



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

Michio KAKU: - „Hiperprzestrzeń”

Urządzenia elektroniki kwantowej w służbie pomiarów czasu i przestrzeni

Zdzisław Jankiewicz

Wykład na Wydziale Elektroniki PWr 15.05.2019

Uzasadnienie wyboru tematu.

Moją profesją są urządzenia elektroniki kwantowej – lasery!

Pierwszy (Optyczny Maser)- **LASER**

Theodore H. Maiman



1927 - 2007

Publikacja T. H. Maiman w „Nature” 07.07.1960 [1] –
zbudowanie lasera w Hughes Research Laboratories
w Malibu (California)*¹ – **data wynalezienia LASERA.**

Ośrodek aktywny: **Rubin ($\text{Cr:Al}_2\text{O}_3$)**; Pompa : **flesz**

„Brzydkie kaczątko”
Prostota, wręcz prymityw jego budowy

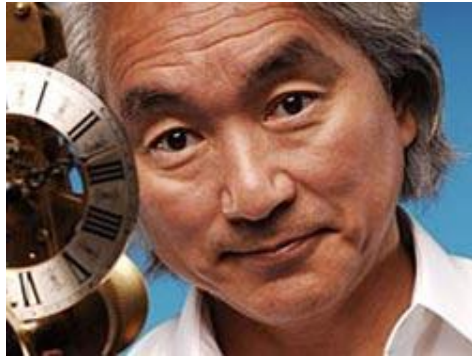
Dziś (po 59. latach): „Brzydkie kaczątko” przerodziło
się w „okazałego łabędzia”, a lasery przeniknęły do
wszystkich gałęzi nauki i gospodarki.

Była to realizacja idei wzmacniacza kwantowego, jaką
A. Einstein opublikował w 1917 [2] - w zakresie optycznym.

[1] Th. Maiman „Stimulated Optical Radiation in Ruby” *Nature*, 187, 4736, pp. 493 – 494 (1960)

[2] A. Einstein „Zur Quantentheorie der Strahlung” *Physikalische Zeitschrift* 18, pp121-128, (1917)

Michio Kaku* – fizyk, noblista (teoria strun) futurolog



Michio Kaku (1947)

(TO): Technologiczna Osobliwość -
Odkrycie o globalnej (cywilizacyjnej) randze.

- * Zastosowania (TO) są niezbędne dla dalszego rozwoju cywilizacji.
- * Zastosowania (TO) są niezastępowalne innymi technikami.

Klasycznym (TO) jest: odkrycie przez J. Thomson w 1897 elektronu

„Na tym maleństwie spoczywa cały gmach współczesnej technologii”

napisał Leon Lederman - w Boskiej Cząstce

Wiek XX – wiek Elektroniki; Wiek XXI – wiek Fotoniki

Pragnę wykazać, że zbudowanie lasera ma cechy (TO)

1. Fizyka rzeczy niemożliwych; 2. Jak nauka zmienia świat za 50 lat; 3. Hiperprzestrzeń

Przykłady zastosowań Laserów jako „TO”

Spełnione (może nie do końca):

1. **Telekomunikacja światłowodowa,**
2. **Wzorce czasu i długości,**
3. **Detekcja fal grawitacyjnych**
4. **Holografia optyczna,**
5. **Sprawne oświetlenie (LED-owe),**
6. **Zastosowania kosmiczne: pom. odl. do księżyca, łączność w kosm.**
7. **Chirurgia w jamach ciała,**
8.

Oczekiwane (czy możliwe):

1. **Synteza termojądrowa,**
2. **Przesyłanie energii w przestrzeni,**
3. **Komputery optyczne,**
4. **Walka z nowotworami (PDT),**
5. **Badania w zakresie podstaw fizyki,**
6. **Inżynieria genetyczna,**
7. **Fotonowy napęd statków kosmicznych (laser – żagiel)**
8.

Czym jest czas i przestrzeń i jakie są związki między nimi ?



„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)

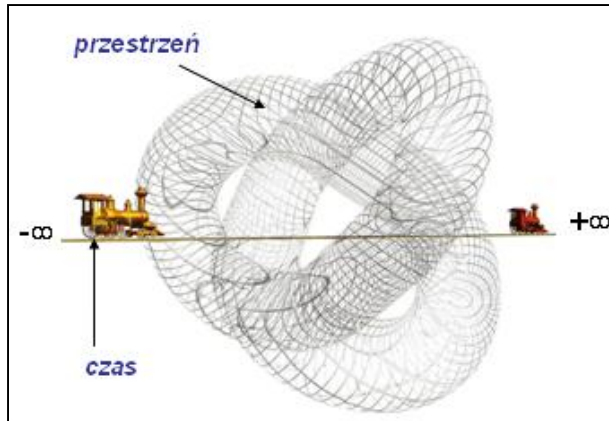


Nie można stwierdzić czym rzeczywiście jest czas i przestrzeń. Można jedynie opisać matematycznie ich modele i wyjaśnić wynikające stąd konsekwencje.

Stephen Hawking (1942 – 2018)

S. Hawking o modelach czasu i przestrzeni

Model I. Newtona



Czas i przestrzeń niezależne:
model nie wyjaśnia wielu
zagadnień – *nie do przyjęcia*

Model A. Einsteina (Teorie Względności)



Czas i przestrzeń są zależne
tworzą czaso-przestrzeń:
nowe widzenie fizyki –

- * *c* - uniwersalna stała przyrody
 $c = 299792458 \text{ m/s}$ (A. Michelson)
- * lokalność czasu i wymiaru, zależność od „*v*”
- * równoważność masy i energii $E = mc^2$,
- * ograniczenie max. prędkości $v < c$

Pomiar - metoda poznawania przyrody



Pomiar – porównanie wielkości mierzonej z wzorcem przyjętym za jednostkę

Wynik: liczba - wielokrotność wartości mierzonej do wzorcowej (jednostki).

