



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Wydział Fizyki,
Astronomii
i Informatyki
Stosowanej

II Pracownia
Fizyczna

XXIII Studencka Sesja Plakatowa

31.05-04.06.2021

plakat nr

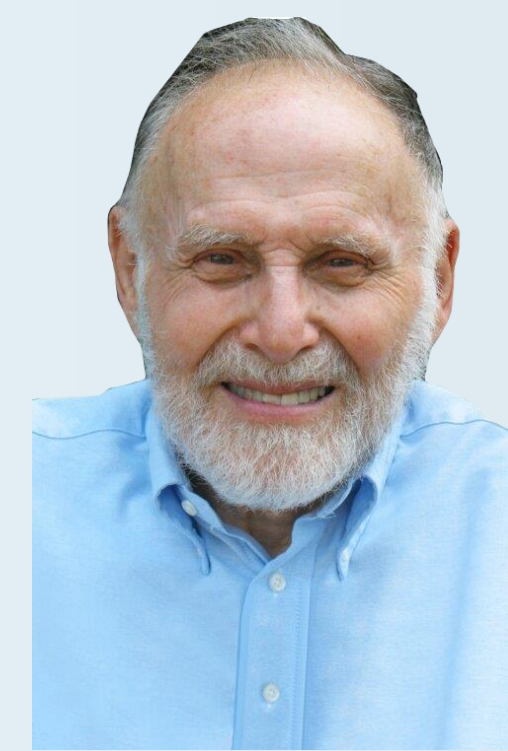
3

autor:
Milena Czubak

opiekun:
dr
Tadeusz Pałasz

SZCZYPCE OPTYCZNE

Lata 60. XX wieku, za sprawą Arthura Ashkina, stały się początkiem badań oddziaływania światła na małe cząstki. Jak zauważono, wiązka fotonów wywierała siłę rozpraszającą, przyspieszającą cząstkę, ale także siłę gradientową, która wciągała ją w obszar o większym natężeniu światła. Poczynione obserwacje pozwoliły na zbudowanie szczypiec optycznych. Znalazły one szerokie zastosowanie w naukach fizycznych i biologicznych ze względu na niesamowitą dokładność pomiaru położenia cząstki rzędu nanometra oraz wywieranych na nią sił rzędu pikoniutona. Za swoje odkrycie, w 2018 roku Arthur Ashkin otrzymał Nagrodę Nobla.



Arthur Ashkin
(1922-2020)

Matematyczny opis działania

- **Przybliżenie optyki geometrycznej ($r \gg \lambda$)**

Opisuje zjawiska załamania i odbicia światła na cząsteczkach.

- **Przybliżenie dipolowe Rayleigha ($r \ll \lambda$)**

Przyjmujemy, że cząstka znajduje się w jednorodnym polu elektrycznym fali, przy czym sama nie posiada własnego pola. Średnia siła działająca na cząstkę opisywana jest wzorem, w którym pierwszym człon odpowiada sile gradientowej, natomiast drugi sile rozpraszającej:

$$\mathbf{F} = \frac{\alpha'}{2} \nabla(|\mathbf{E}|^2) + \omega \alpha'' \langle \mathbf{E} \times \mathbf{B} \rangle.$$

- **Teoria rozpraszania Mie ($r \approx \lambda$)**

Wyniki otrzymywane przy użyciu teorii Mie to rozwiązania równania Helmholtza i mają postać nieskończonych szeregów.

Zasada ekwipartycji energii

$$\kappa \sigma^2 = k_B T$$

Energia sputakowanej kuleczki jest równa średniej energii potencjalnej oscylatora harmonicznego.

