



Fizyka ping-ponga¹

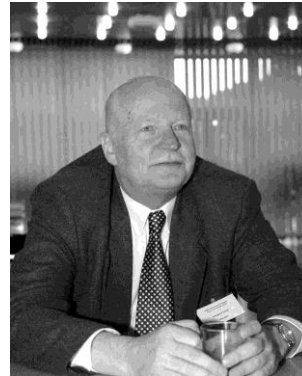
Krzysztof Ernst*, Jarosław Kołodziejczyk**

*Wydział Fizyki, Uniwersytet Warszawski,

**Polski Związek Tenisa Stołowego

1. Wstęp

W każdym sporcie odnaleźć możemy wiele elementów, w których fizyka odgrywa istotną, a czasem wręcz kluczową rolę. Z praw fizyki korzystamy, opisując ruch ciała ludzkiego, odbicie piłki, lot strzały, pociągnięcie wiosła czy stabilność roweru. Rzadko natomiast – jeśli w ogóle – myślimy o fizyce, śledząc widowisko sportowe. Aby ją zauważyć i uświadomić sobie jej rolę, musimy spojrzeć na sport nieco inaczej, niż czynimy to zazwyczaj. Podejmując taką właśnie próbę, skoncentrujemy naszą uwagę na tenisie stołowym, dyscyplinie wszystkim dobrze znanej, bardzo popularnej, a na poziomie wyczynowym niezwykle efektownej. Przyjrzenie się jej przez pryzmat podstawowych praw fizyki pozwoli na dokonanie ciekawych, a często niedostrzeganych skojarzeń i porównań.



Prof. dr hab. Krzysztof Ernst

Mija akurat 75 lat oficjalnie usankcjonowanego, wyczynowego tenisa stołowego, jako że pierwszy międzynarodowy turniej w tej dyscyplinie sportu został rozegrany w Londynie w 1926 roku. Wiele zmieniło się od tego czasu w samej grze, podczas gdy rządzące nią prawa fizyki pozostały oczywiście takie same. Pokażemy, które z nich i dlaczego są dla ping-ponga szczególnie ważne. Spróbujemy również, na wzór trzech fundamentalnych zasad dynamiki, sformułować trzy podstawowe prawa gry w ping-ponga, wynikające bezpośrednio z praw fizyki, a jednocześnie charakterystyczne dla samej gry.

2. Serwis

Gra rozpoczyna się od serwisu. Czołowi pingpongiści mają do perfekcji opanowaną zagrywkę serwisową i nawet doświadczony zawodnik może mieć poważne kłopoty przy odbiorze mocno podkręconej piłki. Musi on wiedzieć, jaki jest kierunek jej rotacji, nie zawsze łatwy do rozszyfrowania. Ruch całej ręki bowiem nie musi być zgodny z ruchem rakiетки w chwili odbicia piłki.

Na czym polega mechanizm wprowadzania piłki w ruch obrotowy w momencie uderzenia jej rakiетką? Rotacja pojawia się dzięki tarcia między okładziną ra-

¹ Artykuł ten ukazał się w zeszycie dodatkowym tomu 53 (2002) *Postępów Fizyki*, zawierającym materiały XXXVI Zjazdu Fizyków Polskich. Wydrukowano za zgodą Autora i Redakcji.

kietki i piłeczką. Występuje ona wtedy, kiedy składowa prędkości rakiety wzdłuż jej powierzchni jest różna od zera. Składowa prostopadła nie nadaje bowiem piłeczce rotacji, a jedynie wprowadza ją w ruch postępowy. Widać zatem, że ułożenie rakiety przy uderzeniu piłki ma decydujący wpływ na to, w jakiej proporcji przekazana piłeczce energia kinetyczna podzielona zostaje na energię ruchu postępowego i obrotowego.

Zastanówmy się teraz, z jaką prędkością piłeczka odbijana jest od rakiety. Zakładamy, rozpatrując uderzenie serwisowe, że jej prędkość początkowa jest równa zero, oraz korzystamy z zasad zachowania pędu i energii. Przed zderzeniem (jest nim właśnie odbicie piłki) tylko rakieta ma pęd i jest on równy Mv . Po zderzeniu pęd rakiety równy jest Mv_1 , a piłeczki mv_p . Ze wspomnianych zasad zachowania (przy założeniu zderzenia sprężystego) mamy następujące równania:

$$Mv = Mv_1 + mv_p \quad (1)$$

$$Mv^2/2 = Mv_1^2/2 + mv_p^2/2 \quad (2)$$

Podstawiając do równania (2) wartość v_1 wyznaczoną z równania (1), otrzymujemy po uporządkowaniu:

$$m^2v_p^2/M - 2mvv_p + mv_p^2 = 0 \quad (3)$$

Dzieląc równanie (3) obustronnie przez mv_p , otrzymujemy ostatecznie wzór na prędkość odbitej piłki w postaci:

$$v_p = 2v/(1 + m/M) \quad (4)$$

Przy masie piłeczki (m) zaniedbywalnej wobec masy rakiety (M), a taką sytuację mamy właśnie w ping-pongu, otrzymujemy $v_p = 2v$, co oznacza że:

