



Nobel 2005: precyzyjna spektroskopia laserowa i optyczne grzebienie częstotliwości

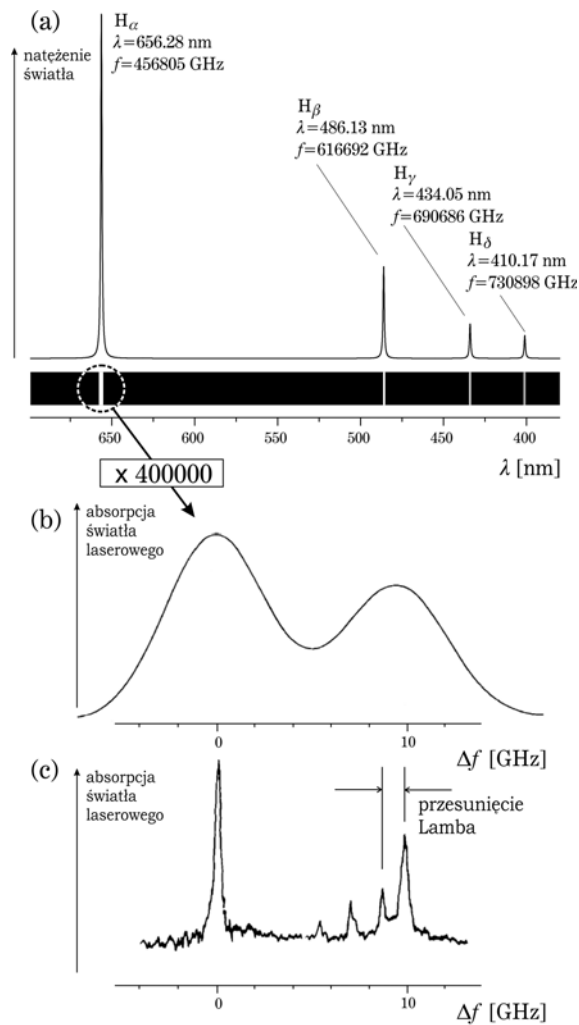
Tomasz M. Brzozowski

Instytut Fizyki UJ

Połowę tegorocznej Nagrody Nobla z fizyki otrzymali John L. Hall i Theodor W. Hänsch za „wkład w rozwój precyzyjnej spektroskopii laserowej, włączając w to technikę optycznego grzebienia częstotliwości”. To już drugi Nobel przyznany za spektroskopię laserową – w 1982 roku za rozwój tej dziedziny otrzymali go N. Bloembergen i A.L. Schawlow. Czym zajmuje się precyzyjna spektroskopia laserowa? Z czego wynika jej doniosłość dla nauki, aż dwukrotnie wyróżniona Nagrodą Nobla? Czym wreszcie jest ów tajemniczo brzmiący „optyczny grzebień częstotliwości”, wymieniony w komunikacie Komitetu Noblowskiego Szwedzkiej Akademii Nauk?

Ogólnie rzecz ujmując, spektroskopia jest nauką zajmująca się wszelkiego rodzaju promieniowaniem. Badania spektroskopowe dotyczą analizy i interpretacji widm promieniowania wysyłanego i absorbowanego przez materię tworzącą obiekty rozmaitego typu: od odległych galaktyk i gwiazd, aż do pojedynczych atomów, jonów i cząstek elementarnych. Wspomniana wyżej „interpretacja widm” oznacza dokładne poznanie mechanizmów odpowiedzialnych za powstawanie i pochłanianie promieniowania. Nietrudno się więc domyślić, że spektroskopia jest znakomitym narzędziem fizycznym umożliwiającym wgląd w procesy zachodzące w mikro- i w makroświecie, pozwalającym na formułowanie praw rządzących oddziaływaniem promieniowania z materią. To właśnie dzięki badaniom spektroskopowym dowiedzieliśmy się, jak zbudowany jest atom, to spektroskopia doprowadziła do powstania i rozwoju mechaniki kwantowej. Spektroskopii zawdzięczamy laser, ona też pozwoliła stwierdzić, że Wszechświat się rozszerza. Te przykłady to jedynie niewielka część niezwykle bogatej listy zasług badań spektroskopowych.

