

„Narzędzia zrobione ze światła” Nagroda Nobla z fizyki 2018, część II

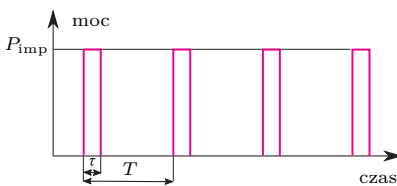
* Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Piotr FITA*

W poprzednim numerze zajmowaliśmy się tzw. pęsetą optyczną, za skonstruowanie której połowę nagrody Nobla z fizyki za rok 2018 otrzymał Arthur Ashkin. Tym razem omówimy odkrycie, za które Donna Strickland i Gérard Mourou otrzymali drugą połowę nagrody.

Wzmacnianie ultrakrótkich impulsów laserowych

Wyjaśnienie, dlaczego wytwarzanie ultrakrótkich impulsów światła o dużej energii było osiągnięciem na miarę Nagrody Nobla, najlepiej zacząć od przytoczenia kilku liczb i przeprowadzenia prostych rachunków. Impulsy światła laserowego, o których tu mowa, trwają od kilku do około 100 femtosekund, a femtosekunda (fs) to 10^{-15} s. Trudno wyobrazić sobie tak krótkie czasy, bo za najkrótszy czas postrzegany przez człowieka można uznać przysłowiowe „mgnienie oka”, trwające około 0,1 s. Tutaj mówimy o impulsach światła przynajmniej milion milionów razy krótszych. Czas trwania tych impulsów ma się do jednej sekundy tak, jak czas trwania przeciętnego filmu do wieku Wszechświata! Ma to kilka istotnych konsekwencji. Po pierwsze energia światła jest skupiona w niezwykle krótkich „paczkach”, co oznacza, że moc światła w takiej „paczce” jest bardzo wysoka, nawet jeśli średnia moc lasera generującego te impulsy nie jest duża. Zrobmy prosty rachunek, zakładając, że laser generuje ciąg impulsów o czasie trwania τ i energii U , oddalonych o T . Dla uproszczenia przyjmijmy, że impulsy mają kształt prostokątny (rys. 1). W takiej sytuacji średnia moc lasera jest równa



Rys. 1

$$P_{\text{sr}} = \frac{U}{T},$$

a moc światła w impulsie (moc szczytowa) równa jest

$$P_{\text{imp}} = \frac{U}{\tau}.$$

Stosunek szczytowej do średniej mocy światła wynosi więc

$$\frac{P_{\text{imp}}}{P_{\text{sr}}} = \frac{T}{\tau}.$$

Dla mieszczącego się na niewielkim stole lasera o średniej mocy 1 W, generującego impulsy trwające 100 fs, oddalone od siebie o 1 ms, stosunek ten wynosi 10^{10} , a moc szczytowa lasera jest równa 10^{10} W = 10 GW. Warto zauważyć, że z mocami mierzonymi w GW ma się do czynienia właściwie tylko w przypadku elektrowni atomowych. O oddziaływaniu światła z materią decyduje jednak nie tyle moc, co natężenie tego światła, czyli stosunek mocy do powierzchni, na którą pada światło. Wiązkę laserową można łatwo zogniskować do rozmiarów rzędu 0,01 mm. Natężenie światła I w ognisku wiązki o promieniu r jest równe

$$I = \frac{P}{\pi r^2}.$$

Przy podanych powyżej parametrach wiązki impulsów i $r = 0,01$ mm szczytowe natężenie światła ma wartość około $3 \cdot 10^{19}$ W/m². Dla porównania, natężenie światła słonecznego na powierzchni Ziemi jest równe około 10^3 W/m².

Natężenie światła jest bezpośrednio związane z amplitudą drgań pola elektrycznego E_0 :

$$I = \frac{1}{2} c \varepsilon_0 E_0^2,$$

gdzie c jest prędkością światła w próżni, a ε_0 przenikalnością dielektryczną próżni. Związek ten pozwala obliczyć amplitudę drgań pola elektrycznego, która w ognisku wiązki o powyższych parametrach jest rzędu 10^{11} V/m. Ten sam rząd wielkości mają natężenia pól elektrycznych w atomach, a więc pole elektryczne



Rozwiązanie zadania F 999.

