

## Świetlny nano-wiatraczek

Pierwszy świetlny wiatraczek zbudował Sir William Crookes. Skrzydełka wiatraczka były z jednej strony pocernione, z drugiej posrebrzone, a całość zamknięta w bańce szklanej. Po oświetleniu (lub zbliżeniu do źródła ciepła, czyli wstawieniu w strumień podczerwieni) wiatraczek obracał się, uciekając czarną stroną od promieniowania, tym szybciej, im większa była intensywność strumienia energii.

Wynalazcy wydawało się początkowo, że urządzenie dowodzi realności pędu niesionego przez falę elektromagnetyczną, efektu wynikającego z równań Maxwella. Sam James Clerk Maxwell, który referował pracę Crookesa, zaakceptował to błędne wyjaśnienie. Nie może ono być prawdziwe, bo choć pocerniona strona pochłania światło, to posrebrzona go odbija, więc zmiana pędu powinna być dla niej jeszcze większa, a więc wiatraczek powinien obracać się w przeciwną stronę. Prawidłowe wyjaśnienie podał sześć lat później Osborne Reynolds [1]. W przedłożonej, ponad stustronicowej pracy, przekonywał, że jest to, jak sam je nazwał, zjawisko *transpiracji cieplnej*. Powoduje ono przedostawanie się cząsteczek gazu poprzez porowatą nieruchomą membranę (lub dokoła brzegu skrzydełka w przypadku młynka Crookesa) ze strony o niższej temperaturze na stronę o temperaturze wyższej. W przypadku skrzydełka powoduje to jego obrót w kierunku strony chłodniejszej. Reynolds zamieścił w swojej pracy bogaty materiał doświadczalny oraz model teoretyczny oparty na kinetycznej teorii gazu, twierdząc (i słusznie), że zjawisko to jest dowodem na słuszność atomowej budowy materii. W pracy jest również opisany poglądowy model (z zastrzeżeniem, że nie stanowi on części dowodu). W modelu tym (w jednym z jego aspektów) wzajemnie ostrzeliwiają się dwie baterie ziemne umieszczone na jednej, mogącej się poruszać, platformie. Jedna z baterii strzela pociskami o większym pędzie, ale, dopóki wszystkie pociski grzęzną w przeciwległym wale ziemnym, platforma nie doznaje żadnej zmiany pędu. Ta zmiana pojawia się dopiero wtedy, gdy część pocisków nie trafia w przeciwległy wał ziemny, czyli po uwzględnieniu skończonych rozmiarów baterii. Wtedy platforma doznaje średniego odrzutu tak, że strzelająca mocniej strona się cofa. Kluczowym w rachunkach Reynoldsa jest pojęcie średniego zasięgu (którego nie należy mylić ze średnią drogą swobodną), pozwalające na prawidłowe uwzględnienie efektów na styku gaz-ciało stałe.

Co ciekawe, pracę tę również recenzował Maxwell i jeszcze przed jej ukazaniem się opublikował własną [2], wraz z dodatkiem, w którym, co prawda, uznał pierwszeństwo Reynoldsa, ale argumentował równocześnie, że opracowana przez niego sama metoda jest lepsza.

Jak widać, wykazanie bezpośredniego wpływu pędu fali elektromagnetycznej na makroskopowe objekty, nie mówiąc już o jego wykorzystaniu, nie jest takie proste. A chciałoby się użyć nie tylko samego pędu, lecz i momentu pędu, zwłaszcza do manipulowania DNA, czy w urządzeniach nanoelektromechanicznych, gdyż właśnie w tak małej skali problemy zasilania i sterowania blokują rozwój nanotechnologii.

Podstawową trudnością jest słabe sprzężenie między światłem a materią, które wymagało do tej pory użycia co najmniej mikrometrowych lub nawet milimetrycznych rozmiarów mikromotorków w celu uzyskania użytecznej wartości momentu siły.

Sytuacja zmieniła się wraz z opublikowaniem pracy [3]. Autorzy opisują w niej efekt obracania mikrometrowych rozmiarów płytki za pomocą nanometrowych rozmiarów wiatraczka zasilanego i sterowanego liniowo spolaryzowanym światłem w zakresie widzialnym i w bliskiej podczerwieni. Sekret polega na wykorzystaniu plazmonowego rezonansu, który wielokrotnie wzmacnia siłę oddziaływania światła z materią. Plazmony to kwazicząstki, które można interpretować jako skwantowane kolektywne wzbudzenia plazmy, w tym przypadku praktycznie dwuwymiarowego gazu elektronowego.

Wiatraczek ma kształt tetra-gammadionu (zwanego przez Prasłowian swargą, ale najbardziej zożydzonego jako swastyka, która to nazwa stała się kulturowym oksymoronem – wywodzi się przecież od sanskryckiego „przynoszący szczęście”). We wszystkich używających go starożytnych kulturach znak ten był jednym z symboli Słońca.

Symetryczny lewoskrętny tetra-gammadion o grubości 30 nm i rozmiarze 100 nm został wytworzony ze złota między dwiema krzemowymi, kwadratowymi płytkami o grubości 300 nm i boku 2200 nm. Cały obiekt został umieszczony w wodzie, a następnie był oświetlany z góry. Użycie dużej (jak na nanotechnologię) płytki pozwalało na pominięcie efektów związanych z ruchami Browna.

Układ ma dwie częstości rezonansowe. Światło o długości około 810 nm generuje plazmony prawoskrętne, co, ze względu na zasadę zachowania momentu pędu, powoduje obracanie się płytki w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, natomiast światło o długości fali około 1700 nm wywołuje obracanie się płytki w kierunku przeciwnym. Umieszczenie kilku gammadionów w jednej płytce krzemowej powoduje prawie proporcjonalny wzrost prędkości obrotu. Prędkość ta jest jednocześnie proporcjonalna do intensywności oświetlenia.

Właśnie zmiana kierunku obrotu ze zmianą długości fali jest traktowana jako niezaprzeczalny dowód napędzania płytki światłem. Przy okazji warto zwrócić uwagę, że światło padające nie niesie niezerowego momentu pędu (światło reemitowane już tak), więc jest to nie tylko zamiana energii świetlnej na mechaniczną, lecz jednocześnie zamiana ruchu postępowego na obrotowy, czyli rodzaj przekładni. A sam wiatraczek, o ponad rząd wielkości mniejszy od długości fali światła, obraca płytkę większą trzy rzędy wielkości.

Piotr ZALEWSKI

- [1] Osborne Reynolds, *On certain Dimensional Properties of Matter in the Gaseous State*, Phil. Trans. R. Soc. Lond. **170** (1879) 727–845.
- [2] James Clerk Maxwell, *On Stresses in Rarefied Gases Arising from Inequalities of Temperature*, Phil. Trans. R. Soc. Lond. **170** (1879) 231–256.
- [3] M. Liu, T. Zentgraf, Y. Liu, G. Bartal i X. Zhang, *Light-driven Nanoscale Plasmonic Motors*, Nature Nanotechnology, 4 lipca 2010, publikacja elektroniczna: [nano.2010.128](http://nano.2010.128).