Każdy z nas zajmuje się spektroskopią na co dzień, i to bardzo intensywnie. Blisko 80% wrażeń docierających do nas to bodźce wzrokowe. Światło, a więc widzialna część promieniowania elektromagnetycznego, trafia do naszych oczu bezpośrednio ze źródeł lub po odbiciu od przedmiotów. Stwierdzając, że coś jest żółte albo czerwone, określamy w przybliżeniu długość fali światła, a więc dokonujemy tzw. analizy spektralnej docierającego do nas promieniowania. „Kolor” nie stanowi oczywiście wystarczająco precyzyjnej i jednoznacznej informacji spektroskopowej. Dokładna charakterystyka spektralna światła musi podawać jego długość fali λ lub częstotliwość f ($\lambda = c/f$, gdzie c – prędkość światła w próżni).



Rys. 1. (a) Widmo atomu wodoru w zakresie fal widzialnych. Widoczne są cztery linie widmowe. Podana jest ich długości fali λ w nanometrach i częstotliwość f w GHz (10^9 Hz). (b) Standardowa spektroskopia laserowa linii H_α – widać, że pojedyncza linia z rysunku (a) składa się z dwóch linii oddalonych od siebie o ok. 10 GHz (0,014 nm). (c) Spektroskopia laserowa w układzie przeciwbieżnych wiązek laserowych odkrywa bogatą strukturę linii H_α i pozwala na znalezienie tzw. przesunięcia Lamba – efektu związanego z kwantowym charakterem pola elektromagnetycznego. Widma (b) i (c) pochodzą z pracy *Hänsch et al. Nature (London) Phys. Sci.* **235** 61 (1979)

Komunikat Komitetu Noblowskiego wspomina o „precyzyjnej spektroskopii laserowej”. Laserowej, czyli wykorzystującej światło generowane przez najdokładniejsze i najbardziej precyzyjne źródła promieniowania, jakimi dysponuje współczesna nauka. Czy zastosowanie laserów do badań spektroskopowych automatycznie gwarantuje precyzję? Czy sformułowanie „spektroskopia laserowa” nie oznacza w domyśle „precyzyjna”? Wreszcie, do czego tak naprawdę potrzebujemy tej wielkiej precyzji w spektroskopii?

Niech odpowiedzią na to pytanie będzie przykład. Wzbudzony do świecenia gaz atomów wodoru emituje światło. Chcemy sprawdzić, jakie długości fali w nim występują. Korzystamy zatem ze spektrometru – przyrządu do analizy spektralnej – i otrzymujemy widmo promieniowania przedstawione na rys. 1(a), składające się z serii dyskretnej linii. Spektrometr ma skalę, na której możemy odczytać długość fali odpowiadającej każdej z linii (oczywiście, skala ta musi zostać uprzednio dokładnie wycechowana, co, jak się za chwilę okaże, jest osobnym problemem). Analizując zmierzone długości fal, możemy wyciągnąć wiele ciekawych wniosków dotyczących budowy wewnętrznej emitującego światło atomu i jego struktury energetycznej. Takie badania prowadzono już w XIX wieku i właśnie na ich podstawie Bohr w 1913 roku zaproponował model atomu wodoru. Można oczywiście próbować zwiększać dokładność naszych pomiarów i coraz precyzyjniej określać długość emitowanych przez wodór fal. Okazuje się jednak, że nasza metoda badawcza – pobudzenie do świecenia gazu atomowego i obserwacja emitowanego światła – ma ograniczenia, które nie pozwalają przekroczyć pewnego progu dokładności. Skorzystajmy w takim razie z dobrodziejstw laserów i wykorzystajmy je do badań spektroskopowych wodoru. Doprowadźmy do oddziaływania atomów wodoru z wiązką przestrajalnego lasera. Zmieniając długość fali tego lasera, obserwujemy, w jakim stopniu jego wiązka jest przez gaz atomów wodoru pochłaniana. Skoncentrujmy się na pierwszej linii o długości fali $\lambda = 656,28$ nm, nazywanej linią H_α . Jeśli sporządzimy wykres pochłaniania wiązki w zależności od jej częstotliwości, to okaże się, że linia ta, obserwowana dotąd jako pojedyncza, składa się w rzeczywistości z dwóch leżących blisko siebie linii (rys. 1(b)). Poprawmy jeszcze bardziej precyzję naszego pomiaru. Zamiast jednej, zastosujmy układ dwóch przeciwbieżnych wiązek laserowych. Zniknie wtedy niepożądane zjawisko rozmywania linii widmowych przez termiczny ruch atomów – tzw. poszerzenie dopplerowskie. Wynik jest niezwykle interesujący (rys. 1(c)) – widzimy, że zaobserwowana uprzednio podwójna struktura linii H_α składa się z większej liczby wąskich linii, rozmieszczonych w odstępach, które z bardzo dużą precyzją można zmierzyć. Na podstawie takich pomiarów można wysnuć ilościowe wnioski dotyczące bardzo subtelnych oddziaływań elektronów i jądra atomu wodoru. Co więcej, pomiar odległości dwóch ostatnich linii widocznych na rys. 1(c) daje nam wartość tzw. przesunięcia Lamba, wynikającego z kwantowej natury pola elektromagnetycznego. Wynik pomiaru tego przesunięcia idealnie zgadza się