W chwili początkowej powierzchnia walca porusza się względem podłogi z prędkością $u_0 = \omega_0 r$. W związku z tym podłoga działa na walec siłą tarcia $T = -\mu mg$. Siła ta nadaje walcowi przyspieszenie ruchu postępowego $a = \mu g$ oraz spowalnia jego ruch obrotowy – przyspieszenie kątowe $\varepsilon = -\mu mgr/I$ (znak minus w obu wzorach wynika z przyjęcia, że w chwili początkowej stykająca się z podłogą powierzchnia walca porusza się w dodatnim kierunku osi poziomej). Prędkość kątowa ω walca i prędkość v jego ruchu postępowego zmieniają się w czasie według wzorów

$$\omega = \omega_0 - \frac{\mu mgr t}{I} \quad \text{oraz} \quad v = -\mu g t,$$

a prędkość u powierzchni walca (stykającej się z podłogą) względem podłogi wynosi

$$\begin{aligned} u &= \omega r + v = \omega_0 r - \frac{\mu mgr^2 t}{I} - \mu g t = \\ &= \omega_0 r - 3\mu g t. \end{aligned}$$

Gdy u zmaleje do zera, poślizg ustanie. Nastąpi to po czasie

$$\tau = \frac{\omega_0 r}{3\mu g}.$$

Stala siła tarcia wykona pracę na drodze $s = \omega_0 r \tau - \frac{3}{2} \mu g \tau^2$ równej całkowitemu przesunięciu powierzchni względem siebie. Praca ta wynosi

$$W = \frac{\omega_0^2 r^2}{6\mu g}.$$

Praca ta jest równa różnicy początkowej energii kinetycznej ruchu obrotowego walca i jego całkowitej energii kinetycznej podczas toczenia bez poślizgu.



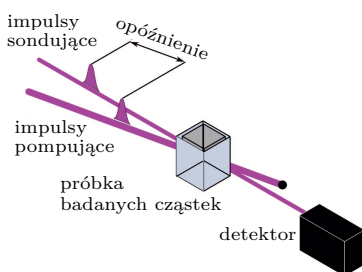
Rozwiązanie zadania F 1000.
Energie kwantów promieniowania elektromagnetycznego emitowanego przez atom wodoru opisuje zależność

$$h\nu = R \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right),$$

gdzie ν oznacza częstotliwość fali, a n_1 i n_2 to numery poziomów energetycznych, między którymi zaszło przejście promieniste ($n_1 < n_2$). Częstotliwość ν promieniowania związana jest z długością fali wzorem $\nu = c/\lambda$. Zakres długości fal rejestrowanych przez ludzkie oko odpowiada więc zakresowi energii 1,68 eV < $h\nu$ < 3,27 eV. Jeśli wyrazimy otrzymany zakres energii za pomocą stałej Rydberga, to otrzymamy

$$0,12R < h\nu < 0,24R.$$

Jak łatwo sprawdzić, wszystkie przejścia promieniste na poziom $n_1 = 1$ odpowiadają energiom większym od górnej granicy przedziału widzialnego, a na poziom $n_1 = 3$ energiom mniejszym od dolnej granicy tego obszaru ($1/9 < 0,12$). W badanym obszarze znajdują się linie o $n_1 = 2$ i $n_2 = 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9$ (ostatnie trzy linie wypadają w obszarze promieniowania nadfioletowego – za jego granicę przyjmuje się $\lambda = 400$ nm). Jest to tak zwana seria Balmera.