Siła sprężystości

$$\mathbf{F} = \kappa \mathbf{x}$$

κ – współczynnik sprężystości

Współczynnik konwersji

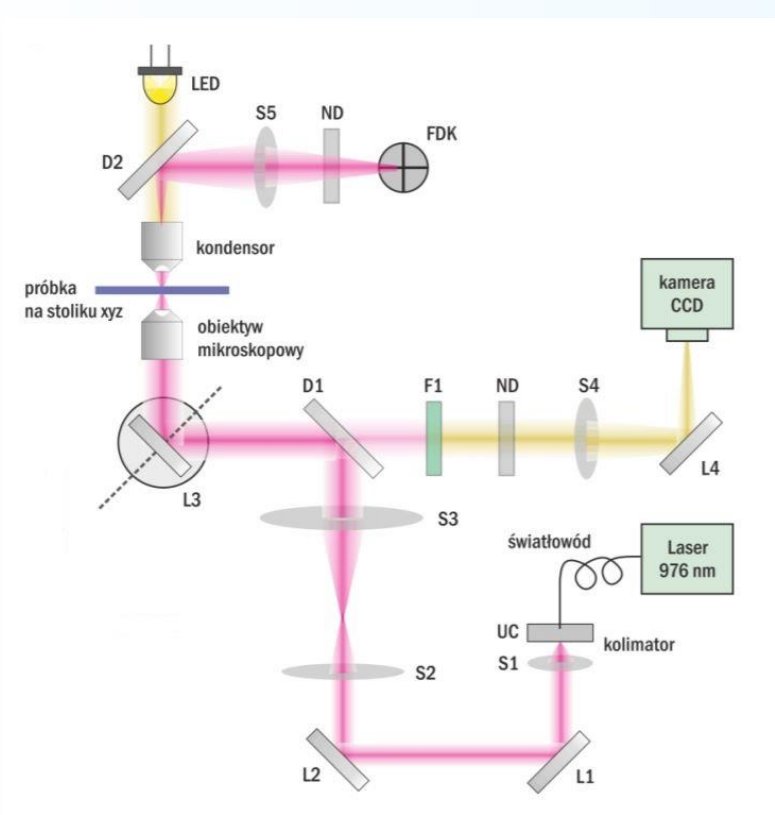
$$\xi = 0.35 \pm 0.12 \frac{\mu\text{m}}{\text{V}}$$

Siła lepkości

$$\mathbf{F} = -6\pi\eta r \mathbf{v}$$

η – współczynnik lepkości cieczy

Układ doświadczalny



Schemat układu szczypiec optycznych (nadal trwają prace nad jego ulepszeniem).

Poszukiwania i chwywanie kuleczek odbywało się blisko dna szalki Petriego.

Kuleczki wykorzystane

w doświadczeniu mają średnicę 1 μm .

Najważniejszym elementem szczypiec optycznych jest laser diodowy emitujący promieniowanie ciągłe o długości fali 976 nm i mocy do 300 mW.

Zwierciadło L3 kieruje wiązkę do góry na obiektyw mikroskopowy, który skupia ją tworząc pułapkę, a światło rozproszone na cząstce i przechodzące jest zbierane przez kondensor i kierowane na fotodiode kwadrantową. Szczypce pracują w układzie mikroskopu odwróconego, ponieważ pozwala to na utworzenie układu, w którym kuleczki grawitacyjnie kierują się w stronę powierzchni szkiełka nakrywkowego lub dna szalki Petriego.

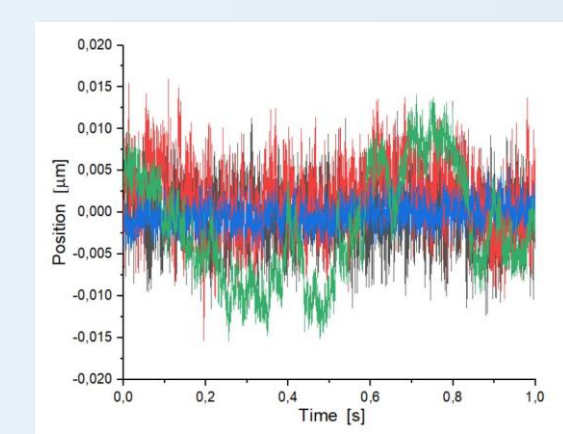
Pomiar sztywności pułapki z dopasowania profilu Lorentza

Nałożono na siebie widma, po dwa dla osi x i y dla wybranych natężeń. Następnie wykonano transformatę Fouriera oraz dopasowanie:

