferujące pola wiązek laserowych.

Układ jest dość skomplikowany i nie musi być „zegarem docelowym”.
Prace w tym zakresie są nadal intensywnie prowadzone.

[3] N. Honkley et al. „An atomic clock with 10^{-18} instability” Published in line May 24 (2013)

Wnioski dotyczące zegarów optycznych

1. Przejścia optyczne stają się kandydatami II generacji wzorców czasu
2. Urządzenia na wytypowanych przez CIMP przejściach są w rozwoju
3. Niektóre już udowodniły (Yb) możliwość wykonania wzorca 10^{-18} .
4. Dziś nie jest jeszcze jasne, jaki rodzaj zegara będzie najlepszy:
uwięziony w pułapce pojedynczy jon, czy uwięzione w siatce atomy.
5. Atomy dają lepszy stosunek S/N lecz wymagają precyzyjnej i długo czasowej kompensacji przesunięcia częstości polem tworzącym siatkę
6. Bardzo obiecującym atomem jest ^{199}Hg z powodu małej czułości na promieniowanie cieplne (20 razy mniej czuły niż ^{87}Sr)
7. Wydaje się, że inne optyczne zegary z niestabilnością i dokładnością na poziomie rzędu 10^{-18} pojawią się w laboratoriach w ciągu kilku lat.

Wniosek generalny: Postęp w zakresie zegarów optycznych jest bardzo szybki, tak że w najbliższej przyszłości należy się spodziewać z dużym prawdopodobieństwem redefinicji sekundy

VI. Pomiar częstotliwości optycznych

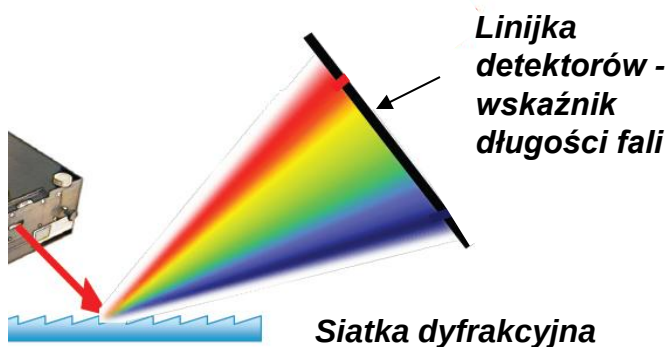
Pomiary długości fali

W klasycznej optyce z reguły mierzona była długość fali, a nie częstotliwość.

Pomiary częstotliwości oparte są na bezpośrednim lub pośrednim (przemiana częstotliwości za pośrednictwem znanego wzorca) zliczaniu okresów.

„Elektroniczne liczniki” mają ograniczoną rozróżnialność **max. do 100 GHz**, znacznie niższą niż szybkość zmian przebiegów w optyce: **powyżej 100 THz**

Optyczne metody pomiaru długości fali bazują na elementach dyspersyjnych, w których warunki propagacji światła (szybkość, kierunek) zależą od długości fali

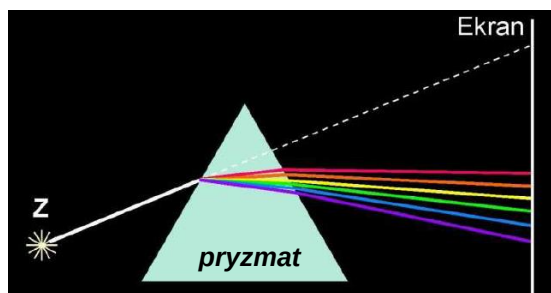


Mimo prostej zależności pomiędzy λ i ν metody te nie są równoznaczne: pomiar długości fali jest mniej dokładny niż pomiar częstotliwości, a **szybkość propagacji** fali zależy od wielu parametrów i nie była oraz nie jest znana z zadowalającą dokładnością.

Metody pomiaru długości fali

Najczęściej do pomiaru długości fali wykorzystuje się zjawisko zmiany kierunku propagacji promieniowania o różnych częstościach w ośrodkach dyspersyjnych

Dyspersja materiałowa: $n = n(\lambda)$

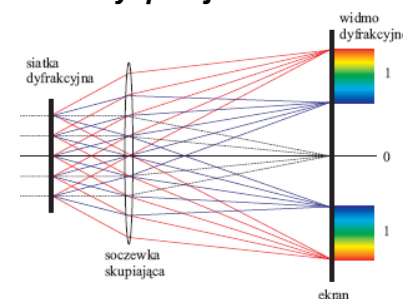


Dyspersja:

$$D = \frac{d\alpha}{d\lambda}$$

α - odchylenie toru promienia

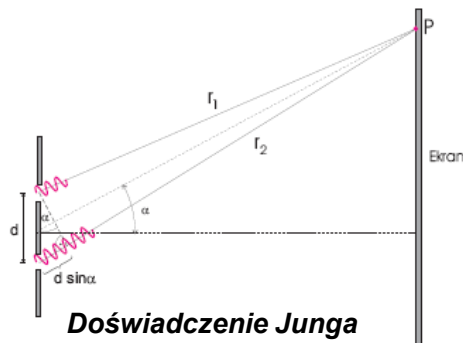
Dyspersja kształtu



Równanie siatki dyfrakcyjnej:

$$d \sin \alpha_m = m\lambda$$

Jednostki λ można nanieść na ekran



W obydwu przypadkach położeniom punktu świetlnego na ekranie można przyporządkować jednostki długości fali.

Pomiary częstotliwości

Potrzeba pomiarów częstotliwości pojawiła się wraz z monochromatycznymi źródłami (generatorami) fal elektromagnetycznych szczególnie dla potrzeb telekomunikacyjnych

Podstawowa, cyfrowa metoda pomiaru częstotliwości wynika z definicji i polega na zamianie sygnału mierzonego na ciąg standardowych impulsów, a następnie zliczenie ich w wzorcowym odcinku czasu równym np. 1 sek.

Mierzony przebieg może być **periodyczny** (częstotliwość stała) lub **nieperiodyczny**. Zawsze pomierzona wartość częstotliwości jest jej **wartością średnią za czas zliczania**.