Początkowa prędkość piłeczki jest dwukrotnie większa niż prędkość uderzającej w nią rakiety.

Niech sformułowanie to stanowić będzie pierwsze prawo gry w ping-ponga. Jeśli piłeczkę przy uderzeniu wprowadzamy w rotację, czynimy to kosztem prędkości jej ruchu postępowego, i to w tym większym stopniu, im silniejsza rotacja zostaje jej nadana. Wynika to właśnie z zasady zachowania energii, z której już korzystaliśmy. Przy serwisie w tenisie stołowym, kiedy to piłeczka musi się najpierw odbić na połowie stołu serwującego, nie ma potrzeby, ani wręcz sensu, zamieniać całą energię uderzenia w energię kinetyczną jej ruchu postępowego. Wszystkie takie serwisy byłyby po prostu autowe. Toteż siła uderzenia odgrywa przy serwisie znacznie mniejszą rolę niż umiejętne podkręcanie piłki.

Niekiedy zawodnicy wyrzucają przy serwisie piłeczkę wysoko w górę. Zdarza się, że wędruje ona nawet na wysokość 2–3 metrów powyżej dłoni, czyli znacznie wyżej niż narzucone aktualnymi przepisami minimum wynoszące 16 cm. Większa jest dzięki temu prędkość piłeczki w chwili zderzenia z rakieta. Serwujący dysponuje zatem dodatkową energią, która przy odpowiednim uderzeniu może zostać wykorzystana do nadania szybszej rotacji piłeczce.



Jarosław Kołodziejczyk i Bartosz Such demonstrujący rotację piłeczki podczas wykładu Profesora

3. Rotacja

Piłeczka podkręcona przy uderzeniu raketką sprawia kłopot odbierającemu, ponieważ zachowuje się przy odbiciu inaczej niż piłeczka nie rotująca. Wyróżniamy trzy rodzaje rotacji: rotację górną – *topspin* (stosowaną przy takich uderzeniach, jak topspin i półwolej), rotację dolną – *backspin* (stosowaną przy takich uderzeniach, jak przebiecie i dropszot) oraz rotację boczną – *sidespin* (stosowaną przy takich uderzeniach, jak sidespin i niektóre rodzaje bloku). Rotacja typu topspin polega na podkręceniu piłki w ten sposób, że górna jej część (*top*) w swym ruchu rotacyjnym posuwa się do przodu, tzn. zgodnie z kierunkiem ruchu postępowego piłki, przy backspinie natomiast kierunek ruchu dolnej części piłki, będący wynikiem obrotu, jest zgodny z kierunkiem jej ruchu postępowego. Obie zachodzą wokół osi poziomej równoległej do końcowych krawędzi stołu. Rotacja boczna związana jest natomiast z obrotem piłki wokół osi pionowej.

Zadaniem odbierającego jest bądź „odkręcenie” wirującej piłeczki przez odpowiedni ruch raketką, bądź też odpowiednie jej ustawienie. Odbiór topspina raketką ustawioną tak jak do piłeczki nie rotującej spowoduje zawsze wyrzucenie jej poza stół. Oznacza to, że należy nachylić raketkę, jak gdyby nakrywając nią piłkę w momencie odbicia. Piłka z rotacją dolną, odebrana w sposób rotacji tej nie uwzględniającym, wylądnie natomiast w siatce. Zaniedbanie przy odbiciu rotacji bocznej spowoduje wyrzucenie piłeczki na bok, w stronę zależną od kierunku rotacji.

Oba wymienione efekty związane są z bardzo prostym faktem, który sformułujemy w postaci drugiego prawa gry w ping-ponga. Orzeka ono, że:

Kąt odbicia rotującej piłeczki pingpongowej nie jest równy kątowi padania.