z wartością liczbową otrzymaną po bardzo złożonych obliczeniach kwantowo-mechanicznych!

Powyższy przykład uświadamia nam co najmniej dwie rzeczy. Po pierwsze, zwiększanie precyzji w spektroskopii odsłania nowe, niezwykle ciekawe i frapujące aspekty badanego obiektu i jego oddziaływania z otoczeniem. Po drugie, aby zwiększyć dokładność pomiaru spektroskopowego, nie wystarczy użyć do niego lasera. Trzeba to jeszcze zrobić w odpowiedni, czasami nieoczywisty sposób – w omawianym przykładzie atomy wodoru zostały doprowadzone do oddziaływania nie z jedną, lecz z dwiema przeciwbieżnymi wiązkami laserowymi. Jest jeszcze jeden zasługujący na wzmiankę fakt: omawiany wyżej pomiar struktury linii H_α wodoru jest autorstwa dwóch noblistów: Schawlowa (Nobel 1983) i Hänscha (Nobel 2005).

Tak jak wspomniałem, aby móc dokładnie zmierzyć długość fali i jej częstotliwość, musimy z dużą precyzją wyskalować nasze przyrządy pomiarowe. Długość fali λ mierzymy w metrach, a częstotliwość f , podawana w hercach ($1 \text{ Hz} = 1/\text{s}$), to liczba drgań fali w czasie 1 sekundy. Należy więc najpierw z wielką starannością zdefiniować, jaką długość będziemy uważali za wzorzec metra i jak długo będzie trwała 1 sekunda. Dokładna definicja tych jednostek jest dla pomiarów spektroskopowych szczególnie istotna: długość fali światła to ułamki mikrometra (10^{-6} m), a pojedyncze drganie fali świetlnej zachodzi w czasie rzędu femtosekundy (10^{-15} s)! Historia definiowania tych dwóch jednostek układu SI jest niezwykle ciekawa. Obecne wzorce metra i sekundy zawdzięczają swoją dokładność i jednoznaczność właśnie badaniom spektroskopowym. Swój udział w ich ustalaniu miał tegoroczny noblista, J. L. Hall. W 1978 roku Hall ze współpracownikami wyznaczył metodami spektroskopii laserowej prędkość światła c . Wynik pomiarów był obarczony tak małym błędem, że w 1983 roku przyjęto go jako dokładną wartość stałej fizycznej $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$. Na podstawie stałej c określono długość jednego metra jako odcinek przebywany w próżni przez światło w czasie $1/299\,792\,458 \text{ s}$. W praktyce oznacza to, że metr jest wyznaczany przez sekundę. Innymi słowy, im dokładniej zmierzymy czas, tym dokładniej będziemy znali odległość! Dlaczego wzorzec metra oparto na sekundzie, a nie odwrotnie? Okazuje się, że o wiele dokładniej i w sposób daleko bardziej jednoznaczny potrafimy zmierzyć czas niż odległość.

