

## Wizualizacja ruchów konwekcyjnych w gazach i błonach

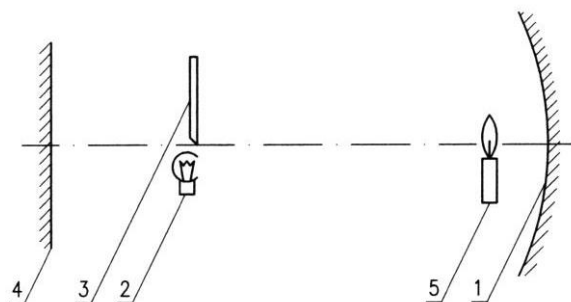
Stanisław Bednarek  
Uniwersytet Łódzki

Znane jest stare powiedzenie, zgodnie z którym „jeden obraz znaczy więcej, niż tysiąc słów”. Głęboki sens tego powiedzenia uwidacznia się obecnie coraz częściej w wielu dziedzinach techniki i życia codziennego. Dla przykładu, trzydzieści, czy czterdzieści lat temu jedynym sposobem komunikowania się użytkownika z komputerem było pracochłonne wpisywanie poleceń [1]. Obecnie zamiast tego wystarczy jedno kliknięcie odpowiedniej ikony. Podobnie znaki drogowe i piktogramy pozwalają na bezpieczne poruszanie się i orientację turystom z całego świata nawet w tych krajach, gdzie używane są niezwykle egzotyczne języki, znane prawie wyłącznie ich mieszkańcom.

Wizualizacja ma też bardzo duże znaczenie w wielu działach fizyki i umożliwia pogładowe przedstawienie np. rozkładu przestrzennego natężenia pola elektromagnetycznego, czy zmian temperatury na powierzchni materiału [2, 3]. Dane do wizualizacji mogą pochodzić z obliczeń albo z eksperymentów. Ten drugi przypadek występuje często w mechanice płynów, gdzie uzyskanie dokładnych rozwiązań staje się trudne albo wręcz niemożliwe ze względu na skomplikowaną postać równań, np. równania Naviera-Stokesa, czy też nałożone warunki brzegowe [4, 5]. Z tego powodu spróbujemy nieco przybliżyć ten temat i opisać proste doświadczenia, pozwalające pokazać interesujące efekty, które zachodzą m.in. w błonach mydlanych.

Na początek zajmiemy się wizualizacją zmian gęstości i związanych z tym ruchów w gazach. Przeznaczony do tego celu układ doświadczalny przedstawia schematycznie rys. 1. Jego podstawowym elementem jest zwierciadło wklęsłe 1, o średnicy kilkunastu cm i ogniskowej ok. 1 m lub większej. Najlepiej do tego celu nadają się zwierciadła o napyłonej powierzchni odbijającej, stosowane w teleskopach. Ponieważ uzyskanie takiego zwierciadła nie zawsze jest łatwe, można spróbować wykorzystać w tym celu powszechnie dostępne zwierciadła wklęsłe, używane do celów kosmetycznych. Takie zwierciadła produkowane w Chinach można kupić nawet za kilkanaście złotych na bazarach lub w sklepach z artykułami gospodarstwa domowego. Ich jakość jest różna, dlatego należy zwrócić uwagę na wybór egzemplarza dającego jak najmniejsze zniekształcenia. Zwierciadło jest oświetlane przez żarówkę 2, umieszczoną w odległości równej podwojonej ogniskowej od jego środka, nieco z boku osi optycznej układu. Żarówka powinna być częściowo osłonięta i wysyłać strumień światła tylko w kierunku zwierciadła. Można tu wykorzystać gotową żarówkę o częściowo posrebrzonej bańce, używaną m.in. w projektorach, albo samodzielnie wykonać odpowiednią osłonę z folii aluminiowej.