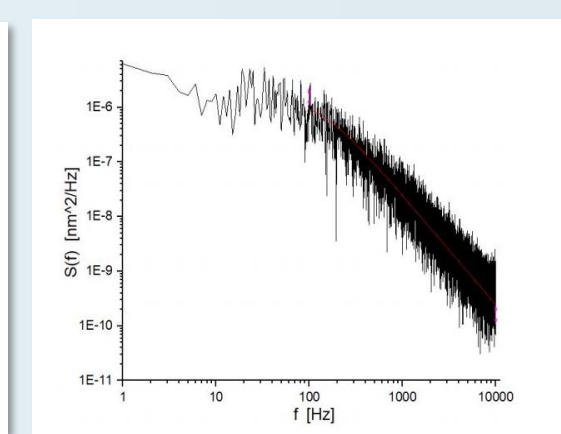
$$y = \frac{A}{B^2 + x^2}$$

Parametr B opisuje częstotliwość odcięcia:
 $B = f_0$.

Natomiast częstotliwość odcięcia:
 $f_0 = \frac{\kappa}{2\pi\gamma}$



Przebieg zarejestrowany w funkcji czasu nałożonych na siebie widm.

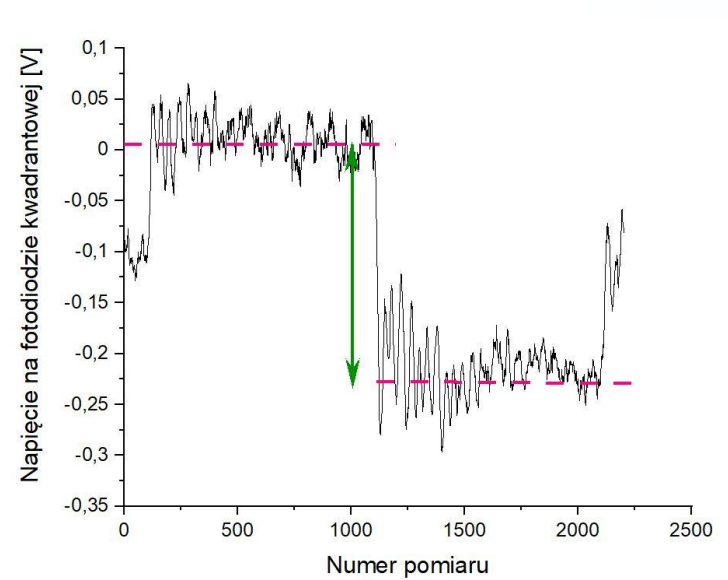


Transformata Fouriera dla natężenia 104 mW.

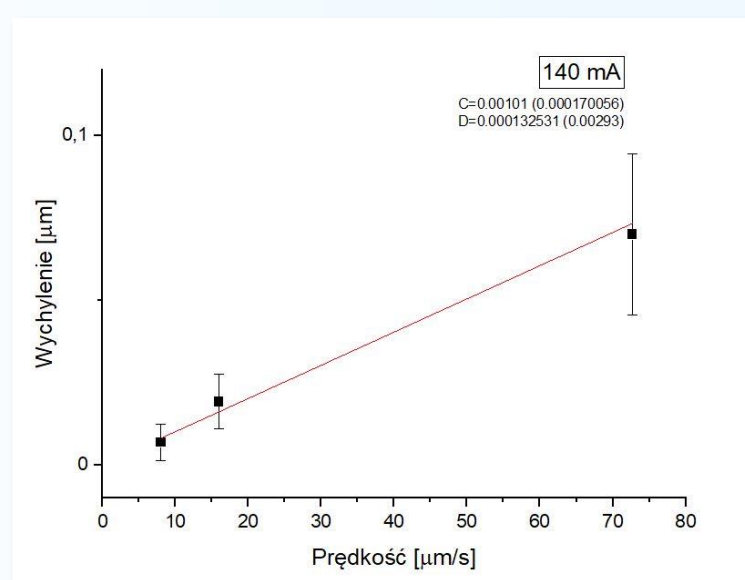
Sztywność pułapki wyznaczona tą metodą jest w zakresie 0.0075 - 0.015 $\frac{\text{pN}}{\text{nm}}$.