Jak długo trwa jedna sekunda? W 1967 roku przyjęto, że sekunda to czas równoważny trwaniu $9\,192\,631\,770$ drgań promieniowania związanego z przejściem pomiędzy poziomami energetycznymi struktury nadsubtelnej atomu cezu ^{133}Cs . Wystarczy w takim razie obserwować widmo cezu i na zadanym przez definicję sekundy przejściu atomowym zliczać drgania fali w czasie. Każde zliczenie $9\,192\,631\,770$ drgań oznacza upływ jednej sekundy. Można powiedzieć, że wzorzec sekundy wyznaczany jest przez częstotliwość wzorcową, równą $9\,192\,631\,770 \text{ Hz}$. Jeśli chcemy zmierzyć naprawdę dokładnie częstotliwość ja-

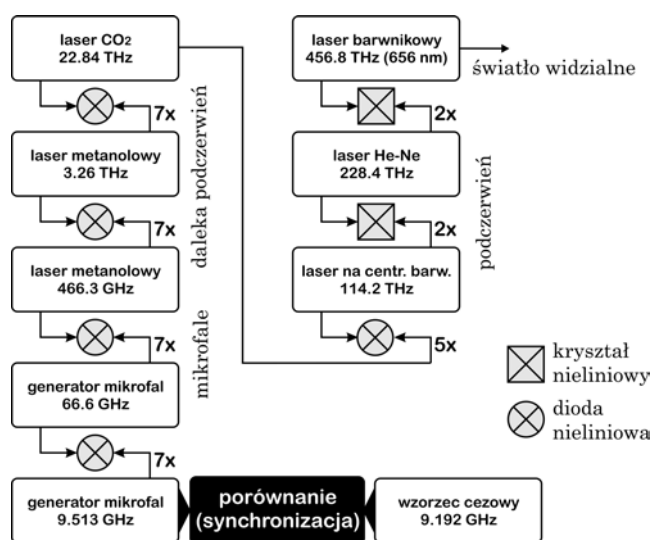
kiegokolwiek promieniowania, jesteśmy zobowiązani do porównania jej z częstotliwością odpowiedniego przejścia w atomie cezu.

Porównanie takie nie nastrecza trudności, gdy mierzona przez nas częstotliwość jest zbliżona do wzorcowej (9,192 GHz). Dotyczy to na przykład odległości pomiędzy liniami w widmie H_α wodoru: na przedstawionym na rys. 1(c) wykresie dwie skrajne linie atomowe są od siebie odległe o około 10 GHz. Tę względną odległość linii atomowych na skali częstości możemy bardzo dokładnie wyznaczyć. Problemy zaczynają się wtedy, gdy oprócz takiego wzajemnego położenia linii chcemy podać ich dokładne, bezwzględne częstotliwości.

Skąd biorą się te problemy? Częstotliwości światła widzialnego zawierają się w przedziale od 400 000 GHz do 750 000 GHz. Są więc około 40 000–80 000 razy większe od częstotliwości wzorcowej. Bezpośrednie porównanie nie jest zatem możliwe. A może dałoby się zliczać drgania fal świetlnych tak, jak zliczamy wzorcowe drgania cezu? Odpowiedź na to pytanie brzmi: niestety, nie. Najszybsze detektory i liczniki, jakie jest nam w stanie zaoferować współczesna elektronika, mogą pracować przy maksymalnych częstotliwościach rzędu 100 GHz. Jest to aż 400 razy mniej, niż potrzebujemy do pomiaru pojedynczych drgań fali świetlnej.

