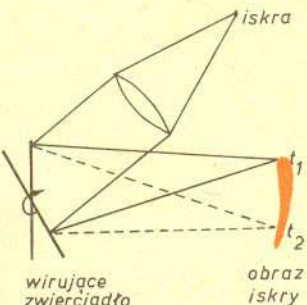


# Zdjęcie światła w locie

Mgr Tomasz KOTOWSKI



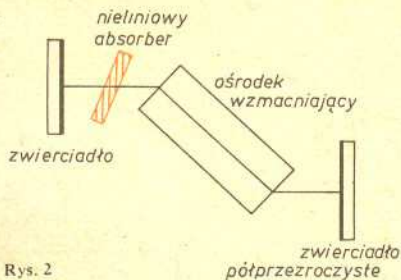
Rys. 1

- 1 mikrosekunda ( $\mu s$ ) =  $10^{-6}s$
- 1 nanosekunda (ns) =  $10^{-9}s$
- 1 pikosekunda (ps) =  $10^{-12}s$
- 1 femtosekunda (fs) =  $10^{-15}s$

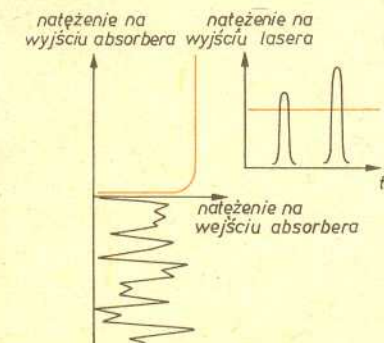
Najczęściej jedyną możliwość pełnego zrozumienia zjawiska fizycznego daje obserwacja jego przebiegu w czasie. Jednak nie zawsze możemy to zrobić. Badając np. silne oddziaływanie cząstek elementarnych ograniczamy się zwykle do przygotowania cząstek w czasie znacznie poprzedzającym zderzenie i ich rejestracji po długim czasie po zderzeniu. Samo oddziaływanie, ze względu na krótki czas trwania ( $10^{-23}$  s), nie jest dostępne dla naszych przyrządów pomiarowych. Podobne trudności napotykamy badając fotosyntezę wewnątrz komórki roślinnej wieloetapowy proces, na który składa się kilkadziesiąt reakcji chemicznych. Niektóre z tych etapów zachodzą niezwykle szybko, w czasie rzędu kilku pikosekund. Z ich poznanem związane są nadzieje na uzyskanie bezpośredniej, efektywnej zamiany energii światła słonecznego na energię chemiczną czy elektryczną. Ostatnio, dzięki możliwości generacji subpikosekundowych impulsów światła, stało się możliwe badanie nawet tak szybkich procesów.

Już w 1834 roku Wheatstone potrafił mierzyć przedziały czasu rzędu mikrosekund. Badał on czasy trwania wyładowań elektrycznych. Wytwarzany przez soczewkę obraz iskry, po odbiciu od zwierciadła, padał na ekran (rys. 1). Przy szybkim obracaniu się zwierciadła światło iskry, emitowane w kolejnych chwilach czasu, tworzyło na ekranie przesunięte względem siebie obrazy, dając w efekcie — dzięki dość dużej bezwładności oka — smugę światła. Jej długość, przy znanej prędkości obrotowej zwierciadła, określała czas trwania wyładowania. Przy pomocy tej, tak zwanej kamery smugowej można badać błyski wyładowań iskrowych trwające kilka mikrosekund.

Jak jednak mierzyć prędkość obrotową szybko wirującego zwierciadła? Można na przykład wykonać szereg otworów na obwodzie tarczy obracającej się wraz ze zwierciadłem i skierować na nie wąski strumień powietrza. Częstotliwość dźwięku takiej syreny zależy od ilości otworów w tarczy i prędkości obrotowej. W ten sposób pomiar czasu można zastąpić pomiarem częstotliwości.