Wartość ta odbiega od rezultatów uzyskanych innymi metodami. Źródło [3] potwierdza jednak wyniki otrzymane z dopasowania profilu Lorentza, a także małą wiarygodność tego sposobu pomiaru.

Pomiar sztywności pułapki z twierdzenia Stokesa



Wykres odczytanego napięcia na fotodiodzie kwadrantowej. Oznaczony przedział jest wychyleniem kuleczki w momencie zadziałania siły.



Zależność wychylenia z od prędkości v dla natężenia 74 mW.

Wykonano wykresy zależności wychylenia kulki ze środka pułapki od prędkości dla wybranych natężeń. Do każdego wykresu dopasowano prostą:

$$z = C v + D,$$

gdzie z - wychylenie ze środka wiązki, v - prędkość,

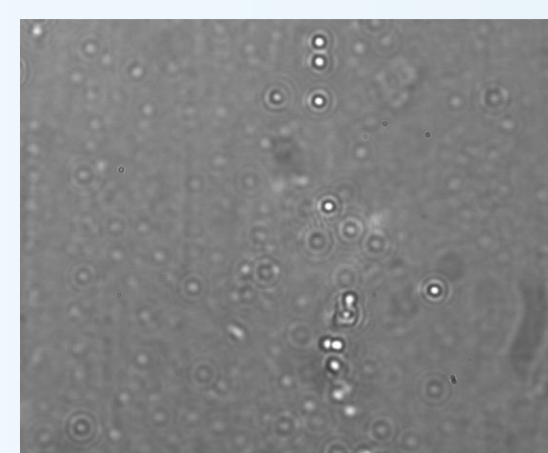
$$C = \frac{6\pi\eta r}{\kappa}$$

Sztywność pułapki wyznaczona tą metodą oscyluje wokół wartości $\kappa \approx 0.1 \frac{\text{pN}}{\text{nm}}$.

Wykonano wykresy różnicy sygnałów, która się pojawiała, a następnie odczytane różnice pomnożono przez współczynnik konwersji.

Ruchy Browna

Chaotyczne ruchy cząsteczek w cieczy lub gazie są rezultatem bombardowania ich przez cząsteczki ośrodka, w którym się znajdują. Na początku XX w. matematyczny opis ruchów Browna podali niezależnie polski fizyk Marian Smoluchowski oraz Albert Einstein. Smoluchowski stwierdził dodatkowo, że za przesunięcia cząsteczek odpowiedzialne jest nie tyle bombardowanie, co fluktuacje ich gęstości w bezpośrednim sąsiedztwie zawiesiny, co pozwoliło, aby Paul Langevin rozwinął dynamikę stochastyczną.



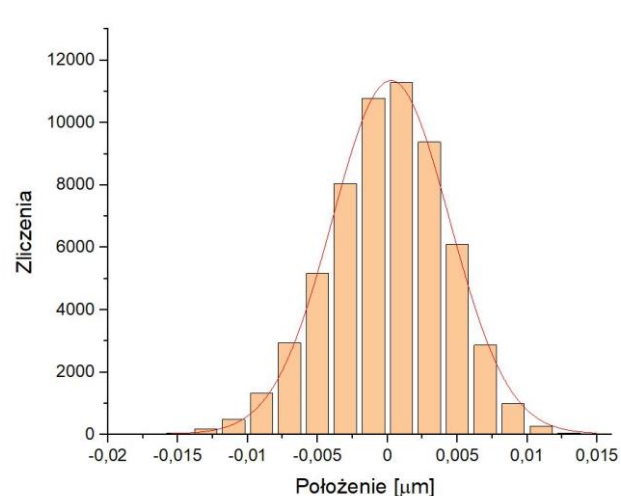
Kuleczki wykorzystane w doświadczeniu w wodzie destylowanej (obraz mikroskopowy).