Ważną rolę odgrywa nieprzezroczysta, prostokątna przysłona 3, umieszczona obok żarówki i zakrywająca połowę wiązki światła odbijanej od zwierciadła w kierunku ekranu. Krawędź tej przysłony powinna znajdować się na osi optycznej układu. Dokładne dobranie położenia przysłony ma również istotny wpływ na jakość obrazu. Z tyłu żarówki ustawiony został ekran 4, na którym są obserwowane obrazy. Zamiast ekranu można użyć aparatu fotograficznego albo kamery, co pozwoli zapisywać obrazy lub oglądać je na monitorze. Przed zwierciadłem umieszczony jest przedmiot 5, powodujący ruchy konwekcyjne powietrza, które chcemy obserwować. Przedmiotem tym może być paląca się świeczka lub zapalka. Przy zastosowaniu dobrej jakości zwierciadła i dokładnym ustawieniu przysłony układ jest na tyle czuły, że pozwala zaobserwować nawet ruchy konwekcyjne, spowodowane ciepłem dłoni trzymanej przed zwierciadłem.

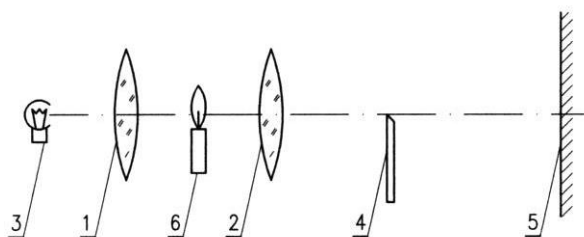


Rys. 1. Schemat układu ze zwierciadłem do wizualizacji ruchów konwekcyjnych powietrza; 1 – zwierciadło wklęsłe, 2 – żarówka w osłonie, 3 – prostokątna przysłona, 4 – ekran, 5 – obserwowany przedmiot

Problemy z doбором dobrej jakości zwierciadła nie występują w przypadku układu pokazanego na rys. 2. Zwierciadło wklęsłe zastąpiono w nim dwiema soczewkami skupiającymi 1, 2 o takich samych średnicach i ogniskowych. Odległość między soczewkami jest równa sumie ich ogniskowych, czyli soczewki tworzą układ konfokalny (współogniskowy). Źródło światła 3, takie samo jak w poprzednim układzie, umieszczono na zewnątrz zestawu soczewek w ognisku jednej z nich. Również na zewnątrz zestawu soczewek, w ognisku drugiej z nich, znajduje się przysłona 4, taka sama i ustawiona w taki sam sposób jak w układzie na rys. 1. Za przysłoną umieszczony jest ekran 5, który można zastąpić kamerą albo aparatem fotograficznym. Przedmiot 6 należy umieścić między soczewkami w pobliżu ich ogniska.

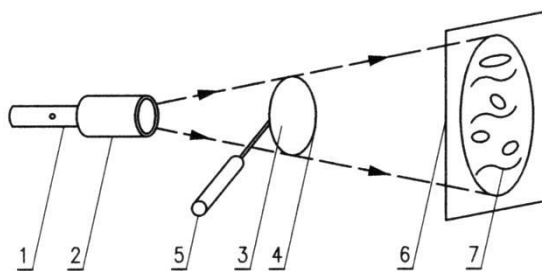
W obu układach otrzymane obrazy przedstawiają rozkłady przestrzenne zmian współczynnika załamania światła przez powietrze, unoszące się dzięki konwekcji wokół ogrzewających je przedmiotów. Ciepło oddawane przez te przedmioty powoduje wzrost temperatury i zmniejszenie gęstości powietrza, co

z kolei skutkuje zmniejszeniem jego współczynnika załamania. W wyniku tego zmienia się długość drogi optycznej i zachodzi interferencja, której końcowym efektem są jaśniejsze i ciemniejsze prążki obserwowane na ekranie. Układ tych prążków jest dynamiczny i obrazuje również zmieniający się rozkład temperatury wokół przedmiotu umieszczonego przed zwierciadłem.



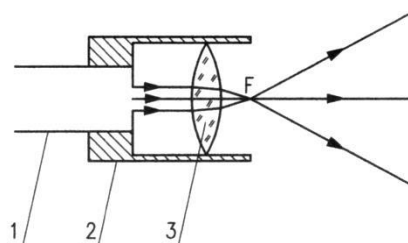
Rys. 2. Schemat układu z soczewkami do wizualizacji ruchów konwekcyjnych powietrza; 1, 2 – soczewki skupiające, 3 – żarówka w osłonie, 4 – prostokątna przysłona, 5 – ekran, 6 – obserwowany przedmiot