Do dokonania pomiaru musimy mieć:

1. Jednostkę (system jednostek), 2. Wzorzec – nośnik wartości i niepewności jednostki, 3. Układ porównania (przyrządy pomiarowe)

Podstawowa definicja zegara (przyrząd do pomiaru czasu):

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

Leon Lederman: „Boska cząstka”

Wzorce naturalne - podstawowe definicje jednostek

Czasu - sekunda

1 [s] = 1/86400 część średniej doby słonecznej (1820)

1 [s] = 1/31 556 925,9747 część roku zwrotnikowego z 1900 r. (1956)

Długość - metr

1 [m] = 1/40000 część południka (Paryż) (1791)

Wzorce sztuczne

Zjawiska referencyjne zegarów wzorcowych:

Do 1929 – wahadło - zegary mechaniczne

Pomiędzy 1929 – 1967 – zjawisko piezoelektryczne – z. kwarcowe

Po 1967 – przejścia kwantowe w Cs – zegary atomowe

Od 1929 r. zegarami są
generatory elektroniczne:

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

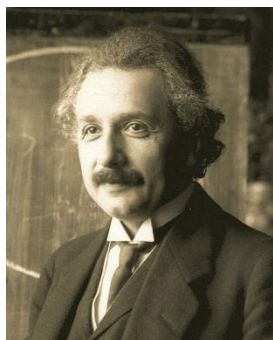
1983 – wspólny wzorzec
sekundy i metra

„W przyrodzie realizowana jest idea matematycznej prostoty”

A. Einstein

Wzorce atomowe

Albert Einstein



1879 - 1955

1917 – wzmacniacz kwantowy - teoretyczne podstawy działania maserów i laserów.

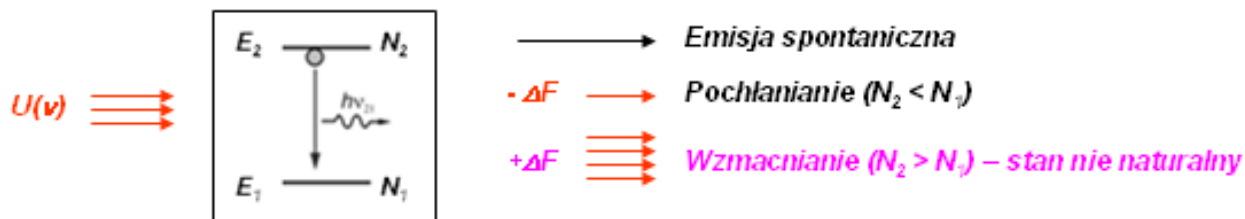
Nowa idea wzmacniania fal e-m

Wykorzystanie energii powłok elektronowych związanych z konfiguracją atomów, jonów, molekuł

A – wsp. emisji spontanicznej; **B** – wsp. emisji wymuszonej

$$Bq(\nu_L - \nu_{21})(N_2 - N_1)U(\nu_l) = \Delta F$$

- przyrost liczby fotonów



Pierwsze wzmacniacze kwantowe

Inwersja obsadzeń przez > wyodrębnienie cząstek wzbudzonych <

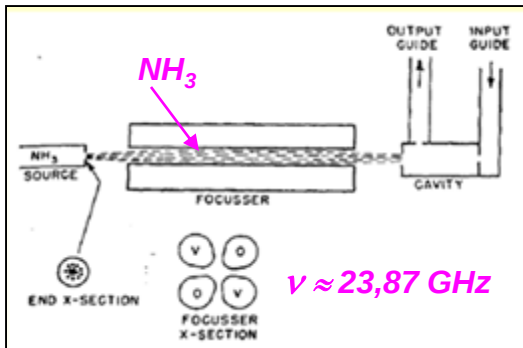
Maser amoniakalny - NH_3 (1954)



Columbia Univ.

M – Microwave
A – Amplification of
S – Stimulated
E – Emission of
R – Radiation.

Charles Townes (1915 – 2015)



[3] 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)

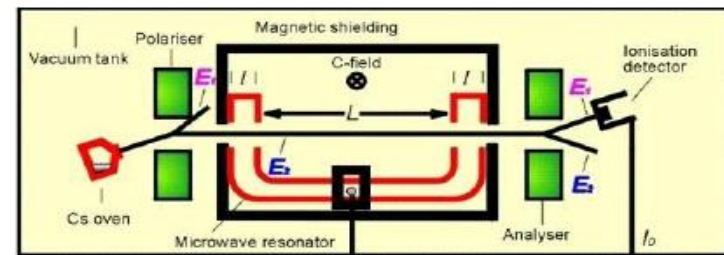
Wzorzec cezowy – ^{133}Cs (1955)



NBS

Norman F. Ramsey
(1915 – 2011)

$\nu \approx 9,1926 \text{ GHz}$



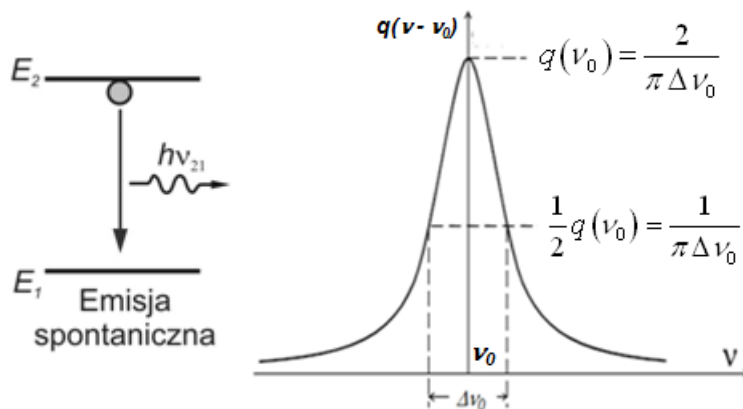
[4] N. F. Ramsey „Molecular Beam Resonance Method with Separated Oscillating Fields”. *Phys. Rev.* 78, 695 (1950).

Atomowe zjawiska referencyjne

– współczesne zegary atomowe

Kiedy przejścia pomiędzy poziomami energetycznymi wybranych elementów kwantowych mogą służyć jako **wzorcowe zjawiska referencyjne**?

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



A – współcz. emisji spontanicznej – średnia liczba aktów emisji w jednostce czasu:

$\tau_0 = A^{-1}$ – 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

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

Wariancja (odchylenie) Allana jako miara stabilności wzorca



David W. Allan

$$\sigma_{\partial\nu}(\tau) = \sqrt{\frac{1}{2(M+1)} \sum_{i=1}^{M-1} (\partial\nu_{(i+1)} - \partial\nu_i)^2}$$

dane z
pomiarów

Jakość wzorca atomowego określa [5]

Q_0 – dobroć obwodu rezonansowego
 N – liczba cząstek układu referencyjnego,
 T – czas określający szerokość linii rez.
 τ – czas uśredniania

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

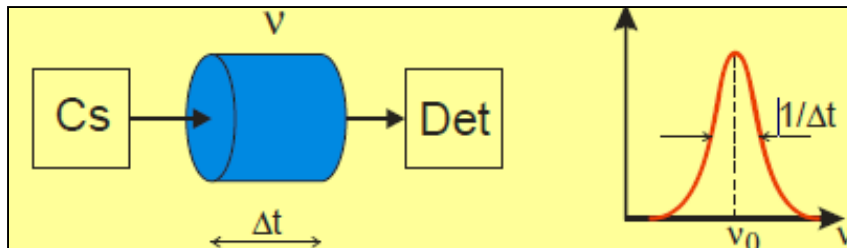
$^{133}\text{Cs} \rightarrow$ ustalona wartość: $\nu_0 \approx 9,1926 \text{ GHz}$

Wszelka poprawa $\sigma(\tau)$ przez: „ T ”, „ N ”, a głównie „ $\Delta\nu$ ”

[5] D. W. Allan „Statistics of Atomic Frequency Standards” Proc. IEEE, 54, 2, 211, 1966

Metoda rozdzielania pól Ramseya

Klasyczny układ: szerokość linii określa długość rezonatora.



