

Interferencja fullerenów

Paweł Tomasz PĘCZKOWSKI*

Wstęp

Wkrótce po ogłoszeniu teorii falowej natury materii przez de Broglie'a w 1924 roku zostało przeprowadzonych wiele eksperymentów ją potwierdzających: dla elektronu (Davisson, Germer, 1927), atomu i cząsteczki wodoru (Estermann, Stern, 1930) i neutronu (v. Haban Jnr, Preiswerk). Znacznie później wykonano interferencyjny eksperyment Younga z dwiema szczelinami: dla elektronów (Jönsson, 1974), dla neutronów (Zeilinger ze współpracownikami, 1988), dla atomów (Carnal, Mlynek, 1991), dla małych cząsteczek np. I_2 (Schöllkopf, Toennies, 1994) i gazów szlachetnych (Schöllkopf, Toennies, 1996).

Opierając się na tych historycznych eksperymentach, zadajemy sobie pytanie, dla jak dużych cząsteczek można zaobserwować interferencję. W ostatnich latach przeprowadzono eksperymenty z prawie makroskopowymi obiektami: z fullerenami C_{60} i C_{70} . Były one bardzo trudne do przeprowadzenia, gdyż cząsteczkom o dużej masie odpowiadają krótkie fale de Broglie'a.

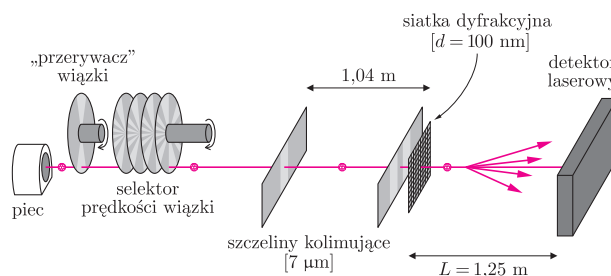
Fullereny

Fullereny są, obok grafitu i diamentu, alotropową odmianą węgla. Są to cząsteczki węgla zawierające od kilkudziesięciu do kilkuset atomów tego pierwiastka. Tworzą one zbliżoną do kuli strukturę złożoną z pięciokątów i sześciokątów foremnych (rys. 1). Najlepiej zbadaną strukturą jest cząsteczka C_{60} złożona z 60 atomów węgla. Cząsteczki te mają średnicę nieco większą od 1 nm. Cząsteczki C_{60} mają symetryczną strukturę i dzięki temu są niezwykle trwałe (istnienie bardzo trwałych cząsteczek, powstających ze zwiniętych płaszczyzn grafitu przewidział już w 1966 r. David E. H. Jones). Również trwałe są cząsteczki C_{70} przypominające swym kształtem piłkę do rugby (tzn. piłkę w kształcie wrzeciona). Największym znanym fullerenem jest cząsteczka C_{960} .

Fullereny po raz pierwszy zostały zaobserwowane w 1985 roku przez H.W. Kroto z Uniwersytetu w Sussex w Wielkiej Brytanii oraz R.E. Smalleya i R.F. Curla z Uniwersytetu Rice w Stanach Zjednoczonych. Odkrycie to zostało uhonorowane Nagrodą Nobla w 1996 r. Nazwa *fullereny* pochodzi od nazwiska amerykańskiego konstruktora, budowniczego i matematyka, R. Buckminstera Fullera, który konstruował kopuły przypominające fragment cząsteczki C_{60} .

Eksperyment interferencyjny z fullerenami

Można zastanawiać się, czy złożoność wewnętrzna fullerenów nie zniszczy ich zachowania kwantowego. Opisany tutaj eksperyment przeprowadzili: O. Nairz, M. Arndt i A. Zeilinger z Uniwersytetu Wiedeńskiego (2002). Schemat układu eksperymentalnego jest pokazany na rysunku 2.



Rys. 2. Układ doświadczalny eksperymentu z interferencją fullerenów.

Układ przypomina standardowe doświadczenie Younga z dwiema szczelinami. Podobnie jak w tym historycznym doświadczeniu układ zawiera cztery elementy: źródło wiązki, kolimator, siatkę dyfrakcyjną i detektor.

Aby doprowadzić proszek fullerenowy do stanu gazowego, ogrzewa się go w piecu ceramicznym w temperaturze około $T = 900$ K w celu wywołania sublimacji.

Rys. 1. Struktura przestrzenna fullereny C_{60} .

* Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski

Ciśnienie pary jest wtedy dostatecznie duże, żeby kolejno wyrzucić cząsteczki przez małą szczelinę w piecu. Rozkład prędkości cząsteczek ma średnią $v = 200$ m/s i dyspersję $\frac{\Delta v}{v} \approx 60\%$. Aby obliczyć oczekiwane położenie dyfrakcyjnego wzmocnienia sygnału, musimy znać długość fali de Broglie'a cząsteczki (λ). Jest ona dana wzorem $\lambda = \frac{h}{mv}$, gdzie mv oznacza pęd cząsteczki, a h jest stałą Plancka. Masa cząsteczki C₆₀ wynosi $m = 1,2 \cdot 10^{-24}$ kg, co pozwala oszacować średnią długość fali $\lambda = 2,8 \cdot 10^{-12}$ m. Interesujące jest też porównanie długości fali de Broglie'a cząsteczki fullerenu z jej rozmiarem. Średnica cząsteczki wynosi około 10^{-9} m, czyli około 350 razy więcej niż długość fali de Broglie'a λ . Ponieważ długość fali de Broglie'a fullerenu jest mała w stosunku do wielkości obiektu, należy zastosować odpowiedni układ doświadczalny, aby zjawisko interferencji mogło być wykryte.

