

## Aktualności (nie tylko) fizyczne

Dwa lata temu w towarzyskim meczu z Francją znany brazylijski piłkarz, Roberto Carlos, wykonał rzut wolny stulecia. Wydawało się, że kopnięta bardzo mocno piłka opuści boisko w dużej odległości od bramki. Ci, co oglądali mecz, zgodnie twierdzili, że piłka po minięciu muru francuskich zawodników jak zaczarowana zakręciła prosto do siatki. Dokładna, poklatkowa analiza tego strzału pozwoliła na wyjaśnienie zagadki [1]. Zawodnik nadał piłce bardzo dużą prędkość liniową (około 110 km/h) i obrotową (około 10 obrotów na sekundę). Początkowo opływ powietrza wokół piłki był turbulentny, więc poruszała się ona prawie po linii prostej. Jednak po około 10 metrach (czyli zaraz po minięciu muru) prędkość piłki spadła na tyle, że przepływ powietrza stał się laminarny i wirująca piłka zaczęła zakręcać, udając zdalnie kierowany pocisk.

Dlaczego więc nikt nie próbuje strzelać w taki sposób? Owszem, wielu próbuje, ale to nie takie proste. Tak udane uderzenie zdarza się bardzo rzadko. Mocny strzał jest zawsze obarczony dużą dozą niepewności.

Zaraz, zaraz, gdzie to my jeszcze mamy niepewność. Aha, w mechanice kwantowej. Co prawda nie jest to niepewność, tylko nieoznaczoność (to naprawdę nie to samo). Zastanówmy się jednak, czy taka nieoznaczoność kwantowa pogarsza sytuację piłkarza. Dla poruszającego się obiektu nieoznaczoność położenia jest rzędu długości fali de Broglie'a, która dla piłki wynosi około

$$\lambda = \frac{h}{Mv} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{0,5 \text{ kg} \cdot 30 \text{ m/s}} = 44 \cdot 10^{-33} \text{ cm}.$$

Trochę mało. Spróbujmy sobie jednak wyobrazić, co by się stało, gdyby stała Plancka urosła o te 33 rzędy wielkości. Wtedy mur zawodników można by było uznać za ... siatkę dyfrakcyjną, a bramkę za ekran, na którym obserwowalibyśmy obraz interferencyjny. Problem w tym, że z taką stałą Plancka nie byłoby ani piłki, ani obrońców, ani bramkarza. A nawet gdyby to zaniedbać (samolot leci z miasta A do miasta B, opór powietrza zaniedbujemy), to trzeba by było zadbać o to, żeby Przyroda nie dowiedziała się, przez którą przerwę między obrońcami piłka przeleciała. Tylko wtedy możliwa jest interferencja różnych dróg piłki.

A gdyby tak wziąć mniejszą piłkę, np. pingpongową. Nie, to jeszcze nic nie zmienia. Poszukajmy jakiejś dużej liczby. Liczba Avogadra jest całkiem niezła:  $6,02 \cdot 10^{23}$  piłek w molu. To już jest coś. Co mówicie, że idę za daleko? No to chyba macie rację. Od dawna wiadomo, że można zaobserwować interferencję dla pojedynczych atomów. Ale atom to nie piłka do nogi. A co powiecie na taki fulleren  $C_{60}$ . Z geometrycznego punktu widzenia wygląda jak piłka. Tyle samo sześciokątów, tyle samo pięciokątów, w każdym rogu atom węgla. Wtedy dla prędkości  $v = 220 \text{ m/s}$  mamy

$$\lambda = \frac{h}{Mv} = \frac{6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{12 \cdot 10^{-25} \text{ kg} \cdot 220 \text{ m/s}} = 2,5 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 0,0025 \text{ nm}.$$

To dużo czy mało? Nadal raczej mało, bo rozmiary cząsteczki fullereny są rzędu jednego nanometra, czyli jest ona 400 razy większa. To już prawie obiekt makroskopowy.