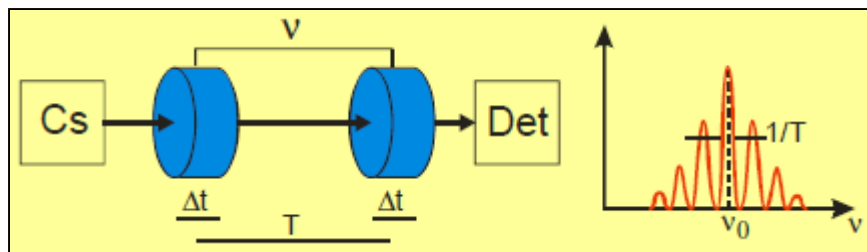
Szerokość rezonansu wyznacza:

- czas przebywania Cs we wnęce

$$\Delta t = L/v \ll \tau_0$$

Można wpływać na „ ν ” i „ L ”

Metoda **prążków** zaproponowana przez Ramseya (zwiększanie „ L ”)



Wnęki rozdzielone - sprzężone

Obwiednię linii określa - Δt ,
Szerokość listka centralnego:

$$T = L_0/v$$

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

Zmiana „ T ” przez powiększanie odstępów pomiędzy wnękami L_0

Idea laserowego chłodzenia cząstek

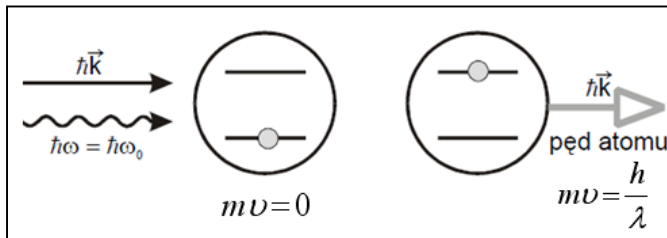
(zmniejszanie „ v ”)

Idea laserowego chłodzenia cząstek polega na ukierunkowanym przekazywaniu im pędu fotonów

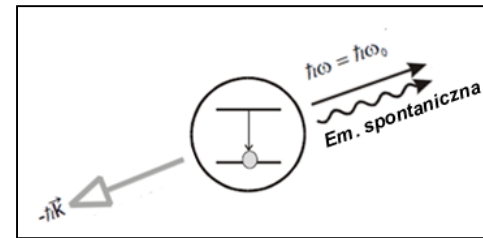
Zmniejszanie v jest równoznaczne z obniżeniem temperatury cząstek:

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

Kierunkowy przekaz pędu



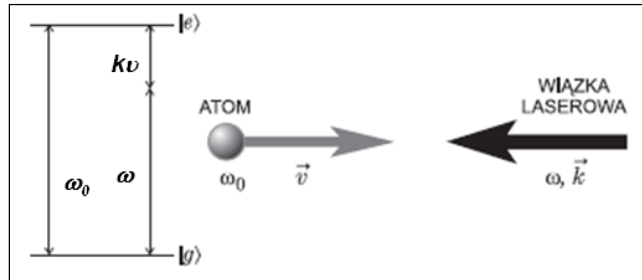
Dookolna utrata pędu



Skuteczność chłodzenia mierzy się liczbą absorpcji fotonów !!
Przejście chłodzące o krótkim czasie życia poziomu wzbudzonego

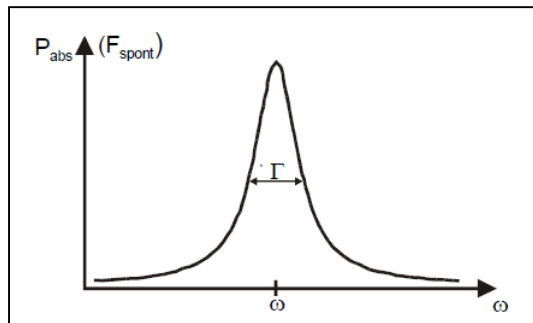
Chłodzenie cząstek w ruchu (uwzględnienie przesunięcia Dopplera)

Optyczne przejście chłodzące



Kierunki ruchu **cząstki** i **fotonu** – **przeciwne**.

Fotony działają na cząstki (zmniejszają ich prędkość) o jednej, określonej wartości v_z



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

$$F(v_z) = \frac{\Delta\omega^2}{(\omega - kv_z - \omega_0)^2 + \Delta\omega^2}$$

Aby hamować cząstki o innych prędkościach należy przestrajać laser.

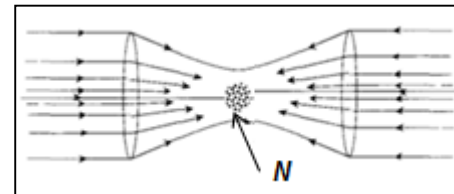
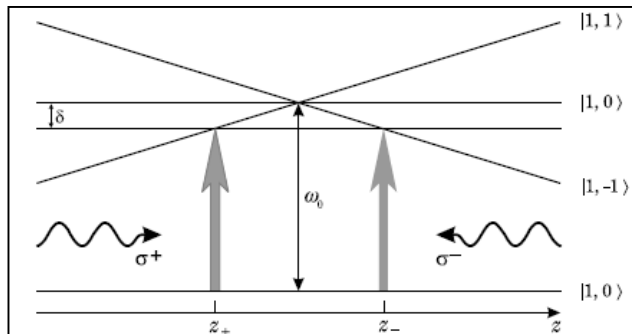
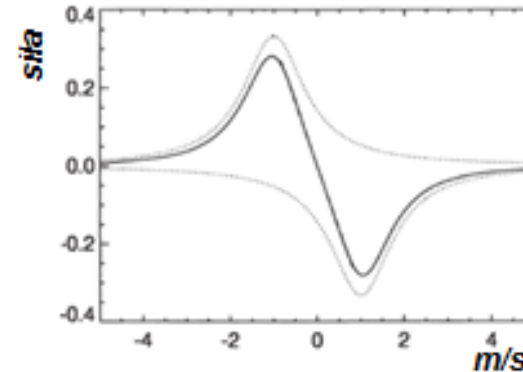
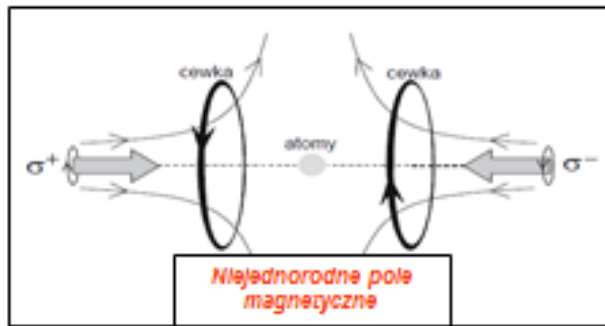
[6] A. Ashin „Trapping of atoms by resonance radiation pressure” Phys. Rev. Lett. 40, 729 (1978)