Następny układ, przedstawiony na rys. 3, pozwala wizualizować zmiany zachodzące w przezroczystych błonach mydlanych. Używany tutaj wskaźnik laserowy 1 został wyposażony w ekspander 2, który zwiększa średnicę wychodzącej wiązki światła. Wiązka ta pada na pionowo ustawioną błonę mydlaną 3, wytworzoną na drucianej ramce 4, osadzoną w uchwycie 5. Po przejściu przez błonę wiązka światła pada na ekran 6, gdzie widoczny jest obraz błony 7. Ramka do wytwarzania błony może mieć dowolny kształt, np. okrągły albo prostokątny. Wyginamy ją z kawałka cienkiego drutu o średnicy ok. 1 mm, najlepiej miedzianego albo aluminiowego – nie będzie ulegał korozji podczas kontaktu z wodą. Dla wygodniejszego użytkowania końce drutu skręcamy i przymocowujemy w dowolny sposób do jakiegoś uchwytu 5, np. patyczka, który ułatwi trzymanie ramki w ręce.



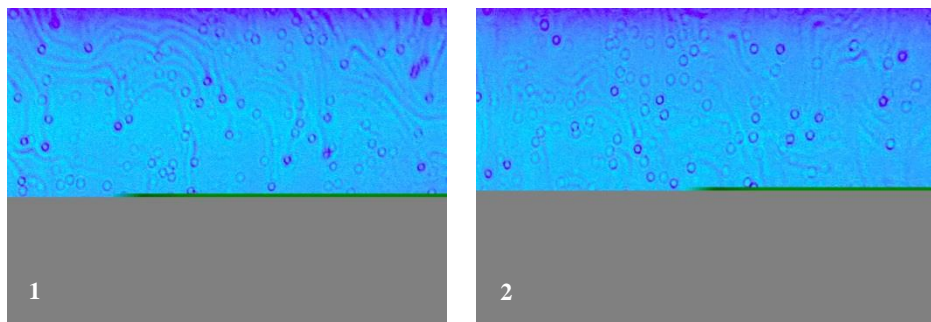
Rys. 3. Układ do wizualizacji dynamiki błon z zastosowaniem lasera; 1 – wskaźnik laserowy, 2 – ekspander wiązki, 3 – błona mydlana, 4 – ramka z drutu, 5 – uchwyt ramki, 6 – ekran, 7 – obraz błony

Błone mydlaną wytwarzamy w powszechnie znany sposób, przez zanurzenie poziomo trzymanej ramki w roztworze wody z mydłem lub detergentem (płynem do mycia naczyń lub do prania) i jej powolne wyjęcie. Zamiast wykonywać ramkę, można wykorzystać gotowy pierścień albo pętlę od zabawki do puszczania baniek. Profesjonalnie nazywany ekspander wiązki laserowej to po prostu tulejka o odpowiednio dobranej średnicy, która została nasunięta na końcówkę wskaźnika laserowego, rys. 4. W tulejce osadzona jest dowolna soczewka – skupiająca albo rozpraszająca, o ogniskowej nieprzekraczającej kilka centymetrów. Soczewka ta powoduje, że wychodząca ze wskaźnika laserowego równoległa wiązka światła po przejściu przez nią staje się wiązką rozbieżną. Umożliwia to oświetlenie spójnym i monochromatycznym światłem laserowym całej powierzchni błony.



Rys. 4. Szczegóły wykonania ekspandera wiązki laserowej; 1 – końcówka wskaźnika laserowego, 2 – tulejka, 3 – soczewka

Warto też wiedzieć, że diody laserowe używane we wskaźnikach nie mają zdolności kolimacji światła i dają wiązkę rozbieżną. Dlatego wszystkie wskaźniki laserowe są wyposażone w soczewkę skupiającą lub układ soczewek, formujących wiązkę równoległą. W niektórych wskaźnikach, zwykle tych o większej mocy, można regulować średnicę wiązki albo wykręcić układ soczewek i wtedy nie trzeba wykonywać ekspandera. W przeciwieństwie do dwóch poprzednio opisanych, układ ze wskaźnikiem laserowym nie wymaga żadnej regulacji położenia elementów i od razu daje wyraźne obrazy. Można go również wykonać bardzo małym nakładem pracy i kosztów. Jedynym ważnym wymogiem jest zachowanie ostrożności podczas używania wskaźnika laserowego i niekierowanie wiązki w stronę widzów lub przedmiotów odbijających światło. Przykłady obrazów otrzymanych tą metodą za pomocą wskaźnika laserowego, emitującego światło niebieskie o długości fali 450 nm, przedstawiają fot. 1, 2.