Rys. 2



Rys. 3

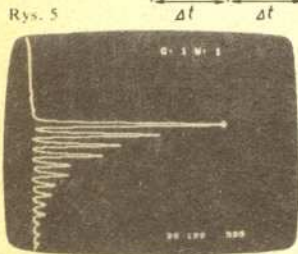
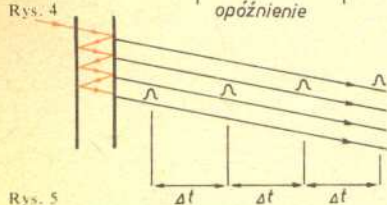
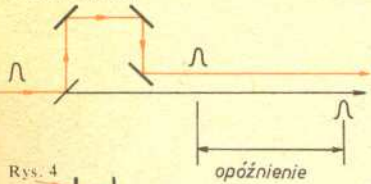
Najkrótszy możliwy do uzyskania impuls o częstości  $\omega$  trwa  $\Delta t_{min} \approx 1/\omega$ . Dla lasera neodymowego ( $\omega \approx 3 \cdot 10^{14} s^{-1}$ )  $\Delta t_{min} \approx 3$  fs.

Znaczny postęp w dziedzinie obserwacji szybkich procesów przyniósł rozwój fotografii. Sto lat temu wielkie poruszenie wywołała seria zdjęć galopującego konia, wykonana przez E. Muybridge'a przy czasach otwarcia migawki około 1/500 s. Zdjęcia te udowodniły, że galopujący koń chwilami nie dotyka ziemi. Pokazały one również, że koń nigdy nie przybiera tak chętnie przedstawianej przez ówczesnych artystów pozycji z przednimi nogami wyprostowanymi do przodu i tylnymi jednocześnie wyciągniętymi do tyłu.

Dalszy postęp w badaniu ultraszybkich procesów przyniósł rozwój techniki laserowej, a w szczególności możliwość formowania impulsów światła trwających ułamki pikosekund. Jedną z metod generacji ciągu takich impulsów polega na umieszczeniu w rezonatorze lasera, oprócz ośrodka generującego i wzmacniającego światło, nieliniowego absorbera (może być nim np. roztwór barwnika; rys. 2). Absorber taki jest nieprzezroczysty dla światła o małym natężeniu, natomiast powyżej pewnego progu natężenia jego absorpcja gwałtownie maleje (rys. 3) — nazywamy to wybieleniem się absorbera. A więc z powstającego początkowo w ośrodku wzmacniającym światła o przypadkowych zmianach natężenia, tylko najsilniejszymi fluktuacjom nieliniowy absorber nie „zasłania” zwierciadeł tworzących rezonator lasera. Te ultrakrótkie fluktuacje są wzmacniane przy kolejnych przejściach przez ośrodek wzmacniający i opuszczają rezonator przez jedno ze zwierciadeł, które jest częściowo przezroczyste. Czas trwania najkrótszych generowanych obecnie impulsów nie przekracza 200 femtosekund.

Jak mierzyć czas trwania tak krótkich impulsów? Żadna mechaniczna migawka czy wirujące zwierciadło nie będą tu dostatecznie szybkie (prędkość wirowania musiałaby być tak duża, że siły odśrodkowe rozerwałyby zwierciadło na kawałki). Do badania impulsów pikosekundowych stosuje się współczesną wersję kamery smugowej Wheatstone'a lub też aparat fotograficzny z superszybką migawką.

Prosta metoda oceny czasu trwania impulsów pikosekundowych (opisana w Delcie 11/1978) polega na nałożeniu dwóch takich impulsów poruszających się w przeciwnych kierunkach w barwniku o fluorescencji pobudzonej dwufotonowo. Rozmiary fluoryzującego obszaru pozwalają na wyznaczenie czasu trwania impulsu.



Współczesna kamera smugowa to przetwornik elektrooptyczny, w którym fotoelektrony wybite z katody formowane są w wiązkę. Wiązka ta jest następnie odchylana w polu elektrycznym, tak że szybko przemiata ekran luminescencyjny. Chwilom, w których natężenie światła badanego impulsu jest większe, odpowiadają jaśniejsze punkty na ekranie. Odchylaną lusterkiem wiązkę światła zastąpiła w tej kamerze smugowej odchylana polem elektrycznym wiązka elektronów.