Pułapki magneto-optyczne

(MOT – Magneto Optical Trap) (zwiększanie „N”)

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

Pułapka jednokierunkowa



Trójwymiarowa pułapka magneto optyczna (MOT - Magneto - Optical Trap) - Nobel 1997



Steven Chu
(1948)



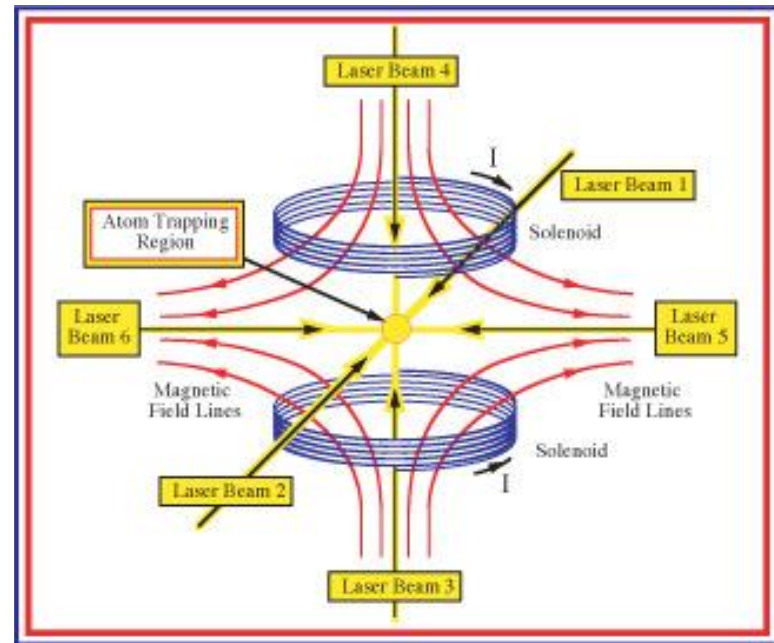
Claude Cohen-
Tannoudji (1933)



W. D. Phillips
(1948)

Nobel 1997

**Za rozwój metod chłodzenia i
pułpowania atomów laserem**



[7] S. Chu et al. „Three – dimensional visconas confinement and cooling by resonance perssure” Phys. Rev. Lett. 55, 48 (1985)

Postęp mierzony nagrodami Nobla

1964



Ch. Townes
(1915 – 2015)



N. Basow
(1922-2001)



A. Prochorow
(1916-2002)

Za fundamentalne prace w dziedzinie elektroniki kwantowej, które doprowadziły do skonstruowania oscylatorów i wzmacniaczy bazujących na zasadzie działania masera i lasera”

1989



N. F. Ramsey
(1915 – 2011)



H. G. Dehmelt
(1922 – 2017)



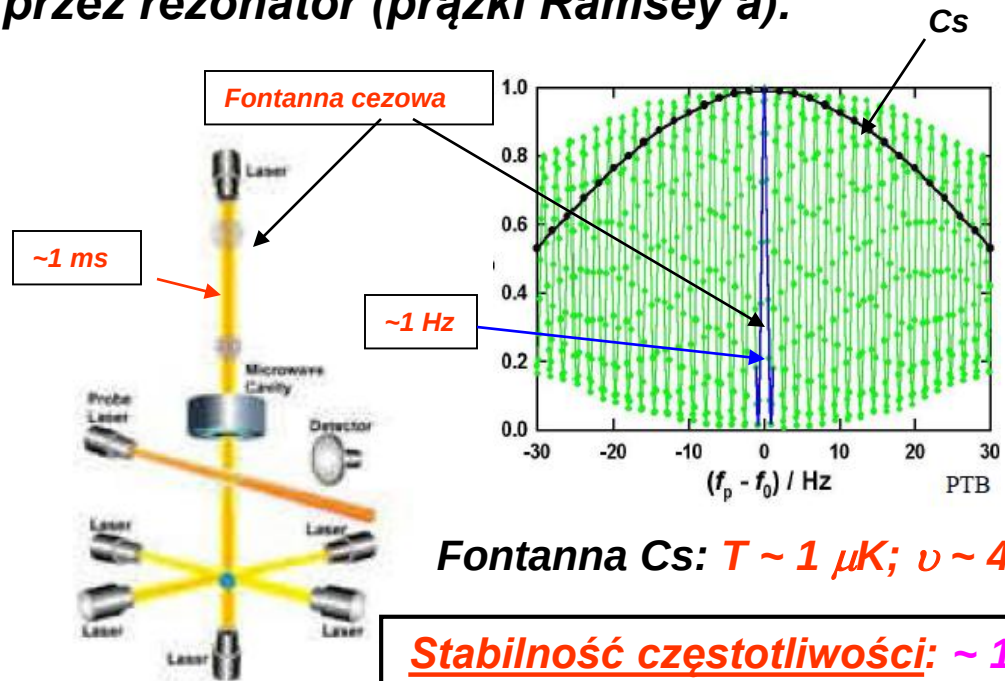
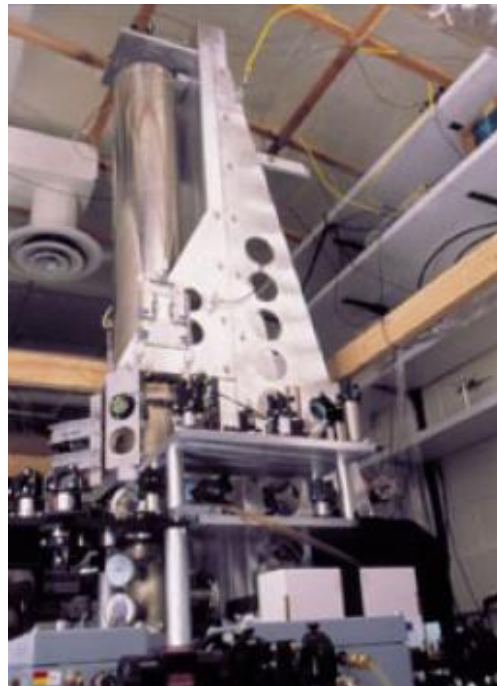
Wolfgang Paul
(1913 – 1993)

1. Za metodę oscylacyjnych pól i ich użycie w zegarach atomowych”

2. Za rozwój techniki pułapek jonowych”

„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: $\sim 10^{-15}$
kres stabilności zegara Cs

[8] M. A. Kasevich, E. Riis, S. Chu, R. G. Devoe, “Rf Spectroscopy in an Atomic Fountain,” Phys. Rev. Lett., 63, 612, (1989).