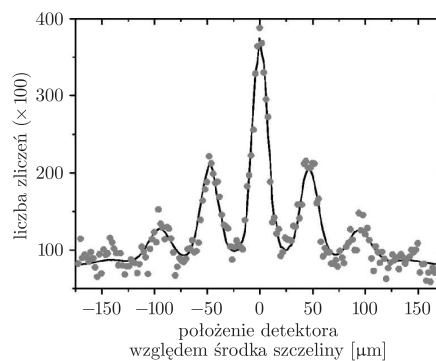
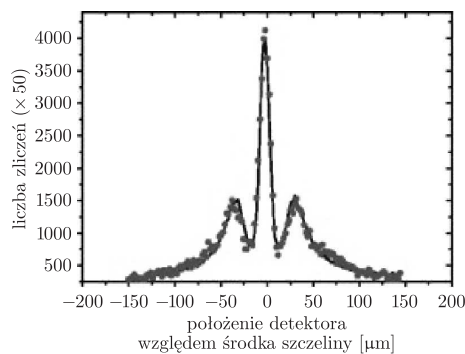
Jako układu uginającego wiązkę użyto siatki zbudowanej z azotku krzemu o stałej sieci $d = 10^{-7}$ m mającej otwory szerokości $s = (55 \pm 5) \cdot 10^{-9}$ m.

W odległości $L = 1,25$ m za siatką dyfrakcyjną został umieszczony detektor. Można wyznaczyć, jaki jest odstęp między dwoma maksimami, obliczając kąt ugięcia fali Θ jako iloraz długości fali λ i stałej siatki dyfrakcyjnej d :

$$\Theta = \frac{\lambda}{d} = \frac{2,8 \cdot 10^{-12} \text{ m}}{10^{-7} \text{ m}} = 28 \text{ } \mu\text{rad}.$$

Odległość między dwoma maksimami w detektorze wynosi $L \cdot \Theta = 1,25 \text{ m} \cdot 28 \text{ } \mu\text{rad} = 35 \cdot 10^{-6}$ m. Tak mała odległość między prążkami interferencyjnymi wymaga detektora o bardzo wysokiej rozdzielczości. W eksperymencie zastosowano detektor laserowy. Wszystkie cząsteczki fullerenów, które przechodzą przez wiązkę laserową, zostają ogrzane do temperatury ponad 3000 K i ulegają zjonizowaniu. Dodatkowo jony fullerenów są następnie przyspieszane w kierunku elektrody, z której wybijają elektrony. Te elektrony są zliczane.

Doświadczenie wymaga zapewnienia spójności wiązki fullerenów. Spójność przestrzenna została wymuszona przez pokazany na rysunku 2 układ kolimatorów. Pod uwagę musi być wzięta również spójność widmowa źródła, ponieważ cząsteczki z różnymi prędkościami (a zatem z różnymi długościami fali) powodują rozmycie obrazu dyfrakcyjnego. Żeby zobaczyć prążki interferencyjne wyższych rzędów, trzeba zwiększyć spójność widmową, a zatem zmniejszyć szerokość rozkładu prędkości cząsteczek. W tym celu tuż za piecem umieszczono mechaniczny selektor prędkości. Składał się on z czterech obracających się na wspólnej osi dysków ze szczelinami. Przez selektor przechodziły tylko cząsteczki o takich prędkościach, które odpowiadały przejściu przez tarcze w momencie, gdy na drodze znajdowała się szczelina. Zmieniając prędkość rotacji dysków selektora, można uzyskać transmisję cząsteczek o pożądanej prędkości. Żeby ograniczyć dyspersję czasu lotu cząsteczek, wiązka fullerenów była „siekana” (przez „przerwywacz wiązki”) tuż za źródłem. Dzięki zastosowaniu selektora prędkości w doświadczeniu uzyskano średnią prędkość cząsteczek 117 m/s (co odpowiada długości fali de Broglie'a $4,6 \cdot 10^{-12}$ m) i dyspersję $\frac{\Delta v}{v} \approx 17\%$. Jest oczywiste, że zwiększenie długości fali prowadzi do lepszej separacji pików dyfrakcyjnych, co można zobaczyć, porównując rysunki 3 i 4.



Rys. 3. Obraz dyfrakcyjny dla prędkości 200 m/s. Rys. 4. Obraz dyfrakcyjny dla prędkości 117 m/s.