Rys. 2

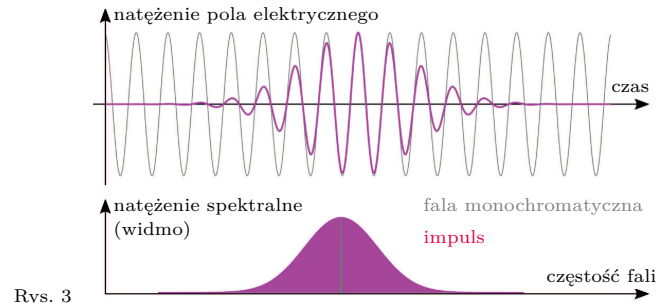
zogniskowanej wiązki impulsów femtosekundowych może łatwo okazać się silniejsze niż pole utrzymujące elektrony w atomie. W takiej sytuacji może dojść do oderwania elektronów od atomów lub cząsteczek znajdujących się w ognisku wiązki, czyli ich jonizacji. Po zogniskowaniu wiązki dostatecznie silnych impulsów w powietrzu skutkuje to wytworzeniem „iskierki” w ognisku wiązki (zdjęcie na tylnej okładce). Jest to chmurka zjonizowanych atomów i elektronów (plazmy) o temperaturze tysięcy kelwinów i rozmiarach rzędu mikrometrów. Taką „kulkę plazmy” można wykorzystać jako narzędzie do bardzo precyzyjnej obróbki materiałów, cięcia lub wiercenia otworów o mikrometrowych rozmiarach, nawet w najtwardszych materiałach o bardzo wysokiej temperaturze topnienia. Do obróbki materiałów oczywiście można zastosować również laser pracy ciągłej lub generujący o wiele dłuższe impulsy, co od dawna wykorzystuje się w przemyśle. Taki laser obrabia jednak materiał, topiąc go, co oznacza, że na krawędziach mogą pojawiać się nadtopienia. W przypadku cięcia materiału wiązką impulsów ultrakrótkich o odpowiednich parametrach materiał jest szybko przekształcany w plazmę, która od razu opuszcza obrabiany obszar w postaci gazowej, dzięki czemu jakość uzyskiwanych krawędzi jest dużo lepsza i możliwa jest o wiele bardziej precyzyjna obróbka.

Bardzo silne pola elektryczne ultrakrótkich impulsów laserowych można też wykorzystać do przyspieszania cząstek naładowanych w tzw. akceleratorach stołowych. Pozwalają one na relatywnie krótkiej drodze (dzięki czemu taki akcelerator mieści się na stole) przyspieszać cząstki do energii, które wymagają klasycznych akceleratorów o nieporównanie większych rozmiarach.

W innych zastosowaniach korzysta się nie tyle z dużych natężeń światła w impulsach, co z samego faktu, że ultrakrótkie impulsy trwają naprawdę bardzo krótko. Dzięki temu możliwe stało się badanie procesów zachodzących w pojedynczych cząsteczkach, takich jak tworzenie i zrywanie wiązań chemicznych, zmiany strukturalne (obroty fragmentów cząsteczek względem siebie) czy drgania fragmentów cząsteczek wokół ich położenia równowagi. Procesy te zachodzą w czasach rzędu femtosekund, a do ich badania niezbędne jest narzędzie pozwalające zaobserwować tak szybkie zmiany. Tym narzędziem są właśnie femtosekundowe impulsy laserowe. W doświadczeniach, które pozwalają zaobserwować przebieg wymienionych wyżej procesów, wykorzystuje się zwykle jeden lub więcej takich impulsów. Pierwszy z nich (tzw. pompujący) inicjuje badany proces, drugi zaś, opóźniony względem pierwszego (tzw. sondujący), oddziałuje z badanymi cząsteczkami w trakcie zainicjowanego procesu. Zmieniając opóźnienie pomiędzy impulsami i badając zmiany parametrów impulsu sondującego (energię, widmo, polaryzację) w zależności od opóźnienia, można uzyskać informację o szybkości i charakterze procesu zachodzącego w cząsteczkach oddziałujących z tym impulsem. Za badania w tej dziedzinie Ahmed Zewail w 1999 roku otrzymał Nagrodę Nobla.

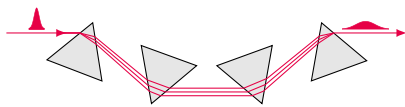
Nagroda Nobla z roku 2018 przyznana była jednak nie za zastosowania impulsów femtosekundowych o dużej energii, ale za samo opracowanie sposobu ich wytwarzania. Właściwie nawet nie tyle wytwarzania, co wzmacniania, bo metoda generacji impulsów o relatywnie małej energii była znana już wcześniej (co również jest interesującym, ale i obszernym zagadnieniem, więc nie będziemy się nim tutaj zajmować). Wzmacnianie impulsów femtosekundowych jest problematyczne ze względu na tę samą ich cechę, która jest jedną z ich zalet – bardzo duże szczytowe natężenie światła. Żeby impuls mógł zostać wzmocniony, musi przejść przez ośrodek wzmacniacza optycznego. Gdyby był to impuls ultrakrótki, to nawet jeśli powiększając wiązkę wzmacnianą, udało by się uniknąć zniszczenia ośrodka wzmacniającego, pojawiłyby się cała gama zjawisk optycznych wynikających z oddziaływania światła o dużym natężeniu z materią. Choć są to zjawiska niezwykle interesujące, badane i wykorzystywane w dziedzinie zwanej optyką nieliniową, to tutaj zniweczyłyby cały oczekiwany efekt wzmocnienia światła.