Fontanna cezowa wzorcem dla sekundy i metra

Definicje:

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
Niepewność: 10^{-15} ($\pm 0,1 \text{ ns/dobę}$)

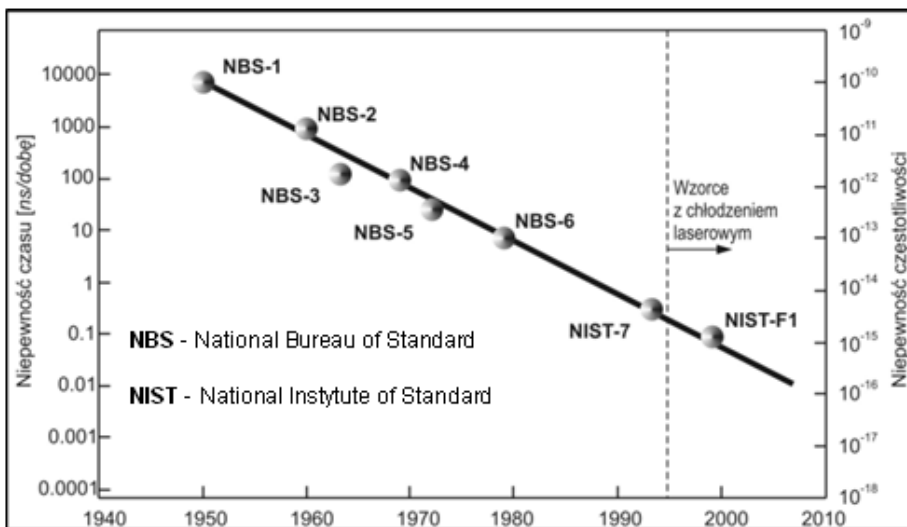
1983: - 1 metr to - odległość równa drodze przebytej przez światło w próżni w czasie równym $1/299792458 \text{ [s]}$.
Niepewność : $\pm 0,13 \text{ nm}$ wynika z przyjęcia **$c = 299792458 \text{ m/s}$** .

Inne atomowe wzorce wtórne:

Wodorowy:	$\nu = 6\,834\,682\,608 \text{ Hz}; \sim 5 \cdot 10^{-15}$	} Satelity GPS
Rubidowy:	$\nu = 1\,420\,405\,752 \text{ Hz}; \sim 5 \cdot 10^{-12}$	

Historia rozwoju mikrofalowych wzorców częstotliwości

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



Kres mikrofal – nadzieja w optyce

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

$$\sigma(\tau) = 10^{-18}$$

Rok 2006

**Początek poszukiwań
kandydatów na optyczny
wzorzec czasu (atom, jon)**

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

Warunki wprowadzenia wzorca optycznego

(redefinicja sekundy to także złożony proces prawny)

Problem1. Udostępnienie sygnału wzorca do pomiarów w całym zakresie wykorzystywanych częstotliwości i czasów
(bardzo szeroki zakres z optyką włącznie).

Problem 2. Budowa generatora optycznego opartego o wybrany ośrodek referencyjny o stabilności $\sim 10^{-18}$

Prace nad wzorcami optycznymi są intensywnie prowadzone od dawna, największe postępy w tym zakresie poczyniono w ostatniej dekadzie.

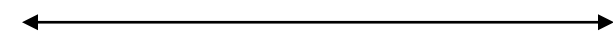
Kandydaci: Atomy: Mg; Ca; Sr; Yb. Jony: $^{191}\text{Hg}^+$; $^{171}\text{Yb}^+$; $^{88}\text{Sr}^+$; Ca^+ .

Problem 1. - stan przed „grzebieniem”

Szeroki zakres mierzonych częstotliwości

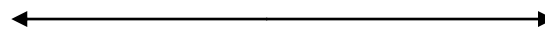
Konsekwencje pojawienia się laserów

I. Do mikrofal (włącznie) $\sim 10^{11}$ Hz



(licznik + heterodynowanie)

II. Zakres optyczny $\sim 10^{15}$ Hz



(pomiar długości fali)

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

$$\nu_{\text{opt}} / \nu_m \approx 10^4$$

Klasyczna procedura: zliczanie okresów i powielanie częstotliwości:
możliwa, ale trudna i pracochłonna. Są przykłady.

Pomiary w pełnym zakresie są trudne – niezależnie od położenia wzorce.
Wprowadzenie wzorca optycznego wykluczone!

Rozwiązanie problemu 1.

Rozwiązanie problemu 1. 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
szczegółności za technikę
optycznego grzebienia
częstotliwości”

Optyczny grzebień częstotliwości oferuje:

1. **Utworzenie skali (znaczników o znanych wartościach) częstotliwości w zakresie optycznym;**
2. **Możliwość wyznaczenia każdego znacznika optycznego przez dwie znane wartości częstotliwości leżące w paśmie mikrofal (możliwy ich pomiar)**

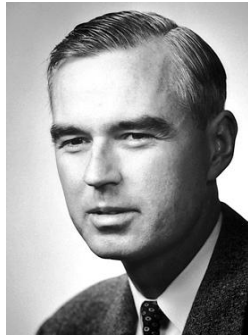
[4] Diddams et al. „Direct Link between Microwave and Optical Frequencies with a 300 THz Femtosecond Laser Comb” PRL84 5102 29 May 2000

[5] John L. Hall „Defining and Measuring Optical Frequencies: the Optical Clock Oportunity 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.)

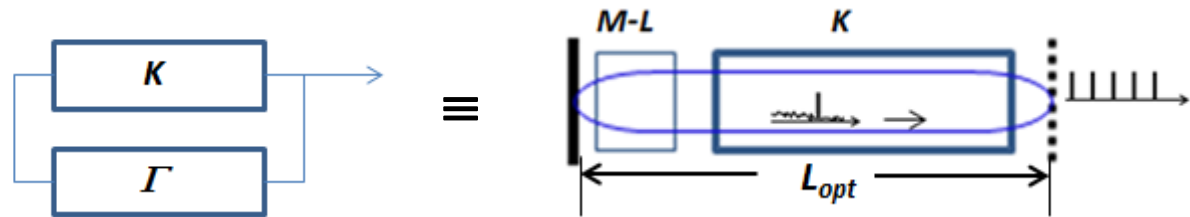


Willys E. Lamb
1913-2008

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.