Ograniczenia metody: skończona szybkość zliczania impulsów w stosunku do wykorzystywanego zakresu widmowego sygnałów elektrycznych i fal e-m. Nastąpił tym względnie duży postęp – obecnie zakres zliczania jest ~ **100 GHz**

Rozszerzenie zakresu pomiarowego

Rozszerzenie zakresu pomiarowego poza zakres *licznika* jest realizowane metodami nieliniowego powielania i przemiany częstotliwości:

$$mf_X - nf_W = f_L$$

a dla $f_X > f_W$ uprościć do

$$|f_X - nf_W| = f_L$$

Wielkości f_X i f_W powinny znajdować się zakresie pomiarowym metody (licznika), zaś liczby m i n mogą być **niewielkimi liczbami całkowitymi**.

Częstotliwość – f_X spełniającą powyższe zależności uznawać będziemy za częstotliwości mierzalne opisaną powyżej metodą

Niestety przeskok od **częstotliwości mikrofalowych**, gdzie **znajduje się wartość wzorca** i sięga **metoda zliczania impulsów**, do **częstotliwości optycznej** jest zbyt duży dla prostego zastosowania opisaną powyżej, prostej procedury pomiarowej.

Konsekwencje pojawienia się laserów

Wraz z laserem pojawiła się potrzeba pomiarów częstotliwości optycznych.

Wzorzec pierwotny – cezowy generuje mikrofałe $\nu_w = 9\,192\,631\,770\text{ Hz}$

Wzorce pomocnicze : rubidowy ^{87}Rb -

$\nu_w = 6\,834\,682\,608\text{ Hz}$

wodorowy:

$\nu_w = 1\,420\,405\,752\text{ Hz}$

Częstość optyczna $\sim 10^{15}\text{ Hz}$ nie jest dostępna w bezpośrednim pomiarze, możliwości elektroniki kończą się przy $10^{10} - 10^{11}\text{ Hz}$

Problem: Istnieje konieczność przeniesienia jednostki Hz z zakresu mikrofalowego (wzorce) do zakresu optycznego

$$\nu_o/\nu_w \sim (40-80)10^3$$

Klasyczna procedura: Powielanie częstotliwości - trudne i pracochłonne. Przykład poniżej.

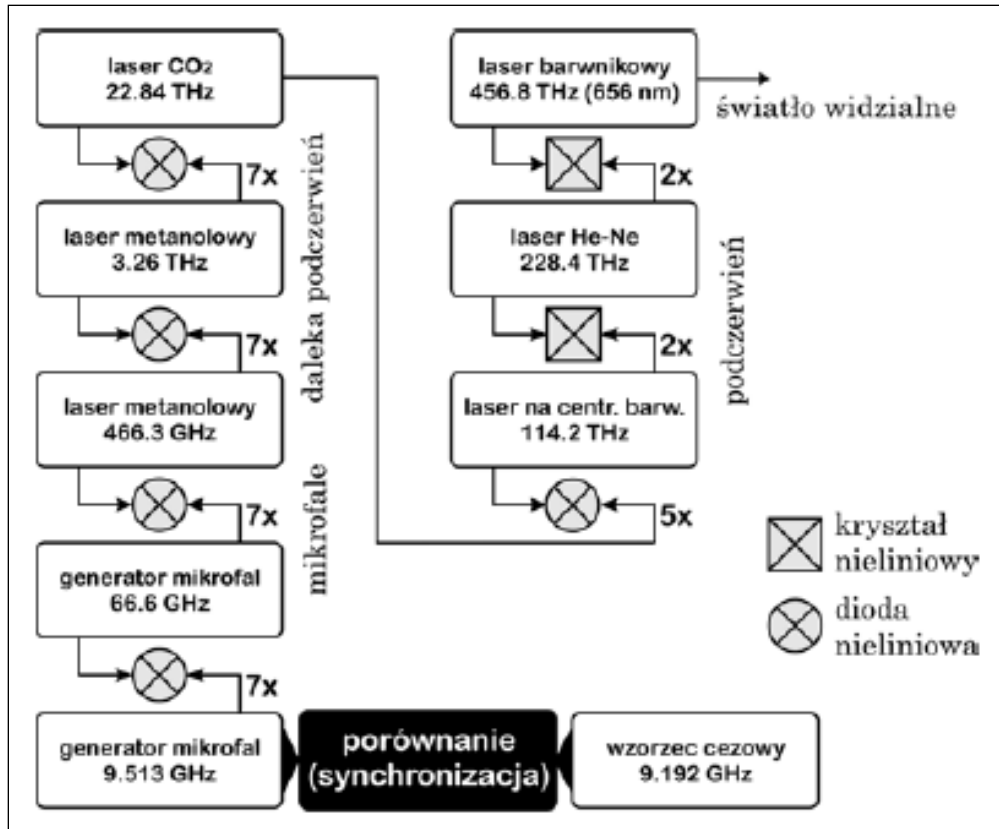
Klasyczna metoda powielania częstotliwości

(Przykład : - pomiar częstotliwości przejście **Ca 656 nm** $\nu_x/\nu_w \sim 49695$)

$$\nu_x = \mathbf{456,8\ THz\ (656\ nm)}$$

$$\nu_w = \mathbf{9,192\ GHz\ (^{133}\text{Cs})}$$

$$\text{St. pow.} = 7^4 \times 5 \times 2^2 = \mathbf{48020}$$



Pomiar skomplikowany:
wymaga: **5** nieliniowych diod, **2** nieliniowych kryształów, **2** generatorów mikrofalowych i **6** laserów.

Rozwiązanie nie jest uniwersalne, każdy pomiar wymaga budowy swojego łańcucha

Rozwiązanie problemu w postaci „grzebienia częstotliwości” [4, 5]



John L. Hall - 1934



Theodor W. Hansch - 1941

2005 – Nagroda Nobla

„za wkład w rozwój precyzyjnej
spektroskopii laserowej w
szczególności za technikę
optycznego grzebienia
częstotliwości”

Optyczny grzebień częstotliwości oferuje:

1. **Utworzenie skali (znaczników o znanych wartościach) częstotliwości w zakresie optycznym;**
2. **Ścisłe powiązanie znaczników o częstotliwościach optycznych z wzorcową częstotliwością w zakresie mikrofalowym (częstotliwością wzorca).**

[4] Diddams et al. „Direct Link between Microwave and Optical Frequencies with a 300 THz Femtosecond Laser Comb” PRL84 5102 29 May 2000

[5] John L. Hall „Defining and Measuring Optical Frequencies: the Optical Clock Opportunity and More”, Nobel Lecture, Rev. of Mod. Phys.78, (2006)

Podstawą „grzebienia częstotliwości” jest

Laser z synchronizacją modów (M-L)

(Sposób generacji impulsów laserowych znany od lat 60.)