Marian Smoluchowski
(1872-1917)

Pomiar sztywności pułapki z ekwipartycji energii

Wykonano histogramy liczby zliczeń od położenia kuleczki wykonującej ruchy Browna.



Histogram liczby zliczeń od położenia kuleczki dla natężenia 59 mW.

Do histogramu dopasowano rozkład Gaussa:

$$y = A \exp\left(-\frac{(x-B)^2}{C}\right) + D,$$

gdzie $C = 2\sigma^2$ [μm^2]. Skorzystano z zasady ekwipartycji do wyznaczenia κ .

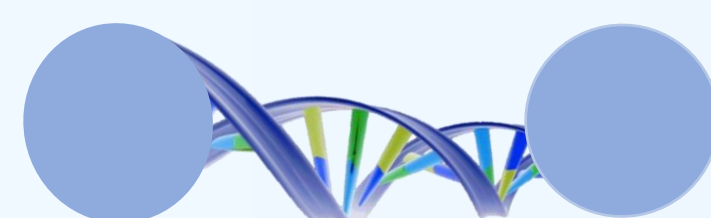
Sztywność pułapki wyznaczona tą metodą jest w zakresie 0.17-0.45 $\frac{\text{pN}}{\text{nm}}$.

Jakie możliwości dają szczypce optyczne?

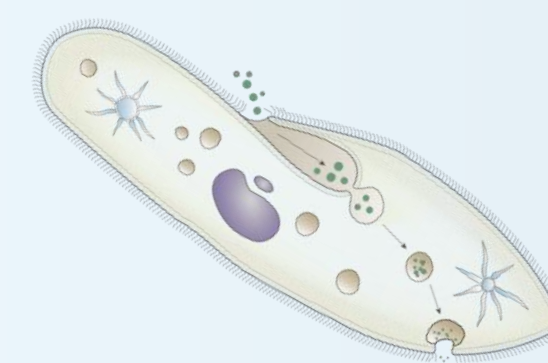
Siły z jaką działają szczypce w dużej mierze zależą od mocy lasera. Przy niewielkiej mocy rzędu 15-30 mW schwymane kuleczki mogą być wybijane przez inne wykonujące ruchy Browna, natomiast przy wysokiej powyżej 80 mW w pułapkę wciągane jest ich kilka.

Z całą pewnością siły te przewyżniają ruchy Browna, ale nie są w stanie pułapkować cząstek większych od 20 μm .

Dla przykładu rozmiar pantofelka to średnio około 300 μm . Rozmiar bakterii mieści się w zakresie od 0.17 do 750 μm , wirusy są znacznie mniejsze.



Do kulek dielektrycznych przykleja się zmodyfikowaną przez biotynę helisę. Kiedy jedna z kulek zostanie unieruchomiona, naukowiec chwytając szczypcami optycznymi za drugą, mogą np. rozplątać łańcuch.



Pantofelek, czyli protist zwierzęcy. Jego rozmiar nie pozwala na pułapkowanie go szczypcami optycznymi.

Szerokie zastosowanie szczypce optyczne znalazły w medycynie, gdzie znaczące było to, że wywierane siły są nieinwazyjne i pozwalają na badanie takich struktur jak nici DNA lub bakterie. Zastosowano je w badaniach nad komórkami nowotworowymi.

Bibliografia

- [1] Instrukcja do ćwiczenia Z54 (www.2pf.if.uj.edu.pl)
- [2] A. Ashkin, „Acceleration and trapping of particles by radiation pressure”, Phys. Rev. Lett. 24, 156 (1970)
- [3] D. C. Appleyard, K. Y. Vandermeulen, H. Lee, M. J. Lang, "Optical trapping for undergraduates", American Journal of Physics 75 (1), 5-14 (2007)
- [4] M. Smoluchowski, „Zur kinetischen Theorie der Brownschen Molekularbewegung und der Suspensionen”, Ann. Phys. 21, 756-780 (1906)
- [5] www.kwantowo.pl/2018/10/03/nobel-za-laserowa-pesete-krotko-i-niezbyt-przejrzyscie/