Wyniki interferencji mogą być wyjaśnione przez standardową teorię dyfrakcji Kirchhoffa dla siatki o stałej 10^{-7} m. Bierzymy pod uwagę szerokość kolimatora i doświadczalnie wyznaczamy rozkład prędkości. Parametry potrzebne do szacowania to: szerokość kolimatora, szerokość otworów siatki dyfrakcyjnej, szerokość promienia lasera, czynnik skalujący. Na obu rysunkach kółeczka oznaczają dane eksperymentalne, a linia ciągła oznacza wynik symulacji komputerowej modelu opartego na teorii dyfrakcji Kirchhoffa–Fresnela.

Wnioski

Obserwacja interferencji kwantowej fullerenów jest interesująca z wielu powodów. Występowanie tego zjawiska oznacza, że możliwe jest uzyskanie obrazu interferencyjnego dla pojedynczej cząsteczki, oddzielonej od innych cząsteczek. Granica wielkości obiektu, dla którego można potwierdzić eksperymentalnie zasady kwantowe, jest wciąż sprawą otwartą. Byłoby interesujące zbadać interferencję obiektów o rozmiarach takich samych lub nawet większych niż struktura dyfrakcyjna. Analogiczne metody do opisanych mogą być użyte do badania interferencji kwantowej większych molekuł, aż do małych wirusów.

Literatura

- [1] A. Huczko, *Fullereny. Nobel za węglowe piłeczki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2000.
 [2] P. Yam, *Ojciec fullerenów [Sylwetka: Richard E. Smalley]*, Świat Nauki, listopad 1993.
 [3] *Nagrody Nobla 1996*, Świat Nauki, marzec 1997.
 [4] O. Nairz, M. Arndt, A. Zeilinger, *Quantum interference experiments with large molecules*, Am. J. Phys. **71** (4), April 2003.



Zadania

Redaguje Waldemar POMPE

M 1111. Z punktu P leżącego na zewnątrz okręgu o środku O poprowadzono dwie styczne PA i PB (rys. 1). Przez punkt M leżący na odcinku AB poprowadzono prostą prostopadłą do prostej OM i przecinającą proste AP i BP odpowiednio w punktach C i D . Wykazać, że $CM = DM$.

Rozwiązanie na str. 10

M 1112. Udowodnić, że jeśli liczby a, b, c, d, e są dodatnie, to

$$\frac{a}{e+a+b} + \frac{b}{a+b+c} + \frac{c}{b+c+d} + \frac{d}{c+d+e} + \frac{e}{d+e+a} < 2.$$

Rozwiązanie na str. 12

M 1113. Punkty E i F leżą odpowiednio na bokach AB i BC kwadratu $ABCD$, przy czym $BE = BF$ (rys. 2). Punkt S jest rzutem prostokątnym punktu B na prostą CE . Wykazać, że $\sphericalangle DSF = 90^\circ$.

Rozwiązanie na str. 13

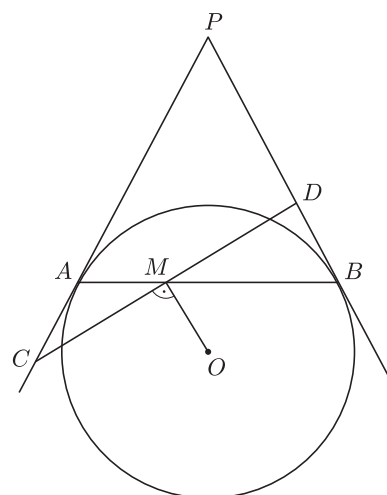
Redaguje Mikołaj KORZYŃSKI

F 653. Idealna chłodziwa działająca za pomocą odwróconego cyklu Carnota ma stałą w czasie moc (tzn. ilość pobieranej ze źródeł zewnętrznych energii w jednostce czasu) równą P . Ochładza ona ciało o pojemności cieplnej C , stałej w rozpatrywanym przedziale temperatur, oddając ciepło do otoczenia. Chłodziwa zaczyna działanie, gdy chłodzone ciało ma temperaturę otoczenia T_1 . Jaka będzie szybkość spadania temperatury ciała w momencie, gdy spadnie ona do $T < T_1$?

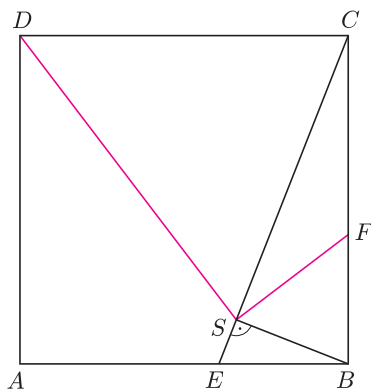
Rozwiązanie na str. 6

F 654. Rozpatrzmy idealną chłodziwą z poprzedniego zadania. Przypuśćmy, że izolacja cieplna między ciałem i otoczeniem nie jest doskonała i skutkiem tego z otoczenia do ciała przepływa cały czas ciepło. Ilość tego ciepła w jednostce czasu jest proporcjonalna do różnicy temperatur między nimi i wynosi $\kappa(T_1 - T)$. Do jakiej najniższej temperatury jest w stanie ochłodzić ciało ta chłodziwa?

Rozwiązanie na str. 7



Rys. 1



Rys. 2