Aby urządzenie takie mogło służyć do pomiarów czasu trwania impulsów, należy je wyskalować. Jak tego dokonać? Nie mamy przecież do dyspozycji „wzorcowych” impulsów o znanym czasie trwania. Możemy jednak zrobić inaczej; przepuścimy ultrakrótki impuls światła przez zwierciadło półprzezroczyste. Część światła skierujemy bezpośrednio w kierunku kamery, a część poddamy pewnemu opóźnieniu (rys. 4). Czas opóźnienia możemy łatwo obliczyć znając prędkość światła i dodatkową drogę, jaką przebył drugi impuls. Odległość dwu plamek na ekranie kamery smugowej będzie odpowiadać temu właśnie opóźnieniu. Dla lepszego wyskalowania kamery przydałoby się więcej takich kolejno po sobie następujących impulsów. Można wyobrazić sobie sposób polegający na użyciu szeregu szpilek wbitych w stół w znanych odległościach względem siebie. Niech przelatujący impuls światła kolejno oświetla szpilki. Błyski odbitego światła mogą być naszymi znacznikami czasu. Inna metoda polega na użyciu dwu wzajemnie równoległych zwierciadeł częściowo przepuszczających światło (rys. 5). Skierowany na te zwierciadła, prostopadłe do ich powierzchni, impuls świetlny zostanie częściowo przepuszczony przez pierwsze zwierciadło, po czym padnie na drugie z nich. Tu część światła przejdzie dalej, część zawróci, aby po pewnym osłabieniu przy odbiciu od pierwszego zwierciadła ponownie paść na drugie. W ten sposób za zwierciadłami otrzymamy szereg coraz słabszych impulsów, opóźnionych względem siebie o podwójny czas przelotu między zwierciadłami.

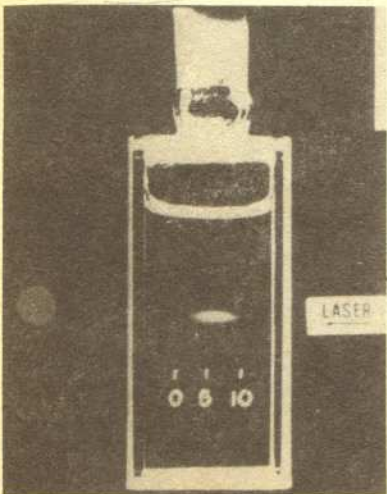
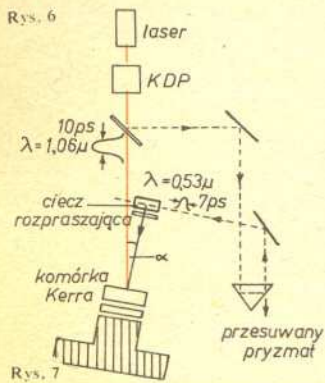
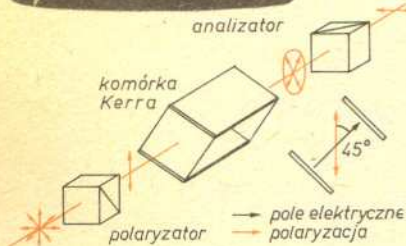
Ultrakrótkie impulsy świetlne mogą również otwierać szybką migawkę aparatu fotograficznego.

Ustawmy na drodze niespolaryzowanej wiązki światła dwa skrzyżowane polaryzatory (rys. 6). Za pierwszym polaryzatorem światło będzie spolaryzowane liniowo i nie przepuści go drugi polaryzator. Na razie mamy więc „migawkę”, która jest stale zamknięta. Gdyby jednak zmienić polaryzację światła na odcinku między polaryzatorami, „migawka” mogłaby (przynajmniej częściowo) otworzyć się. Między polaryzatory możemy na przykład wstawić tzw. komórkę Kerra. Światło przechodzi tu równoległe do płytek kondensatora wypełnionego np. nitrobenzenem. Jest to izotropowa ciecz, która nie zmienia stanu polaryzacji przechodzącego przez nią światła. Jednak po przyłożeniu napięcia do płytek kondensatora nitrobenzen staje się dwójłomny. Oznacza to, że jego współczynnik załamania zależy od wzajemnej orientacji pola elektrycznego i płaszczyzny polaryzacji światła. W wyniku tego światło za komórką spolaryzowane jest eliptycznie i jego część może przejść przez drugi polaryzator. Mamy więc migawkę sterowaną elektrycznie. Czas jej otwarcia może wynosić około 10 nanosekund ( $10^{-8}$ s).