Przebiegi czasowe w laserze M-L

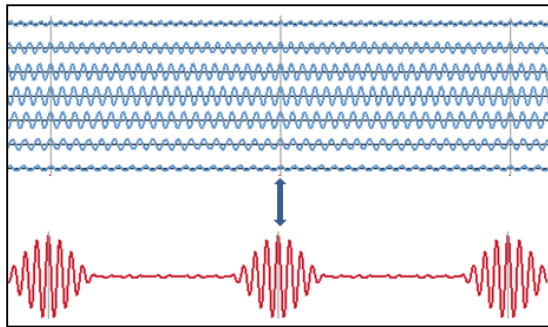
(graniczne czasy trwania impulsu - $\tau_{\min}$)

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

$$\tau_{\min} \cong (\Delta f_{lum})^{-1} \approx (10 \div 100) T_{sr}$$

Najkrótsze – kilka okresów fali o średniej częstotliwości

Powstanie impulsów wymaga uzgodnienia faz (synchronizacji) poszczególnych modów



$$\tau_{\min}^{Gs} \cong \frac{0,441}{N \cdot \Delta f_r} \quad \tau_{Ti:S} \approx 3,4 T_{sr}$$

Brak synchronizacji modów

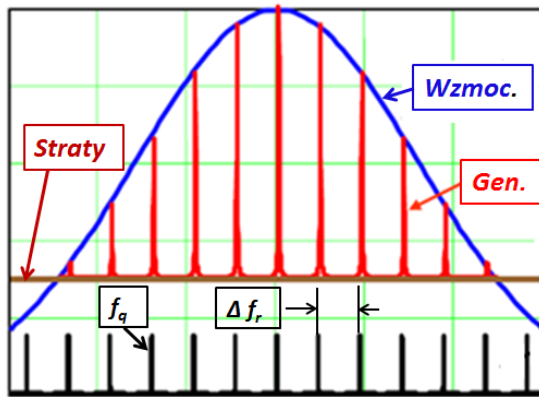


Synchronizacja modów



Liczba wzbudzonych modów rezonatora

Aktywny materiał w laserze wzmacnia promieniowanie w określonym paśmie:



Liczba modów:

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

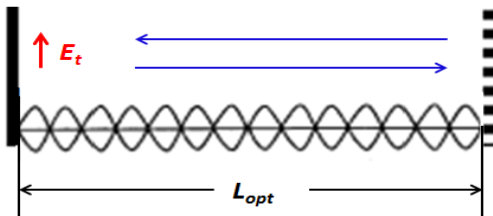
W zależności od ośrodka czynnego
dla $\Delta f_r = 1\text{GHz}$

$$N_m \approx 1 \div 10^6$$

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

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

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

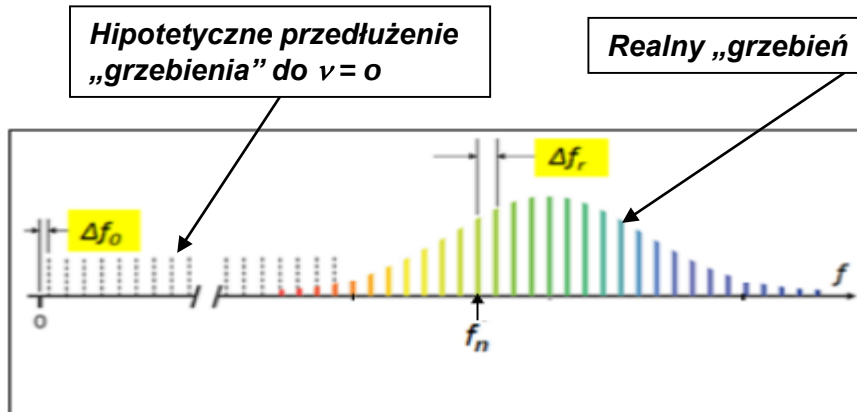
Nagrodzeni w 2005 Nagrodą Nobla badacze wykazali, że:

1. **Odstęp częstotliwości** pomiędzy poszczególnymi „zębami grzebienia” **jest stały** w całym jego zakresie (taki sam na końcu grzebienia jak na początku),
2. Dowolną częstotliwość **składową grzebienia** można **wyrazić przez dwie częstotliwości** leżące w pasmie mikrofalowym: „ Δf_0 ” i „ Δf_r ”,
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.**

Jak wyznaczyć składowe: „ Δf_r ” i „ Δf_0 ” (?)

Składowych „grzebienia częstotliwości” *)



$$f_n = n\Delta f_r + \Delta f_0$$

n – liczba przedziałów licząc od początku skali (od zera)

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

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

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

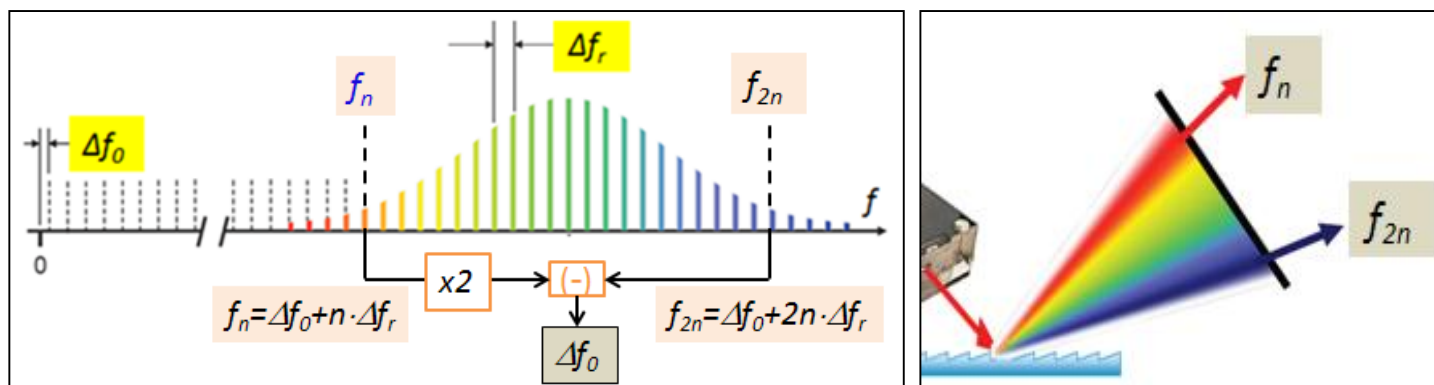
Jak już pokazano dla typowych rozmiarów rezonatora odstęp częstotliwości poszczególnych „zębów” leży zakresie mikrofali

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]

Jak znaleźć wartość „ Δf_0 ”?