Pomysł na wzmocnienie impulsów femtosekundowych wiąże się bezpośrednio z ich własnościami. W przeciwieństwie do typowego lasera pracy ciągłej, który ma wąskie widmo, a więc można w uproszczeniu powiedzieć, że generuje światło o jednej długości fali, widmo impulsów ultrakrótkich jest relatywnie szerokie. Wynika to z faktu, że przy czasie trwania impulsu rzędu femtosekund składa się on z kilku-kilkudziesięciu oscylacji fali elektromagnetycznej. Nie stanowi więc fali monochromatycznej, w której oscylacje mają niezmienny charakter i stałą częstość, lecz składają się na niego fale o różnych częstościach (czyli barwach). Najkrótsze impulsy mają widmo o szerokości porównywalnej z zakresem szerokości widma światła widzialnego!



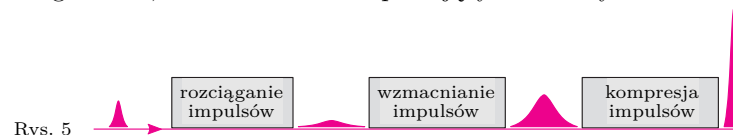
Rys. 3

Z tego wynika, że wiązka impulsów femtosekundowych padając na pryzmat lub siatkę dyfrakcyjną, rozszczepi się analogicznie do wiązki światła białego, które w takim przypadku rozdzieliłoby się na wszystkie barwy tęczy. Fale o różnych częstościach składające się na impuls (czyli jego składowe spektralne) za elementem rozszczepiającym światło (dyspersyjnym) będą poruszały się po różnych drogach. Ustawiając odpowiednio pryzmaty lub siatki dyfrakcyjne na drodze wiązki impulsów, można sprawić, że na końcu ich układu uzyska się znowu skolimowaną wiązkę, jednak różne składowe spektralne, poruszające się po drogach o różnej długości, będą przesunięte w czasie względem siebie (taki impuls nazywamy *świergoczącym*, bo częstość fali w impulsie zależy od czasu). Impuls przechodzący przez taki układ zostanie rozciągnięty w czasie, a szczytowe natężenie światła w impulsie zmaleje tyle razy, ile razy impuls zostanie wydłużony.



Rys. 4

Dzięki zastosowaniu tej metody impuls można wydłużyć na tyle znacząco, by dało się go bezpiecznie wzmocnić, a po wzmocnieniu znowu skompresować za pomocą odpowiedniego układu elementów dyspersyjnych, komplementarnym do układu, który wcześniej impuls rozciągnął: jeśli w układzie wydłużającym składowe krótkofalowe poruszały się po dłuższej drodze niż składowe długofalowe, to w układzie kompresującym musi być odwrotnie.



Rys. 5

Obecnie idea ta wydaje się niezwykle prosta, a wzmacniacze ultrakrótkich impulsów laserowych są już bardzo rozpowszechnionymi układami sprzedawanymi przez wiele firm. Ich użytkownicy często nie muszą nawet wiedzieć, w jaki sposób światło jest w nich wzmocniane, a tym bardziej nie wiedzą, kto ten sposób wymyślił. Bardzo dobrze, że Komitet Noblowski docenił ten prosty koncepcyjnie, ale niezwykle sprytny pomysł, który otworzył wiele nowych kierunków badań i zastosowań w dziedzinach odległych od optyki, takich jak inżynieria, fizyka cząstek elementarnych czy chemia. Tymczasem Gérard Mourou nie spoczywa na laurach – jest jednym z inicjatorów przedsięwzięcia *Extreme Light Infrastructure* (ELI), którego celem jest zbudowanie w krajach Europy Środkowo-Wschodniej (niestety nie w Polsce) szeregu źródeł impulsów laserowych, których moce mają być rzędu petawatów (10^{15} W). Z pewnością doprowadzi to do nowych odkryć w dziedzinie oddziaływania materii ze światłem o ekstremalnych natężeniach.