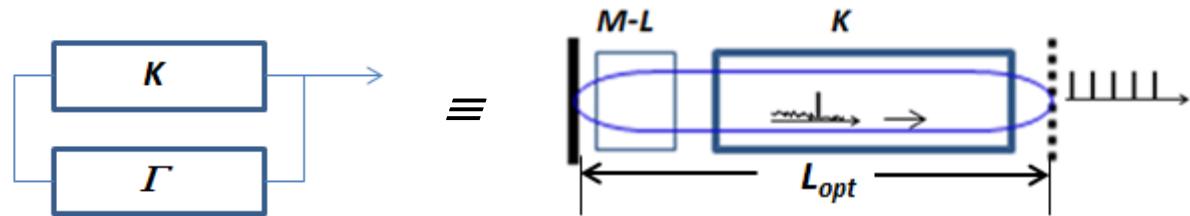


Willys E. Lamb
1913-2008

W. E. Lamb (1964) - idea synchronizacji modów (M-L) [6]

L. E. Hargrove (1964) – generacja metodą M-L w laserze He-Ne [7]

A. J. de Maria (1966) - zasada M-L jest identyczna jak impulsowego mikrofalowego generatora regeneratywnego podanego przez C. C. Cutlera w 1955 [8]



Zasadnicza różnica: $\lambda_{opt} \ll \lambda_{rad}$; $\lambda_{rad} \gg \text{wym. el.}$ $\lambda_{opt} \ll a, L$; (widmo i kształt wiązki)

Charakterystyki widmowe i czasowe promieniowania kształtowane są przez:
pasmo częstotliwości wzmacniacza, oraz częstotliwości rezonansowe rezonatora

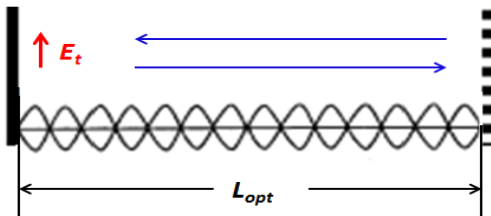
[6] W. E. Lamb Jr., „Theory of an optical laser” Phys. Rev. 134 (6A), 1964

[7] L. E. Hargrove et. al. „Locking of the He-Ne laser modes induced by synchronous intercavity modulation” Appl. Phys. Lett. 5 (1), 1964.

[8] A.J. de Maria et. al. Self Mode-Locking of Lasers with Saturation Absorbers” Appl. Phys. Lett. 8 (7), 1966.

Częstotliwości rezonansowe rezonatora:

mody TEM_{00q} (E_t , H_t)



Warunek rezonansu: węzły składowej stycznej: E_t pola e-m na zwierciadłach:

$$E_{t,0} = E_{t,L} = 0$$

$$L_{opt} = q \frac{\lambda_q}{2}$$

q – przeważnie duża liczba całkowita; istnieje liczny zestaw długości fal spełniających warunek rezonansu np. λ_{q+1}

Kolejne częstotliwości można zapisać jako:

$$f_q = q \frac{c}{2L_{opt}}$$

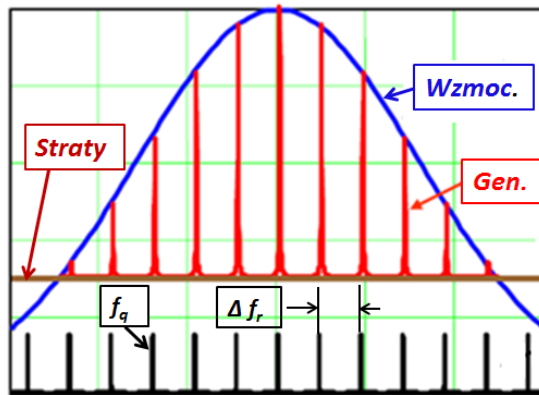
$$\Delta f_r = f_{q+1} - f_q = \frac{c}{2L_{opt}}$$

Odstęp między sąsiednimi rezonansami jest stały i zależy tylko od długości rezonatora

L [cm]	0,5	1	10	50	100
Δf_r [GHz]	10	5	1	0,1	0,05

Liczba wzbudzonych modów rezonatora

Aktywny materiał w laserze wzmacnia promieniowanie w określonym pasmie:



W zależności od ośrodka czynnego
dla $\Delta f_r = 1\text{GHz}$

$$N_m \sim 1 \div 10^5$$

Liczba modów:

$$N_m \sim \frac{\Delta f_{lum}}{\Delta f_r} \gg 1$$

Laser	$\lambda_m [\text{nm}]$	$f_m [\text{THz}]$	$\Delta\lambda_l [\text{nm}]$	N_m
He-Ne	632,8	474	$2 \cdot 10^{-3}$	1
$\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Cr}^{3+}$	694,3	432,1	0,48	300
YAG: Nd^{3+}	1064	282	0,45	120
Szkło: Nd^{3+}	1064	282	28	7421
Szkło: Yb^{3+}	1030	291,2	200	56506
$\text{Al}_2\text{O}_3 : \text{Ti}^{3+}$	760	394,7	230	119449

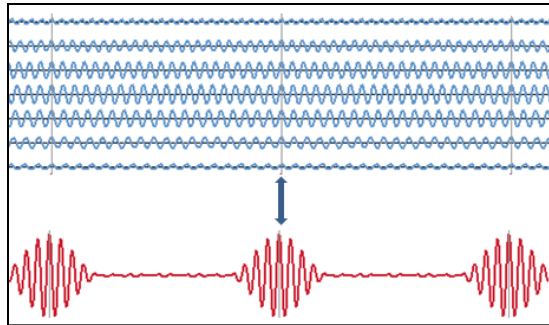
Przebiegi czasowe w laserze M-L

Lasery z synchronizacją modów są laserami impulsowymi i mają zdolność generacji impulsów

$$\tau_{\min} \sim \Delta f_{\text{lum}}^{-1} \sim 10 \div 100 \text{ fs}$$

Najkrótsze – kilka okresów fali o średniej częstotliwości

Powstanie impulsów wymaga uzgodnienia faz (synchronizacji) poszczególnych modów



$$\tau_{\min}^{\text{Gs}} \simeq \frac{0,441}{N \cdot \Delta f_r}$$

$$\tau_{\text{Ti:S}} \sim 3,4 \text{ fs}$$

Brak synchronizacji modów



Synchronizacja modów



Doniosłość badań nad „grzebieniem częstotliwości”