Metodyka wyznaczanie częstotliwości początkowej grzebienia – „ Δf_0 ”



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

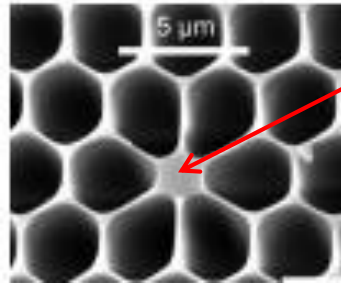
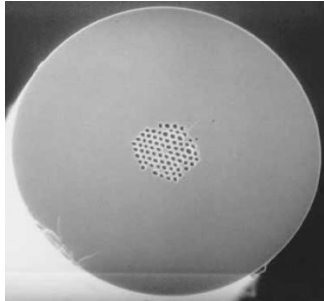
Częstotliwość początkowa Δf_0 jest różnicą pomiędzy drugą harmoniczną pewnej składowej a składową dwukrotnie od niej wyższą.

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

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

Rozwiązanie - Generacja „Supercontinuum”

Światłowód fotoniczny:



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

$$P = P_L + P_{NL} = \epsilon_0 \left(\chi^{(1)} E + \chi^{(3)} E^3 \right)$$

$$n = n_0 + n_2 I \quad n_2 \ll n_0 \quad \left(\chi^{(3)} \ll \chi^{(1)} \right)$$

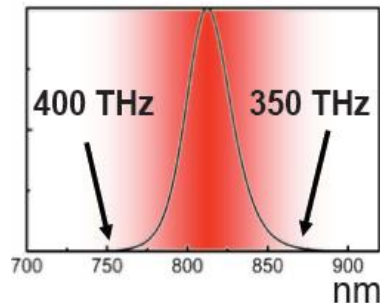
- dla dużych gęstości mocy występują zjawiska nieliniowe – poszerzenie pasma częstotliwości.

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

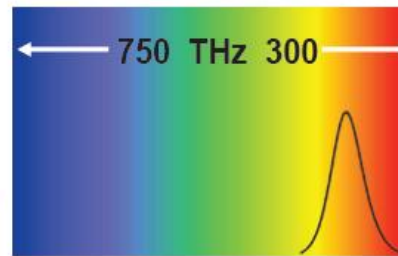
1. **Samo-modulacja fazy (SPM- Self- Phase Modulation);**
2. **Skrośna modulacja fazy (XPM – Cross- Phase Modulation);**
3. **Oddziaływania (mieszanie) cztero-falowe (FWM – Four Wave-Mixing);**
4. **Wymuszone rozproszenie Ramana (SRS – Stimulated Raman Scattering);**
5. **Generacja solitonowa i jej niestabilności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

„Supercontinuum” zachowuje cechy widma M-L

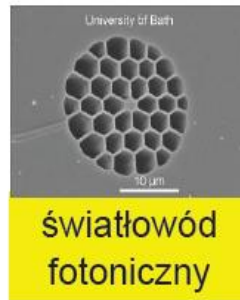
Widmo wejściowe



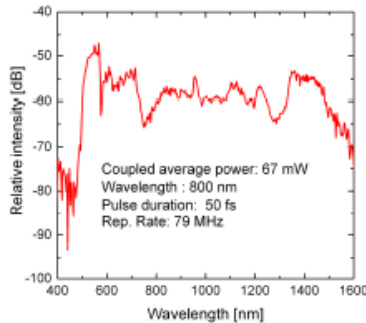
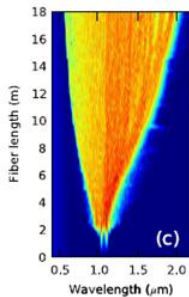
Widmo poszerzone



**Światłowod fotoniczny
znacznie poszerza widmo
sygnału wzbudzającego**



światłowod
fotoniczny



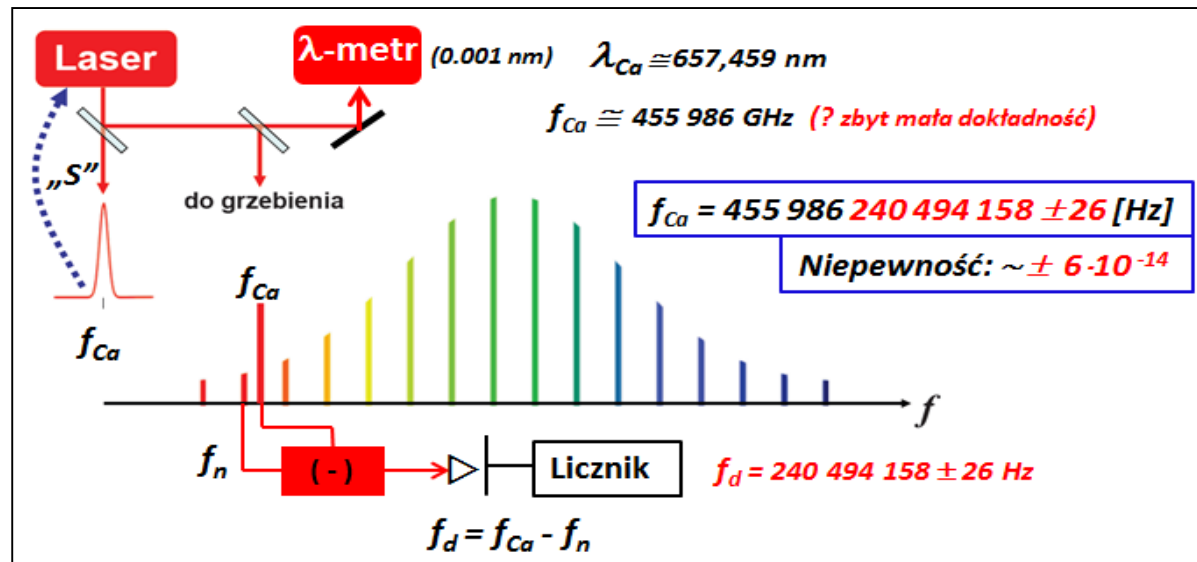
**Widmo częstotliwości (grzebień) uformowany w
trakcie generacji M-L zachowuje wszystkie swoje
cechy po poszerzeniu w światłowodzie fotonicznym**

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

Korzyści z istnienia „grzebienia częstotliwości”

1. Pomiar częstotliwości optycznych [9]

(przykład: pomiar częst. linii wapnia Ca – 657,459 nm)