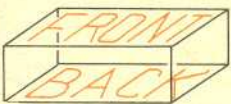
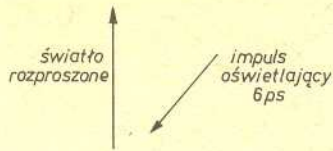
Odpowiednio silny laserowy impuls pikosekundowy może zastąpić impuls elektryczny otwierający migawkę z komórką Kerra — podobnie jak pole elektryczne może on wywołać dwójłomność. Układ i zasada działania są tu podobne jak na rys. 6 — brak tylko elektrod w komórce. Pole elektryczne fali świetlnej zastępuje tu pole elektryczne w kondensatorze.

W ciągu 1 ps światło przebywa drogę zaledwie 0,3 mm. Migawka, otwierana na czas rzędu kilku pikosekund umożliwia więc sfotografowanie światła „w locie”. Układ eksperymentalny przedstawiony jest na rysunku 7. Zawiera on aparat fotograficzny z ultraszybką migawką. Do jej otwierania służy 10-pikosekundowy impuls światła podczerwonego, emitowanego przez laser neodymowy. Jednocześnie impuls ten przechodzi przez płytkę z kryształu KDP ( $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), w którym ok. 10% energii impulsu przekształca się w tzw. drugą harmoniczną, to znaczy impuls o podwójonej częstotliwości.

W ten sposób otrzymujemy impuls światła zielonego dokładnie zsynchronizowany w czasie z silnym impulsem podczerwonym. Dzięki temu łatwo jest mierzyć i kontrolować ich względne opóźnienie przy przechodzeniu przez układ pomiarowy. Impuls podczerwony o gęstości mocy ok.  $0,1 \text{ GW/cm}^2$  padając na komórkę Kerra umieszczoną między skrzyżowanymi polaryzatorami wywołuje krótkotrwałą dwójłomność, a tym samym otwiera migawkę. Po otwarciu przepuszcza ona około 1—2% padającego światła, w stanie zamkniętym natomiast jedynie 0,005%. Obiektem fotografowanym jest impuls światła zielonego w przelocie przez kuwetkę z cieczą rozpraszającą światło (woda z małym dodatkiem mleka). Przy dłuższych czasach otwarcia migawki na zdjęciu widoczna byłaby smuga światła przez całą szerokość kuwetki. Plama po lewej stronie zdjęcia powstała na skutek absorpcji impulsu podczerwonego przez filtr umieszczony na drugim z polaryzatorów.

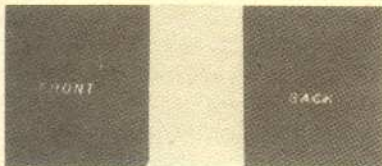


aparat fotograficzny z ultraszybką migawką



Rys. 8

Światło będące złożeniem dwóch fal o tych samych kierunkach i częstościach nazywa się spolaryzowanym eliptycznie.



Przy fotografowaniu aparatem z ultraszybką migawką bardzo ważna jest synchronizacja momentu jej otwarcia z fotografowanym zjawiskiem. Szczególnie dobrze widać to w następującym doświadczeniu. Na przezroczystej płytce szklanej o grubości 1 cm wygrawerowano po obu jej stronach napisy „FRONT” i „BACK” (rys. 8). Jeśli sfotografujemy płytkę „zwykłym” aparatem, to na zdjęciu będą widoczne oba napisy nałożone na siebie.