Jeżeli lasery z M-L znane były od prawie 40. lat, to na czym polega doniosłość badań Johna L. Hall’a i Theodora W. Hansch’a, że otrzymali za nie w 2005r. Nagrodę Nobla

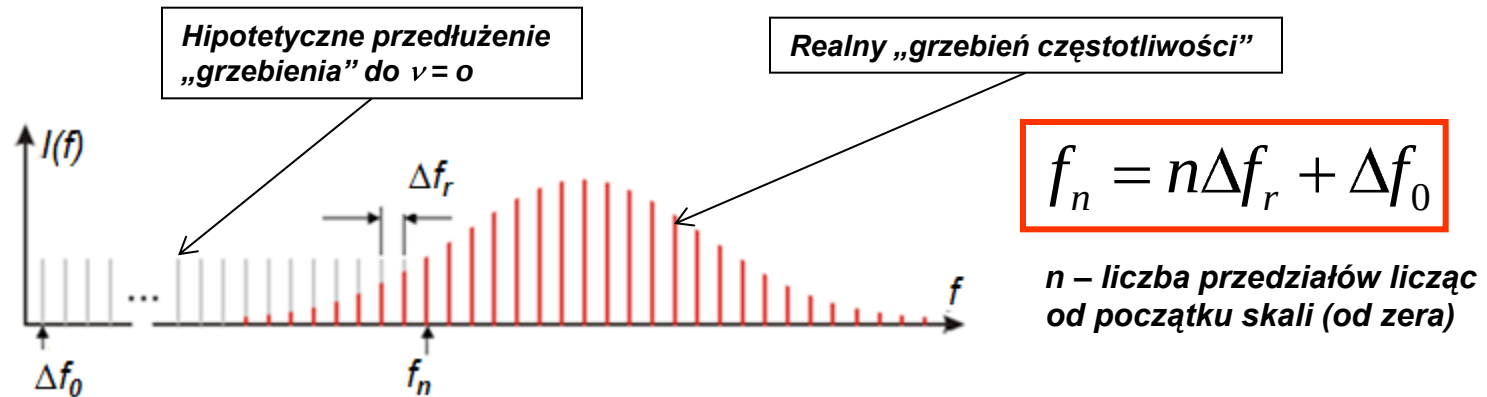
Nagrodzeni w 2005 Nagrodą Nobla badacze wykazali, że:

- 1. Odstęp częstotliwości pomiędzy poszczególnymi „zębami grzebienia” jest stały w całym jego zakresie (identyczny na końcu grzebienia jak na początku),***
- 2. Dowolną częstotliwość składową grzebienia można wyrazić przez dwie częstotliwości leżące w pasmie mikrofalowym,***
- 3. Częstotliwości te można wyznaczyć na podstawie analizy grzebienia, jeżeli zawiera on częstotliwości różniące się co najmniej o oktawę.***

Nie jest celem tej prezentacji powtarzanie dowodów autorów nagrody.

Jednak własności 2. i 3. są tak ważne z punktu widzenia metrologicznego i na tyle proste, że mogą (i powinny) być w tym miejscu pokazane.

Wartości składowych „grzebienia częstotliwości” *)



$$\Delta f_r = \frac{c}{2L_{opt}}$$

$$\Delta f_0 \leq \Delta f_r$$

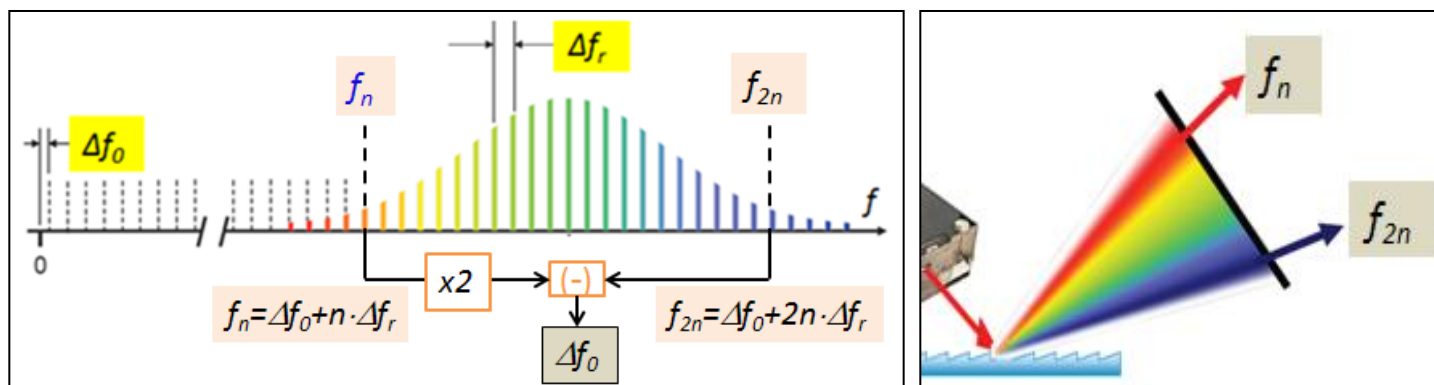
Dla typowych $L_{opt} \sim (1 \div 100) \text{ cm}$, $\Delta f_r \sim (10^8 \div 10^{10}) \text{ Hz}$

Jak już pokazano dla typowych rozmiarów rezonatora odstęp częstotliwości poszczególnych „zębów” leży zakresie mikrofal

Częstotliwości Δf_r i Δf_0 mogą być pomierzone metodami klasycznymi np. metodą heterodynową i zliczania okresów.