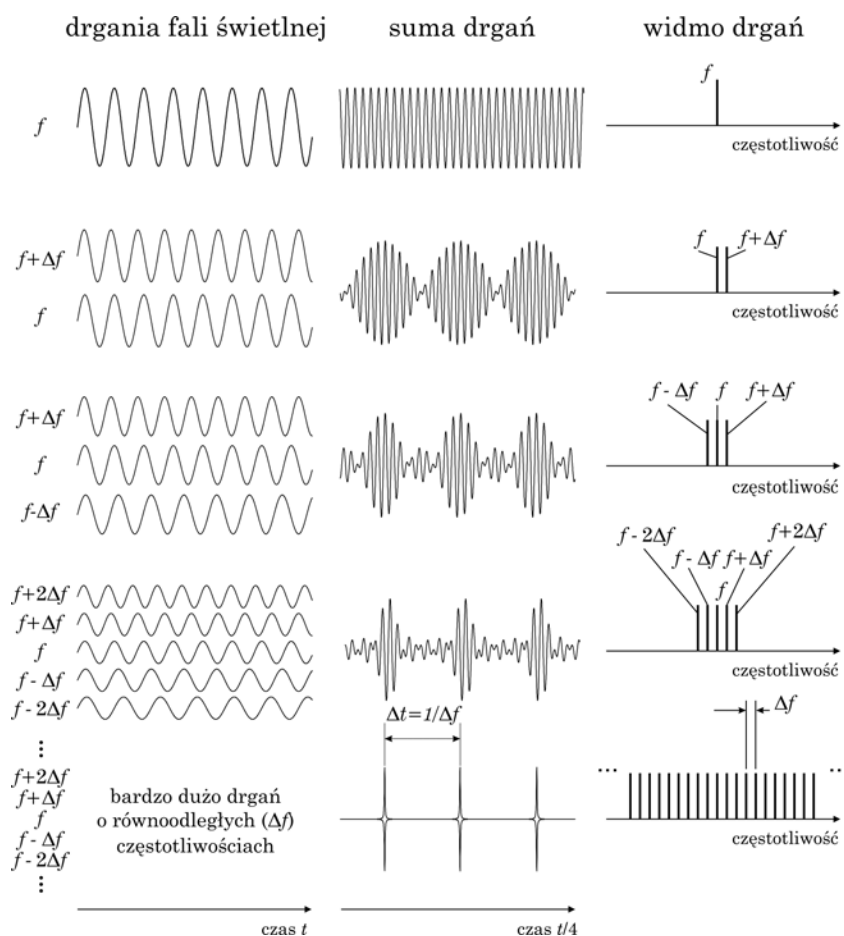
Skoro odpada możliwość bezpośredniego zliczania drgań świetlnych, nie pozostaje nam nic innego jak w jakiś sposób pomnożyć częstotliwość wzorcową tak, aby wynik tego mnożenia znalazł się blisko częstotliwości mierzonej linii atomowej. Pamiętajmy, że chodzi tu o mnożnik nie 2 lub 3, ale rzędu dziesiątek tysięcy! Jak się to robi w praktyce, wyjaśni przykład. Załóżmy, że stoi przed nami ambitne zadanie: chcemy wyznaczyć dokładną częstotliwość jednej z linii w widmie H_α z rys. 1(c), którą na podstawie pomiarów długości fali światła oszacowaliśmy na 456 805 GHz (456 805 ??? ??? Hz – znaki zapytania oznaczają cyfry, których nasze mało precyzyjne pomiary nie pozwalają otrzymać). Zabierzmy się do pracy w sposób następujący. Z częstotliwością wzorca cezowego zsynchronizujemy generator 9,513 GHz. Synchronizacja ta sprawi, że generator będzie równie dokładny jak sam wzorzec. W dodatku jest ona stosunkowo prosta w realizacji, bo częstotliwości generatora i wzorca są sobie bliskie. Gdy częstotliwość naszego generatora pomnożymy 48 020 razy, dostaniemy 456 816 GHz, a więc znajdziemy się bardzo blisko badanej linii, w domenie częstotliwości fal świetlnych. Niestety, nie ma prostego urządzenia mnożącego częstość aż tyle razy. Dysponujemy za to elementami nieliniowymi, kryształami i diodami, które mnożą częstotliwość od 2 do kilku–kilkunastu razy. Korzystając z nich, możemy zwielokrotnić częstotliwość naszego generatora 9,513 GHz w następujący sposób: $7 \cdot 7 \cdot 7 \cdot 7 \cdot 5 \cdot 2 \cdot 2 = 48\,020$. Po każdym mnożeniu musimy użyć kolejnego generatora lub lasera w celu wzmocnienia sygnału i przekazania go dalej, aż do ostatniego lasera, pracującego już na żądanej częstotliwości (rys. 2). Zespół zsynchronizowanych ze sobą oscylatorów (bo tak fachowo określa się generatory i lasery) nazywa

się łańcuchem częstotliwości. Stanowi on pomost albo lepiej: przekładnię pomiędzy gigahercowym drganiem wzorca cezu a kilkusetterahercowymi drganiami fal świetlnych. Zmiana częstotliwości pierwszego ogniwa łańcucha, generatora 9,513 GHz o 1 Hz pociąga za sobą zmianę częstotliwości ostatniego ogniwa łańcucha – lasera pracującego na częstotliwości optycznej – o precyzyjną wartość 48 020 Hz. Cały łańcuch jest zsynchronizowany z wzorcem cezowym, co zapewnia niezwykle dokładne wyznaczenie częstotliwości.