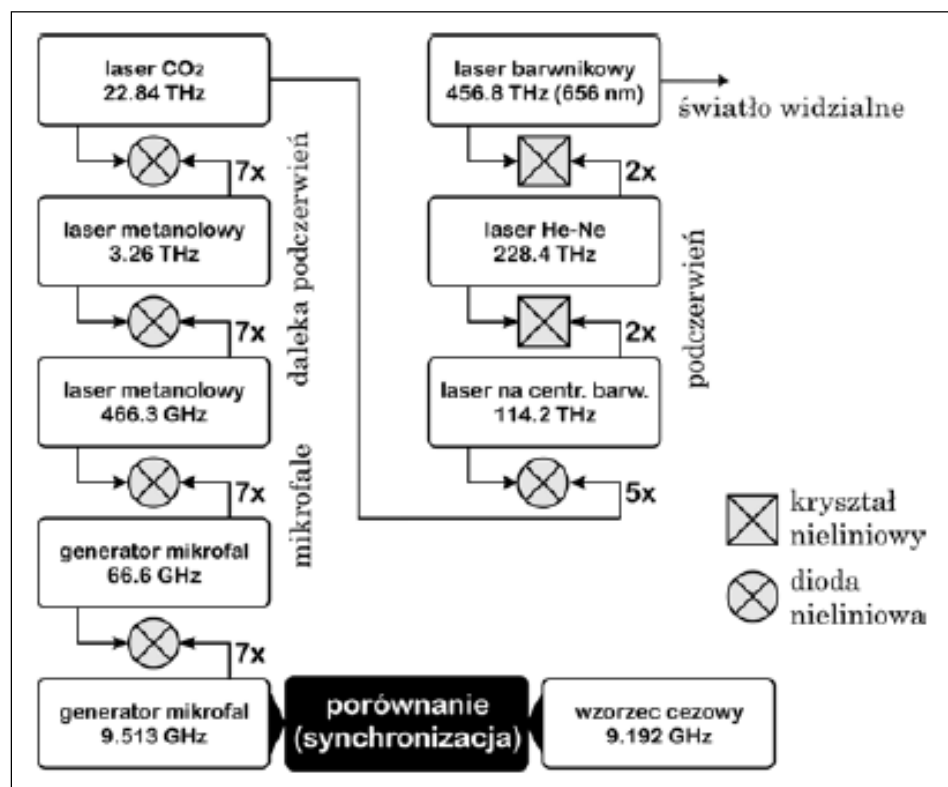
„Grzebień częstotliwości” stanowi **uniwersalną metodę** pomiaru optycznych częstotliwości przy wykorzystywaniu obecnie obowiązujących wzorców

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

Komplikacje pomiaru częstotliwości optycznych:

Klasyczna metoda powielania częstotliwości

(przykład: Pomiar częstotliwości przejście **Ca 656 nm** $\nu_x/\nu_w \sim 49695$)



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

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

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

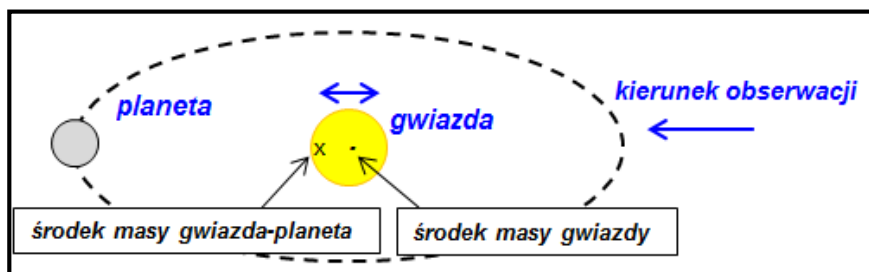
Pomiar skomplikowany:
wymaga: **5** nieliniowych diod, **2** nieliniowych kryształów, **2** generatorów mikrofalowych i **6** laserów.

Rozwiązanie nie jest uniwersalne, każdy pomiar wymaga budowy swego łańcucha

2. „Astro – comb”

„**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.



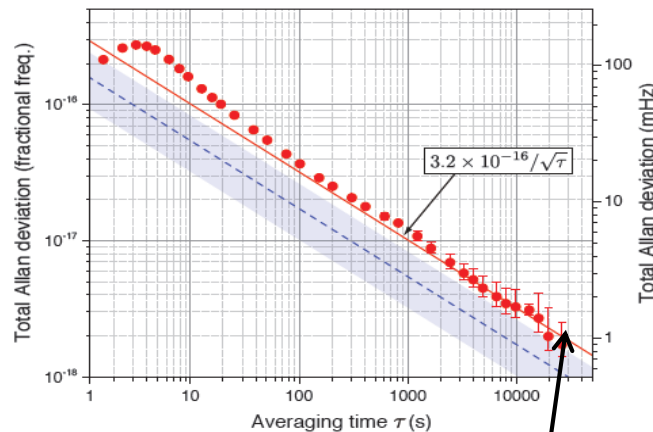
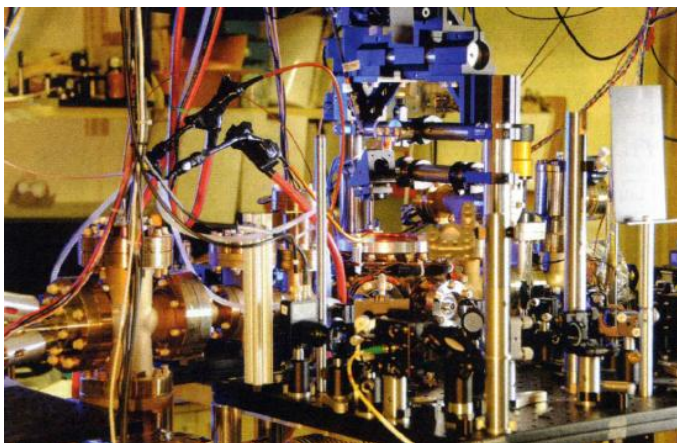
Środek masy zespołu planeta – gwiazda nie pokrywa się w trakcie obrotów planety ze środkiem masy gwiazdy i gwiazda doznaje ruchu wahadłowego w kierunku obserwacji.

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.

Problem 2. - w trakcie badań

Pierwszy „optyczny zegar atomowy” na 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 on 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 badane
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

Gdzie istnieje potrzeba tak dokładnych pomiarów czasu?

Najbardziej znanym, wymagającym dokładnych pomiarów czasu jest system GPS:

1. GPS-NAVSTAR - (Global Positionig 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.

2. „Astro – Comb” - Kierunek zastosowań w astronomii – bardzo ważny i potrzebny.

3. 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. Bliższe poznanie ich 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.

Dziękuję za uwagę