*) Część rysunków na podstawie T. M. Brzozowski „Optyczny grzebień częstotliwości” Zakład Fotoniki IFUJ (2005) [9]

Metodyka wyznaczanie częstotliwości początkowej grzebienia - Δf_0



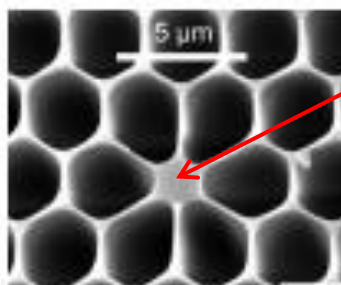
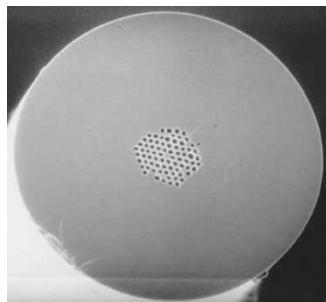
$$2 \Delta f_0 + n \cdot \Delta f_r - \Delta f_0 + 2n \cdot \Delta f_r = \Delta f_0$$

Częstotliwość początkowa Δf_0 jest różnicą pomiędzy drugą harmoniczną pewnej składowej a składową dwukrotnie od niej wyższą.

To nie zawsze jest możliwe. Materiałów laserujących mających pasmo generacji obejmujące **oktawę** praktycznie nie ma. Warunki zbliżone zapewnia jedynie **Ti:S**

Rozwiązanie - Generacja „Supercontinuum”

Światłowód fotoniczny:



$$r_r = (1-3) \mu m$$

$$P = P_L + P_{NL} \approx \varepsilon_0 \chi^1 E + \chi^3 E^3$$

$$n = n_0 + n_2 I$$

$$n_2 \ll n_0 \quad \chi^3 \ll \chi^1$$

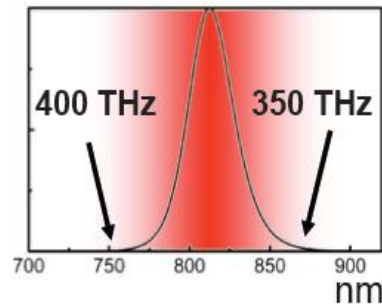
- dla dużych gęstości mocy występują zjawiska nieliniowe – poszerzenie pasma częstotliwości.

Dominujące zjawiska nieliniowe (ośrodki z $\chi^{(3)}$ wykazują optyczny efekt Kerra)

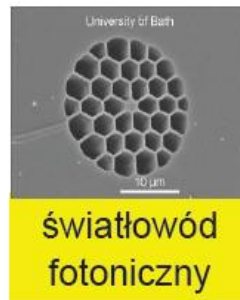
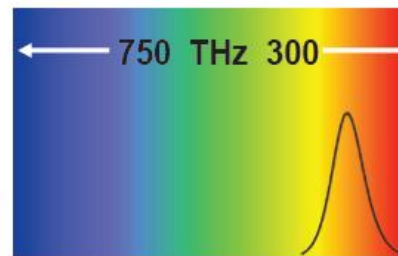
1. **Samo-modulacja fazy (SPM- Self- Phase Modulation);**
2. **Skrośna modulacja fazy (XPM – Cross- Phase Modulation);**
3. **Oddziaływania (mieszanie) cztero-falowe (FWM – Four Wave-Mixing);**
4. **Wymuszone rozproszenie Ramana (SRS – Stimulated Raman Scatering);**
5. **Generacja solitonowa i jej niestabilności w tym (SSFS- Soliton Self Frequency Shift)**

„Supercontinuum” zachowuje cechy widma M-L

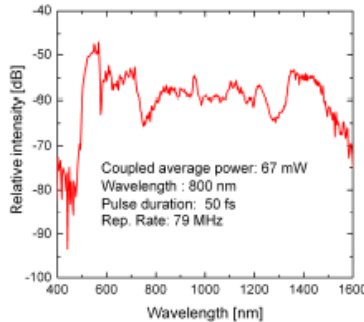
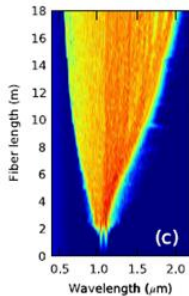
Widmo wejściowe



Widmo poszerzone



Światłowód fotoniczny znacznie poszerza widmo sygnału wzbudzającego

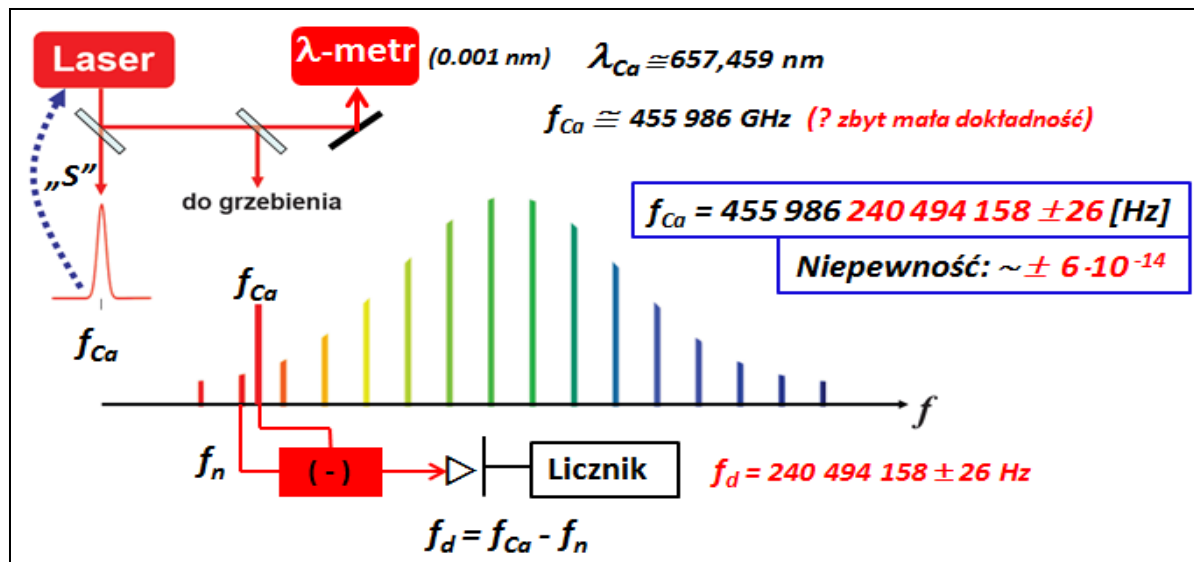


Widmo częstotliwości (grzebień) uformowany w trakcie generacji M-L zachowuje wszystkie swoje cechy po poszerzeniu w światłowodzie fotonicznym – „Supercontinuum”