Rys. 2. Łańcuch częstotliwości – zespół zsynchronizowanych ze sobą oscylatorów: generatorów mikrofal i laserów. W wyniku sukcesywnego mnożenia częstotliwości podstawowej, zsynchronizowanej z częstotliwością wzorca cezowego, otrzymuje się wypadkowy mnożnik wynoszący 48 020. Pozwala on otrzymanie dokładnie określonej częstotliwości z zakresu fal widzialnych, generowanej przez ostatnie „ogniwo” – w tym przypadku przez laser barwnikowy. Zwróćmy uwagę na ilość użytych urządzeń: dwa generatory i sześć laserów

Niestety, tak jak pokazuje rys. 2, nawet najprostsze łańcuchy są niesamowicie skomplikowane i trudne w obsłudze. Zawierają od kilku do kilkunastu laserów różnego typu, które muszą być precyzyjnie kontrolowane i stabilizowane. Dodatkowo pomiar częstotliwości dowolnej linii atomowej wymaga innego zestawu mnożników, generatorów i laserów. Łańcuchy nie są zatem uniwersalne: pojedynczy pomiar częstotliwości optycznej danego przejścia atomowego wymaga osobnego łańcucha, którego zbudowanie i uruchomienie to średnio pięć lat pracy zespołu pięciu osób. Na szczęście pojawiło się lepsze rozwiązanie: optyczny grzebień częstotliwości – bohater tegorocznej Nagrody Nobla.



Rys. 3. Wyjaśnienie widma optycznego grzebienia częstotliwości

Aby zrozumieć działanie i własności optycznego grzebienia częstotliwości, spójrzmy najpierw na rys. 3. Rozważmy światło idealnego lasera o pracy ciągłej. Światło to ma częstotliwość f . Obserwowane w czasie drżania fali świetlnej (wiemy, że nie potrafimy tego zrobić!) wyglądałyby jak nieskończenie długi, sinusoidalny przebieg o stałej amplitudzie. Analiza spektralna tego światła wyraźnie pokazuje, że mamy do czynienia z jedną częstotliwością f – w widmie widać tylko jedną, wąską linię. Załóżmy teraz, że nasz idealny laser zaczął dodatkowo emitować drugą falę świetlną o częstotliwości większej od poprzedniej Δf . Łatwo zgod-

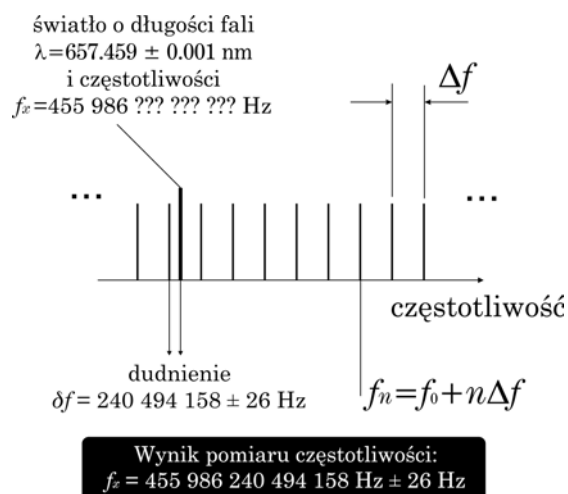
nać, jak będzie wyglądało widmo takiego lasera. Jak pokazuje rys. 3, będą w nim widoczne dwie wąskie linie, jedna o częstotliwości f , druga o częstotliwości $f + \Delta f$. A jak wygląda promieniowanie naszego lasera w czasie? Jak wiemy, złożenie dwóch drgań o zbliżonych częstotliwościach prowadzi do powstania dudnień. Nie inaczej jest i w naszym przypadku. Laser, pomimo że emituje dwie ciągłe fale, sam nie jest już urządzeniem o pracy ciągłej. Światło wychodzi z niego w postaci szerokich, połączonych ze sobą impulsów! Rys. 3 pokazuje, co dzieje się z przebiegiem czasowym światła laserowego, gdy laser zaczyna emitować coraz to więcej spójnych fal różniących się od siebie o częstotliwość Δf (kolumna „suma drgań”). Okazuje się, że im więcej takich fal, tym impulsy lasera stają się coraz węższe, a „przerwy” pomiędzy nimi coraz bardziej płaskie. W widmie lasera o coraz węższych impulsach pojawia się też coraz więcej linii odpowiadających kolejnym częstotliwościom. W granicznym przypadku, gdy laser generuje bardzo dużo spójnych, skorelowanych fal, impulsy laserowe stają się bardzo, ale to bardzo wąskie, a widmo takiego lasera to ogromna ilość linii rozmieszczonych w jednakowych odstępach wynoszących Δf . Można łatwo pokazać, że odwrotność tego odstepu, $1/\Delta f$, to tzw. okres repetycji lasera impulsowego, czyli czas pomiędzy emisją dwóch kolejnych impulsów. Widmo lasera impulsowego – zbiór wielu równoodległych linii spektralnych – kojarzy się nieodparcie z zębami grzebienia. Stąd właśnie pochodzi nazwa „optyczny grzebień częstotliwości”. Czasami nazwą tą określa się też femtosekundowy laser impulsowy, który generuje widmo grzebienia. Czas trwania jednego impulsu takiego lasera to kilkadziesiąt femtosekund, a czas upływający pomiędzy emisją kolejnych impulsów to pojedyncze nanosekundy.