Fot. 1, 2. Przykłady obrazów błon mydlanych uzyskane za pomocą układu przedstawionego na rys. 3

Podobnie jak w poprzednio opisanych układach, obserwowane obrazy w tym przypadku wytwarzane są dzięki dyfrakcji i interferencji światła na niewidocznych gołym okiem niejednorodnościach błon mydlanych. Obrazy te są dynamiczne i uwidaczniają tworzące się przypadkowo w błonach wiry oraz zmiany ich grubości, które w końcu powodują pęknięcie błon. Na te efekty można łatwo oddziaływać przez zmianę kąta nachylenia ramki lub delikatne ruchy posuwiste. Pojawiające się wówczas w układzie odniesienia związanym z błoną siły bezwładności powodują przepływy cieczy i zmiany obrazu. Istotny wpływ na czas obserwacji obrazów ma skład roztworu, używanego do wytwarzania błon. Stosując np. roztwory, zawierające domieszkę cukru i gliceryny można uzyskać trwałe błony, które pozwolą na obserwację efektów na tej samej błonie w czasie kilku minut [6]. Zastosowanie spójnego światła laserowego znakomicie ułatwia otrzymanie obrazów przez bezpośrednie oświetlenie błony. Można się o tym przekonać kierując na błonę światło niespójne, np. z latarki. Nie zauważymy wówczas obrazów obserwowanych poprzednio.

Dwa pierwsze z opisanych w tym artykule zestawów doświadczalnych stanowią adaptację znanych układów do tzw. fotografii cieniowej albo smugowej (niem. *Schlieren Photography*), stosowanej m.in. do badania konstrukcji lotniczych czy wentylacji budynków [7]. Trzecie doświadczenie to pomysł autora artykułu – być może nie jest rewelacyjny, ale ma pouczającą historię. Do jego realizacji przyczyniła się ulubiona przez genetyków... muszka owocowa (łac. *Drosophila Mealnogaster*). Podczas V Szkoły Polskiego Oddziału Europejskiego Towarzystwa na rzecz Edukacji Astronomicznej w Stuposianach świetnie sprawdzał się niebieski wskaźnik laserowy. Był używany zarówno na wykładach jak i w czasie nocnych obserwacji nieba, służąc do wskazywania obiektów astronomicznych. W jedną z letnich nocy światło wskaźnika i konsumowane przez jego właściciela jabłko zwabiło wspomnianą muszkę. Owad wpadł do otworu wyjściowego i osiadł na soczewce formującej wiązkę. Ponieważ pomysłowi i oszczędni Chińczycy zrobili ten element optyczny nie ze szkła, ale

z plastiku, to nieszczęsna muszka po pochłonięciu energii wiązki wtopiła się w ten materiał. Skutkiem tego wskaźnik przestał spełniać swoją dotychczasową rolę. Jego właściciel wymontował zniszczoną soczewkę i zaczął nim oświetlać różne przedmioty, m.in. błonki mydlane. Okazało się, jak to często bywa, że o wykonaniu interesującego doświadczenia zdecydował przypadek, który jednak sprzyja tylko tym, którzy potrafią go wykorzystać.

### Literatura

- [1] H. Feichtinger, Mikrokomputery, *Poradnik*, WKiŁ, Warszawa 1988, 480.
- [2] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *Feynmana wykłady z fizyki*, t. I, cz. 2, PWN, Warszawa 1969, 32.
- [3] S. Szceńkowski, *Fizyka doświadczalna*, cz. II, *Ciepło i fizyka drobinowa*, PWN, Warszawa 1964, 139.
- [4] L.D. Landau, E.M. Lifszyc, *Fizyka teoretyczna, Hydrodynamika*, PWN, Warszawa 1994, 67.
- [5] B. Średniawa, *Hydrodynamika i teoria sprężystości*, PWN, Warszawa 1977, 112.
- [6] T. Dryński, *Doświadczenia pokazowe z fizyki*, PWN, Warszawa 1964, 126.
- [7] <https://www.halton.com/pl>