„Supercontinuum” wzbudzone impulsami M-L jest nadal „optycznym grzebieniem częstotliwości”

Pomiar częstotliwości optycznych [9]

(zbliżona linia wapnia Ca – 657,459 nm)



„Grzebień częstotliwości” stanowi **uniwersalną metodę** pomiaru optycznych częstotliwości przy wykorzystywaniu obecnie obowiązujących wzorców

[9] T. M. Brzozowski: „Optyczny grzebień częstotliwości” Seminarium - Zakład Fotoniki IFUJ (7.11.2005)

VII. Redefinicja sekundy

Warunki dla redefinicji sekundy

1. Budowa wzorcowego generatora fal optycznych o stabilności $\sim 10^{-18}$;
2. Dostępność sygnału wzorcowego w pełnym pasmie częstotliwości.

Na początku XXI w. (rok 2000) żaden z tych warunków nie był spełniony.

Dostępność sygnału wzorcowego:

1. możliwość porównania częstotliwości wzorcowej z pasma **mikrofal** (wzorzec **mikrofalowy**) z **optyczną** częstotliwością mierzoną,
2. **lub odwrotnie** porównanie wzorcowej częstotliwości **optycznej** (wzorzec **optyczny**) z mierzoną częstotliwością z pasma **mikrofal**.

Stosowana powszechnie **metoda heterodynowa** przy porównywaniu tak różnych częstotliwości ($\nu_{\text{opt}} / \nu_{\text{mikr}} \sim 10^4$), aczkolwiek teoretycznie możliwa wymaga budowy wielu pośrednich stopni i jest wysoce niepraktyczna.

Do niedawna fakt ten ograniczał pomiar częstotliwości optycznych^{*)}.

^{*)} Patrz p. VI. Pomiary częstotliwości optycznych

Czy i kiedy nastąpi „redefinicja sekundy”?

Praktycznie wszystkie warunki dla „redefinicji sekundy” zostały spełnione.
Czy należy zatem oczekiwać, że w niedalekiej przyszłości nowy typ wzorca
i nowa definicja sekundy zostaną wprowadzone?

Wprowadzenie nowego wzorca to złożony proces *logistyczny i prawny*.
Generator cezowy był już w 1950, a wprowadzony jako obowiązujący wzorzec w 1967.

Jest jednak rzeczą pewną, że wprowadzenie wzorca optycznego
i związana z nim redefinicja sekundy: **nastąpią**.

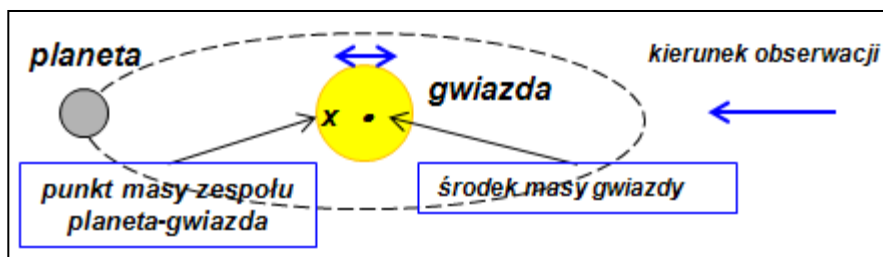
Osiągnięcie niepewności pomiaru czasu rzędu 10^{-18} jest wydarzeniem
o trudnym do oceny dzisiaj znaczeniu dla nauki.

Już dziś wyniki osiągnięte w zakresie „grzebienia częstotliwości” są wykorzystywane.

Konsekwencje „grzebienia częstotliwości”

„**Grzebień częstotliwości**” nie tylko umożliwił pomiary częstotliwości w zakresie optycznym , ale już dziś spełnia ważną rolę metrologiczną –stanowi **niezwykle użyteczne narzędzie badawcze** zjawisk zachodzących **w czasie i przestrzeni**

Jednym z nich jest wykrywanie planet ziemio podobnych odległych gwiazd.