Do czego taki grzebień może się nam przydać? Musimy sobie raz jeszcze uświadomić, czym jest widmo grzebienia. Jest to nic innego jak niesamowita ilość spójnych, wzajemnie zsynchronizowanych laserów o pracy ciągłej (w praktyce ich liczba, czyli liczba zębów w grzebieniu, jest rzędu miliona!). Widmo światła generowanego przez zespół takich laserów można traktować jak podziałki na linijce do pomiaru częstotliwości. Oczywiście, żeby taka linijka była dokładna, musi być stabilna – odległość pomiędzy wspomnianymi podziałkami nie może się zmieniać, a cała skala nie może się przesuwać. Jak w takim razie zapewnić stabilność takiej linijki? Okazuje się, że pomysł stabilizacji jest genialnie prosty. Spójrzmy na rys. 4, pokazujący fragment grzebienia. Powiedzieliśmy wcześniej, że odstęp Δf pomiędzy „zębami” grzebienia to nic innego jak częstotliwość, z jaką impulsy opuszczają laser. Częstotliwość ta jest rzędu gigaherców, a więc może być bezproblemowo mierzona przez detektory i, co najważniejsze, praktycznie bezpośrednio zsynchronizowana z cezowym wzorcem częstotliwości! Tak więc mamy sposób na zapewnienie stabilności odstepu zębów grzebienia z najwyższą osiągalną współcześnie dokładnością. To jednak nie wszystko. Częstotliwość n -tego zęba w grzebieniu dana jest wzorem $f_n = f_0 + n\Delta f$, gdzie n jest dużą liczbą całkowitą,

a f_0 częstotliwością wynikającą z pewnych własności laserów impulsowych, których nie będę tutaj omawiał. Jeśli wystabilizujemy Δf , a nie zadamy o stabilność f_0 , to cały grzebień, pomimo idealnie równoodległych zębów, będzie się przesuwiał na skali częstotliwości. Jest to sytuacja niedopuszczalna. Na szczęście Hänsch zaproponował bardzo sprytną metodę „dobrania” się do tej częstotliwości. Wystarczy podwoić częstotliwość f_n n -tego „zęba” i doprowadzić do jej zdudnienia z „zębem” $2n$ -tym (f_{2n}). Otrzymany w ten sposób sygnał dudnień będzie miał częstotliwość $2f_n - f_{2n} = 2(f_0 + n\Delta f) - (f_0 + 2n\Delta f) = f_0$! I znów – ponieważ częstotliwość f_0 jest rzędu gigaherców, stosunkowo prosto można ją zsynchronizować z wzorcem cezowym. Tak stabilizowany grzebień jest już naprawdę niesamowicie dokładny – częstotliwości wszystkich jego „zębów” są wyznaczone przez bardzo precyzyjnie kontrolowane wartości f_0 i Δf , odtwarzane z dokładnością częstotliwości wzorcowej. Wspomniana wyżej liczba n , o wartości liczbowej kilkudziesięciu tysięcy, to nic innego jak pożądaną przez nas mnożnik, łączący obszar wzorcowej częstotliwości cezu z obszarem częstotliwości optycznych. Trudno nie zauważyć przewagi grzebienia nad łańcuchem. Po pierwsze, grzebień jest uniwersalny, bo umożliwia syntezę dowolnej częstości optycznej przez zmianę łatwo kontrolowanych częstotliwości radiowych f_0 i Δf . Po drugie, jest on też o wiele prostszy w realizacji – wymaga zaledwie jednego lasera impulsowego!