Zastosujemy tu jednak naszą szybką migawkę, a jako lampy błyskowej oświetlającej napisy użyjemy impulsu światła o czasie trwania kilku pikosekund. Taki impuls oświetli najpierw jedną powierzchnię płytki, a dopiero po chwili drugą (jak długa jest ta chwila, można oszacować znając współczynnik załamania użytego szkła oraz grubość płytki z napisami). Do aparatu fotograficznego dotrze więc najpierw światło rozproszone na literach pierwszego napisu, a później światło rozproszone na drugim z nich. Jeśli otwarcie migawki zsynchronizujemy odpowiednio z błyskiem ultraszybkiej „lampy błyskowej”, to możemy otrzymać zdjęcie wybranej powierzchni fotografowanej płytki. (Zdjęcie tylnej powierzchni będzie nieco gorszej jakości, rozproszone światło impulsu oświetlającego, niosące informację o tej powierzchni ulega bowiem niewielkiemu rozproszeniu na drugiej powierzchni).

Najczęściej stosowanym sposobem badania zmienności w czasie szybko przebiegających procesów jest metoda próbkowania. Impuls pikosekundowy dzieli się przy pomocy częściowo odbijającego zwierciadła na dwa impulsy: silny i słaby. Pierwszy wywołuje zjawiska, które następnie są badane drugim. Opóźnienie między impulsami może być dowolnie regulowane przez wydłużenie drogi jednego z nich. W ten sposób bada się kolejno etapy rozwoju w czasie interesującego nas procesu. Pierwszy impuls może na przykład wzbudzić cząsteczki w badanej próbce. W wyniku tego zdolność absorpcyjna próbki zmaleje, bo wzbudzone cząsteczki nie mogą zaabsorbować następnego kwantu światła. Po pewnym czasie przechodzą one ponownie do stanu podstawowego. Słabe impulsy próbkujące coraz bardziej opóźniane względem silnego wzbudzającego będą więc coraz silniej absorbowane. Mierząc ich osłabienie możemy wyznaczyć czas życia stanu wzbudzonego.

Metody spektroskopii z subpikosekundową czasową zdolnością rozdzielczą pozwolą być może na rozwiązanie zagadki fotosyntezy i poznanie przebiegu w czasie procesów, przy badaniu których musieliśmy dotąd ograniczać się do rejestracji stanu początkowego i końcowego.



## Zadania

Redaguje mgr Krzysztof S. NOWIŃSKI

M 313. Znaleźć całkowite pierwiastki równania

$$x^5 - 13x^2 - 6x - 360 = 0.$$

Rozwiązanie na str. 2

M 314. Zadanie „podwojenia sześcianu” prowadzi do — niewykonalnej za pomocą cyrki i linijki — konstrukcji odcinka o długości  $\sqrt[3]{2}$ . Uzasadnić następujący sposób konstrukcji takiego odcinka: Na linijce zaznaczamy dwa punkty w odległości  $AB = 1$  i rysujemy figurę jak obok tak, by  $AB = DC = 1$ . Wtedy  $AD = \sqrt[3]{2}$ .

(52)

Rozwiązanie na str. 3

M 315. Niech  $f_i$  oznacza  $i$ -tą liczbę Fibonacciego

$$(tj. \quad f_0 = 0, \quad f_1 = 1, \quad f_i = f_{i-1} + f_{i-2} \quad \text{dla} \quad i \geq 2).$$

Łatwo wykazać indukcyjnie, że  $f_{p+q} = f_{p-1}f_q + f_p f_{q+1}$ .

Założmy, że dodanie albo odjęcie dwóch liczb kosztuje \$1, a ich pomnożenie \$5. Wyznaczyć możliwie najmniejszy koszt obliczenia  $f_{100}$ , gdy znamy tylko  $f_0 = 0$  i  $f_1 = 1$ .

Czy można zejść poniżej \$50?

Rozwiązanie na str. 11

(Jan Domański)

Redaguje mgr Tomasz TRATKIEWICZ

F 124. W bryle metalu znajdującego się w polu grawitacyjnym pojawia się pole elektryczne. Dlaczego?

Rozwiązanie na str. 14

F 125. Podczas przepływu prądu przez metale elektrony przewodnictwa zderzają się z jonami sieci krystalicznej przekazując im energię oraz pęd. Mimo to na przewodnik nie działa siła zgodnie z kierunkiem uporządkowanego ruchu nośników. Dlaczego?

Rozwiązanie na str. 11