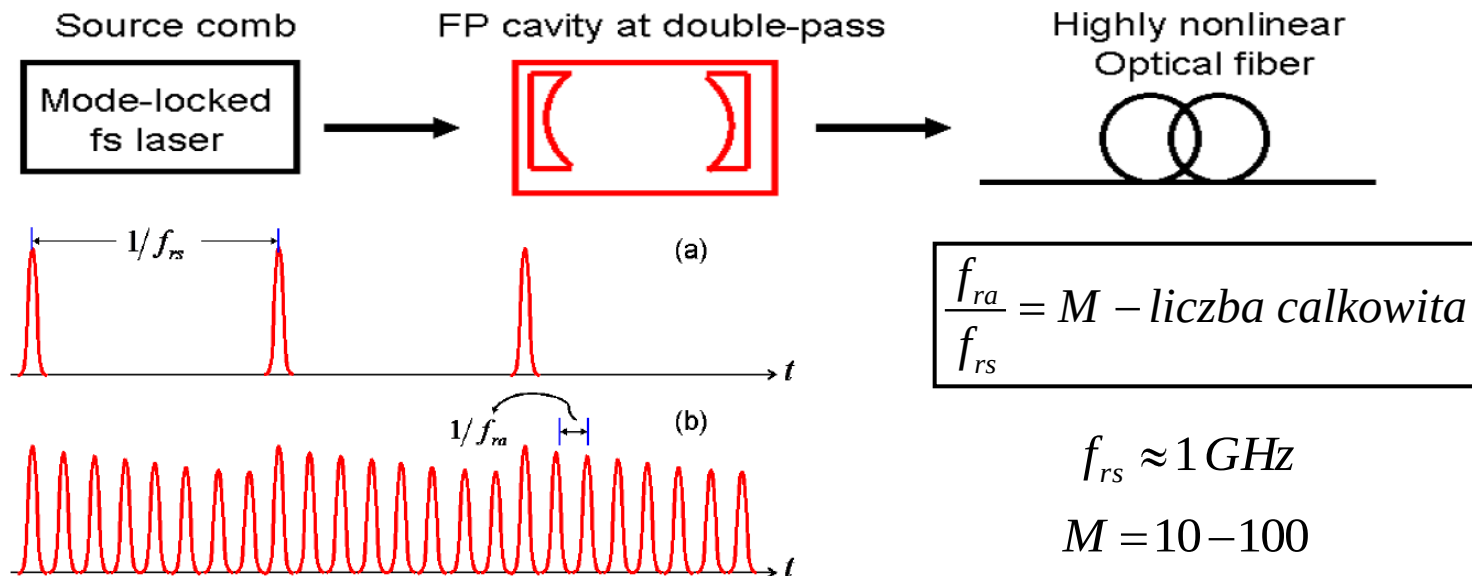


Środek masy zespołu planeta – gwiazda nie pokrywa się w trakcie obrotów planety ze środkiem masy gwiazdy i gwiazda doznaje ruchu wahadłowego w kierunku obserwacji.

Istnienie i pomiary **przesunięcia Dopplera** składowych widma promieniowania gwiazdy jest dowodem na obecność planety i jej rozmiary.
To jedna z nielicznych, a może jedyna metoda wykrywania ziemio – podobnych planet krążących wokół odległych gwiazd.

Astro comb ^[10,11]

„Astro – comb” skonstruowano do kalibracji spektroskopów astronomicznych wykrywających prędkości obrotowe z dokładnością 1cm/s wystarczającą do wykrywania planet ziemio - podobnych krążących wokół odległych gwiazd



[10] c.-H. Li et al. „A laser frequency comb that enables radial velocity measurements with a precision of 1 cm/s”, *Nature* 452 (7187), 1335 (2008)

[11] G. Chang et al. „Toward a Broadband Astro-Comb: Effects of Nonlinear spectral Broadening in optical Fibers”, *Opt. Express* vol. 18, 12736 (2010)

VIII. Potrzeba dokładnych pomiarów czasu

Już obecnie pomiary czasu należą do jednych z najdokładniejszych. Niepewność rzędu 0,1 ns/dobę („fontanna cezowa”) oznacza, że gdyby zmiany były jednokierunkowe, to na zmianę wskazań tego zegara o 1 sek. należałoby czekać ok. $27,4 \times 10^6$ lat. Wprowadzenie wzorca optycznego absurdalnie przedłuży ten czas o dalsze trzy rzędy wielkości.

Czy istnieje potrzeba tak dokładnych pomiarów czasu?

Najbardziej znanym, wymagającym dokładnych pomiarów czasu jest system GPS:

GPS-NAVSTAR - (Global Positioning System NAVigation Signal Timing And Ranging)

Opracowany na użytek armii Stanów Zjednoczonych pasywny, satelitarny system GPS umożliwia otrzymywanie dokładnego czasu i pomiar położenia (współrzędne geograficzne i wysokość) dowolnej liczbie, dowolnie rozmieszczonych na kuli ziemskiej, użytkownikom. Mimo, że system jest czasowo udostępniony do powszechnego użytku, istnieją próby jego dublowania przez pozostałe mocarstwa; Rosję, Chiny oraz także Unię Europejską. Na potrzeby GPS obecnie istniejąca niepewność pomiarów czasu jest wystarczająca.

Dla zasygnalizowania innych potrzeb oddajmy głos fizykom (T. M. Brzozowski [9]): Wielkości powszechnie uznawane za „podstawowe stałe fizyczne” są wartościami przybliżonymi i mogą doznawać zmianom w czasie. Poznanie bliższych wartości szczególnie stałej grawitacyjnej - G oraz stałej struktury subtelnej - α , oraz istnienia i wartości ich dryfu ($\delta G/G$ i $\delta \alpha/\alpha$) upatruje się w możliwości dokładnych pomiarów czasu.

Przypomnijmy postać prof. Stanisława Bellert'a



1924 - 1976

Prof. Stanisław Bellert był pracownikiem Politechniki Warszawskiej i w r. 1976 opublikował artykuł: „*Does the Speed of Light Decrease with Time*” - Astrophysics and Space Science.

Hipoteza Bellerta:

1. Fotony zwalniają bieg;
2. Czas w oddali jest inny niż u obserwatora.

Sprawdzenie hipotez o ewentualnych zmianach „uniwersalnych stałych przyrody” wymaga dokładnych pomiarów czasu. Może wystarczy niepewność $\sim 10^{-18}$

Pomiary odległości Ziemia - Księżyc

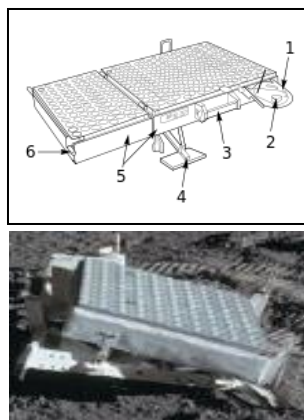
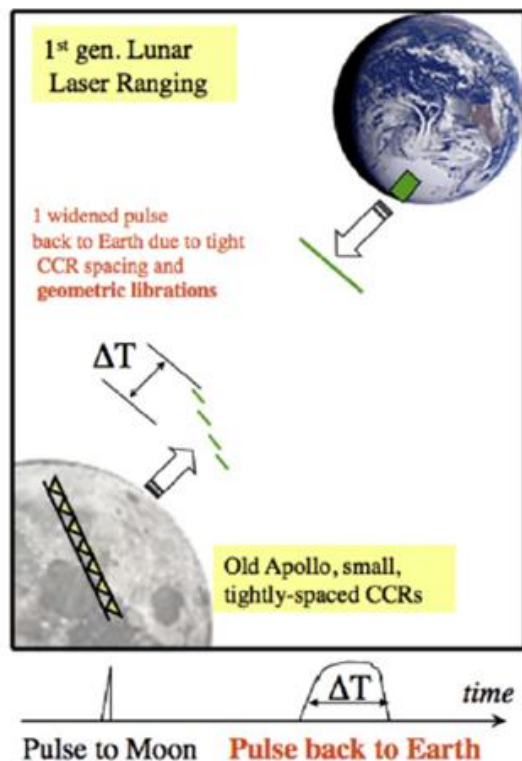
Wartości podstawowych stałych fizycznych są przedmiotem także innych pomiarów. W tabeli podano przewidywany wzrost dokładności niektórych z nich np. dryfu stałej grawitacyjnej ($\delta G/G$) przy wzroście dokładności pomiarów odległości do księżyca [12].