Jak za pomocą grzebienia można mierzyć częstotliwość światła? Spójrzmy raz jeszcze na rys. 4. Załóżmy, że zależy nam na dokładnym wyznaczeniu częstotliwości f_x lasera o długości fali $\lambda_x = 657,459$ nm, stabilizowanego do pewnego przejścia w atomie wapnia. Korzystając z komercyjnych urządzeń spektroskopowych do pomiaru długości fali i z równania $f = c/\lambda$, jesteśmy w stanie określić częstotliwość lasera z dokładnością do pojedynczych gigaherców. Oznacza to, że znamy jedynie 6 początkowych z wszystkich 15 cyfr, jakie należy podać, by określić częstotliwość z dokładnością do pojedynczych herców. Wyznaczenie 9 kolejnych cyfr umożliwi nam grzebień. Wystarczy, że światło naszego lasera skierujemy razem ze światłem grzebienia (czyli z wiązką „grzebieniowego” lasera impulsowego) na ten sam detektor. Powstanie wtedy sygnał dudnień pomiędzy światłem lasera 657,459 nm a najbliższym mu „zębem” grzebienia. Zliczając te dudnienia (potrafimy to zrobić – ich częstotliwość to zaledwie setki megaherców!), otrzymamy 9-cyfrową „końcówkę” f_x . Ostateczny wynik pomiaru częstotliwości za pomocą grzebienia, $f_x = 455\,986\,240\,494\,158 \pm 26$ Hz, ma niesamowitą dokładność $6 \cdot 10^{-14}$!

Rozwój precyzyjnej spektroskopii laserowej i techniki grzebienia sprawił, że pomiary częstotliwości są obecnie najdokładniejszymi pomiarami w fizyce. Dzięki tej dokładności możemy nie tylko ultraprecyzyjnie wyznaczać stałe fizyczne, ale badać, czy nie zmieniają się one w czasie. Takie zmiany, obserwowalne dopiero przy precyzji oferowanej przez grzebień, mogłyby świadczyć na niekorzyść pewnych teorii (złamanie zasady równoważności w ogólnej teorii względności).



Rys. 4: Zasada pomiaru częstotliwości z wykorzystaniem grzebienia

Grzebień optyczny, traktowany jako przekładnia pomiędzy domeną częstotliwości optycznych a domeną gigahercowych częstotliwości radiowych, które z łatwością potrafimy mierzyć, stanowi znakomity „mechanizm” zegara atomowego opartego na optycznych wzorcach częstotliwości. Wzorce te są znacząco stabilniejsze od wzorca cezowego i gwarantują lepszą, dokładniejszą definicję sekundy. Oparte na nich zegary pozwolą m.in. na poprawę dokładności systemu GPS, gdzie błąd pomiaru czasu rzędu nanosekundy powoduje niedokładność wyznaczenia położenia ok. 30 centymetrów. Światło grzebienia optycznego może zostać także wykorzystane bezpośrednio do spektroskopii laserowej, w szczególności do spektroskopii dwufotonowej.

Najbardziej fascynujące jest jednak to, że grzebień po raz pierwszy umożliwiły zliczenie drgań fali świetlnej z dokładnością co do jednego. Przypomnijmy, że takie drganie trwa około 1 femtosekundy. W tak krótkim czasie światło zdąży przebyć zaledwie ułamek mikrometra!

Literatura:

- [1] The Nobel Prize in Physics 2005 – Supplementary Information
<http://nobelprize.org/physics/laureates/2005/info.pdf>
- [2] Th. Udem et al., Nature **416** 233 (2002)
- [3] R. Holzwarth et al., IEEE Journal of Quantum Electronics **37** 1492 (2001)
- [4] T. M. Brzozowski, Optyczny grzebień częstotliwości – Nobel 2005
 Konwers. PTF, <http://www.ceti.pl/tmb/php/run.php?type=seminars&l=pl>