Można go sobie obejrzyć pod mikroskopem skaningowym [2]. W dodatku ma on wiele stopni swobody związanych z drganiami układu 60 atomów węgla.

Czy taki obiekt może interferować jako całość?

Grupa naukowców z Austrii zamiast dumać postanowiła sprawdzić [3]. Jak łatwo się domyślić, odpowiednio małych graczy nie udało się znaleźć. Uczni musieli zadowolić się samymi piłkami. Z tym już nie było problemu. Po prostu zamówili je w *Dynamic Enterprises Ltd.* z Twyford w Wielkiej Brytanii. (Jak widać, gdyby ktoś sam chciał się takimi piłkami pobawić, to nic nie stoi na przeszkodzie. Niby nie ma w tym nic dziwnego. Fullereny odkryto już 15 lat temu [4], a metodę masowej produkcji wynaleziono 5 lat później [5]. Zastanawiające jest jednak, w ilu miejscach muszą być prowadzone badania nad tymi kuleczkami, skoro oplaca się już po prostu je produkować.)

W każdej dyscyplinie sportu istotna jest rozgrzewka. Fullereny umieszczono w piecyku i podgrzano do temperatury 900–1000 K. (Jak widać, są to bardzo trwałe cząsteczki, skoro takie, a nawet wyższe temperatury im nie szkodzą.) Piłki wylatywały przez otworek w piecyku z (najbardziej prawdopodobną) prędkością 220 m/s. System kolimatorów kierował ich strumień na siatkę dyfrakcyjną (wykonaną nanotechnologicznie z  $\text{SiN}_x$ ) o szerokości szczelin 50 nm i stałej siatki 100 nm, a następnie ich położenie było rejestrowane w systemie detekcyjnym. W wyniku otrzymano obraz interferencyjny z wyraźnie widocznymi prążkami zerowego i pierwszego rzędu [3]. Rozkład intensywności obrazu świetnie zgadza się z przewidywaniem teorii dyfrakcji. Tym samym poprawiono o rząd wielkości stary rekord w dziedzinie obserwacji interferencji kwantowej coraz większych obiektów.

Grupa trenerów kierowana przez selekcjonera, Antona Zeillingera, zastanawia się teraz nad możliwością prowadzenia badań nad zanikaniem interferencji w wyniku zintensyfikowanej obserwacji cząsteczek przechodzących przez siatkę. Oprócz wnikania w podstawy mechaniki kwantowej, interferometria taka może prowadzić do szeregu praktycznych zastosowań, np. w precyzyjnej metrologii czy nanoprodukcji wzorów węglowych na krzemowym podłożu. Autorzy sugerują również, że podobne metody będą mogły być w przyszłości ulepszone w stopniu umożliwiającym obserwację interferencji kwantowej dla obiektów tak dużych jak wirusy. O kotach nie wspominając.

Piotr ZALEWSKI

- [1] T. Asai, T. Akatsuka i S. Haake, *The physics of football*, *Physics World*, czerwiec 1998.
- [2] J.G. Hou, Yang Jinlong, Wang Haiqian, Li Qunxiang, Zeng Changgan, Lin Hai, Bing Wang, D.M. Chen i Zhu Qingshi, *Identifying Molecular Orientation of Individual C<sub>60</sub> on a Si(111)-(7×7) Surface*, *Phys. Rev. Lett.* **83** (1999) 3001, <http://prl.aps.org>
- [3] M. Arndt, O. Nairz, J. Vos-Andreae, C. Keller, G. von der Zouw i A. Zeillinger, *Wave-particle duality of C<sub>60</sub> molecules*, *Nature* **401** (1999) 680.
- [4] H.W. Kroto, J.R. Heath, S.C. O'Brien, R.F. Curl i R.E. Smalley, *C<sub>60</sub>: buckminsterfullerene*, *Nature* **318** (1985) 162.
- [5] W. Krätschmer, L.D. Lamb, K. Fostiropoulos i D.R. Hauffman, *A new form of carbon*, *Nature* **347** (1990) 354.