Science measurement / Precision test of violation of General Relativity	Apollo/Lunokhod few cm accuracy*	MoonLIGHTs	
		1 mm	0.1 mm
Parameterized Post-Newtonian (PPN) β	$ \beta - 1 < 1.1 \times 10^{-4}$	10^{-5}	10^{-6}
Weak Equivalence Principle (WEP)	$ \Delta a/a < 1.4 \times 10^{-13}$	10^{-14}	10^{-15}
Strong Equivalence Principle (SEP)	$ \eta < 4.4 \times 10^{-4}$	3×10^{-5}	3×10^{-6}
Time Variation of the Gravitational Constant	$ \dot{G}/G < 9 \times 10^{-13} \text{yr}^{-1}$	5×10^{-14}	5×10^{-15}
Inverse Square Law (ISL)	$ \alpha < 3 \times 10^{-11}$	10^{-12}	10^{-13}
Geodetic Precession	$ K_{gp} < 6.4 \times 10^{-3}$	6.4×10^{-4}	6.4×10^{-5}

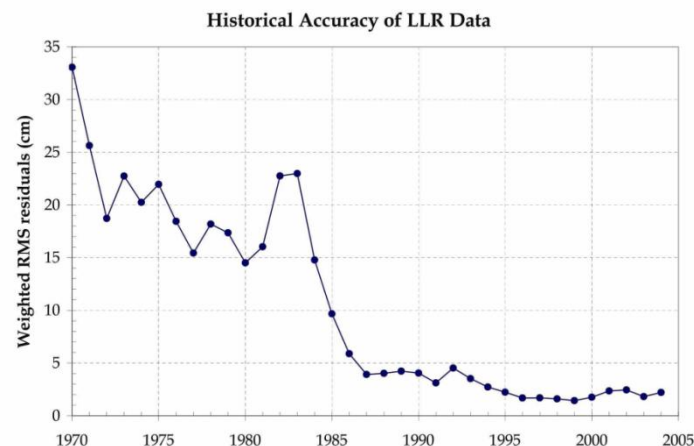
[12] James G. Williams et al. „Progress in Lunar Laser Ranging Tests of Relativistic Gravity” *Phys. Rev. Lett.* 93, 261101 – Published 29 December (2004)

Pomiary odległości do Księżyca – 1-gen.

Pomiar odległości do Księżyca to dalsze zastosowanie laserów o globalnym znaczeniu. Jego realizację i ograniczenie dokładności pomiaru wyjaśniają poniższe rysunki.



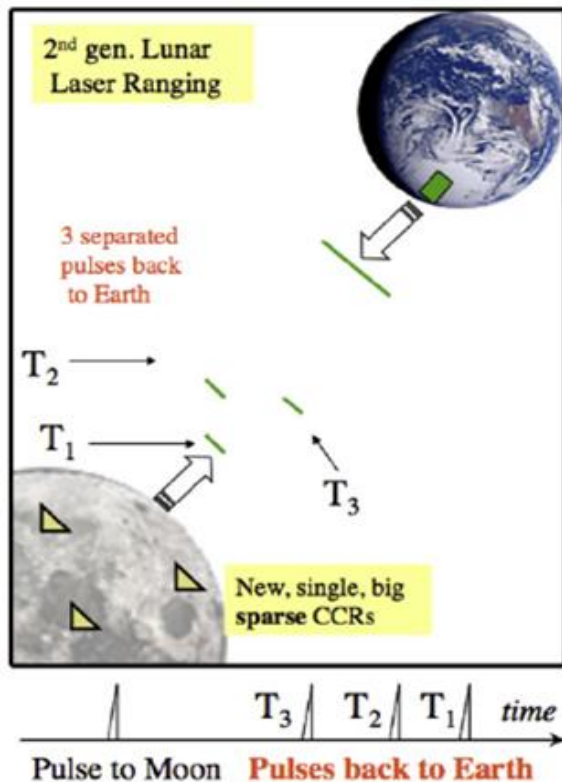
Macierz retroreflektorów



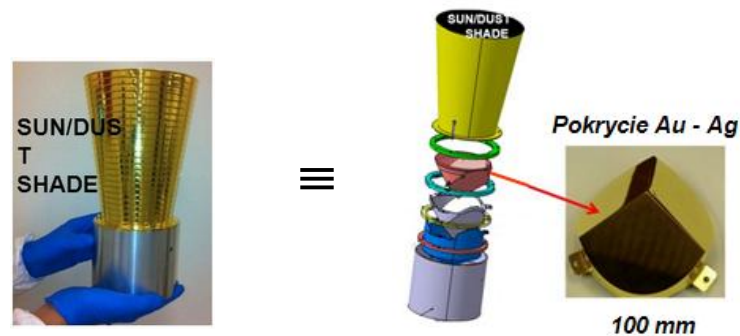
Ograniczenie dokładności pomiaru do ok. 2-3 cm wynika z poszerzenia impulsu echa (ΔT) spowodowane padaniem pod kątem wiązki sondującej na umieszczoną na Księżycu przez misję Apollo macierzy retroreflektorów o małych (3,8 cm) rozmiarach.

Pomiary odległości do Księżyca – 2-gen. [13]

Planowana w najbliższym czasie misja umożliwiająca pomiary Ziemia – Księżyc 2-gen.



Kilka retroreflektorów pojedynczych (100 mm) aktywnych – możliwość ustawiania prostopadle do wiązki sondującej.



Nowy zestaw pomiarowy ma zapewnić pomiary odległości Ziemia – Księżyc z dokładnością części milimetrów, oraz wyznaczanie i rejestrację zmian stałych fizycznych.

[13] S. Dell'Angello et al. „Satellite and Lunar Laser Ranging: Science and Technology Application”, Winter College on Optics: Light: a bridge between Earth and Space, ICTP, Trieste, Italy, February 19, (2015).

Dziękuję za przeczytanie