Prawo to dotyczy oczywiście zarówno odbicia piłeczki od raketki, jak i od stołu. Co więcej, dla stołów różnych firm efekty odbicia mogą być istotnie różne. Wynika to z różnic dotyczących ich twardości (sprężystości) i rodzaju nawierzchni (współczynnika tarcia).

Rotacja nadana piłeczce zależy od sposobu jej uderzania oraz od rodzaju okładzin rakiетки. Aby rozszerzyć repertuar uderzeń, zawodnicy naklejają zazwyczaj różne okładziny po obu stronach rakiетки. Przepisy nakazują, aby okładziny różniły się kolorem (czerwona i czarna). Stwarza to większe szansę odbierającemu, ułatwiając mu odczytanie rotacji piłeczki. Powstaje pytanie: skąd odbierający wie, w jakim kierunku i jak szybko rotuje zagrana przez przeciwnika piłeczka? Otóż zasadnicza informacja pochodzi z uważnej obserwacji ruchu jego rakiетки w momencie odbicia. Dlatego też trudność sprawia odbiór piłeczki, niewidocznej dla odbierającego w chwili uderzenia przez przeciwnika, na przykład odbitej w bardzo niskim jej położeniu tuż za stołem. Zawodnicy przy serwisie próbują utrudnić przeciwnikowi odczytanie rotacji, a w konsekwencji odbiór, starając się zasłonić piłeczkę w momencie jej uderzania. Nie jest to wprawdzie dozwolone, ale też niełatwe do wychwycenia przez sędziego.

Rotację piłeczki można też próbować odczytać innymi, bardziej wyrafinowanymi sposobami, jak na przykład obserwując ruch firmowego stempla wybitego na piłeczce, a nawet wykorzystując efekty akustyczne towarzyszące uderzeniu. W ten sposób pomagał sobie na przykład nasz mistrz Andrzej Grubba. Ale i na to serwujący znaleźli sposób. Było nim zagłuszające serw tupnięcie, które w pewnym momencie zostało zakazane.

Szybko rotująca piłeczka sprawia trudność odbierającemu. Czyni też grę mniej czytelną dla widza, który na przykład nie rozumie, dlaczego zawodnik w ogóle nie trafił w prostą, wydawałoby się, piłkę. Rozważano od pewnego czasu wprowadzenie różnego rodzaju zmian w przepisach, mających na celu zwolnienie rotacji piłeczki, a w konsekwencji doprowadzenie do dłuższych wymian i do zwiększenia czytelności gry. Wrócimy jeszcze do tego zagadnienia w dalszej części.

4. Szybkość i uchwyt

Jaką maksymalną prędkość można nadać piłeczce pingpongowej uderzeniem rakiეტką? Nie ma tu oczywiście sensu mówić o prędkości piłki przy serwisie, która ze względu na sposób serwowania musi być istotnie ograniczona. Można natomiast utożsamiać ją z prędkością w momencie ścięcia. Rekordowa przytaczana wartość jest imponująca i wynosi 170 km/h. Zgodnie z pierwszą zasadą gry w ping-ponga, uzyskanie takiej prędkości wymaga, aby prędkość rakiетки w momencie uderzenia była równa $85 \text{ km/h} = 24 \text{ m/s}$.

Przytoczony wynik dotyczy pomiarów wykonywanych z udziałem pingpongistów europejskich. Oficjalnie uznawany rekord prędkości piłeczki pingpongowej jest natomiast znacznie gorszy i wynosi „tylko” 96 km/h, a za rekordzistę uważany jest były mistrz świata Chuang Tse Toung. Warto w tym momencie dodać, że ze względu na stosowanie tzw. uchwytu piórkowego, Azjaci mają uderzenie wyraźnie słabsze od Europejczyków. Jest to główna przyczyna tak znacznej różnicy między rekordowymi prędkościami piłeczki.

Uchwyt azjatycki imitujący trzymanie pióra (stąd nazwa *penhold*) daje możliwość nadania piłeczce większej gamy różnego rodzaju rotacji. Zawodnicy grający

uchwytem europejskim (zwanym *shakehand*) mają natomiast możliwość nadania jej większej prędkości. W dużym uproszczeniu można to ująć w następujący sposób: *penhold* jest korzystniejszy przy serwie, *shakehand* – w trakcie gry. Pingpongowy mistrz wszech czasów Szwed Ove Waldner, słynący też ze znakomitego serwisu, serwuje czasem, stosując uchwyt zbliżony do azjatyckiego, a następnie kontynuuje grę uchwytem europejskim.

5. Opór powietrza

Zajmijmy się teraz lotem piłeczki i działającą nań siłą oporu powietrza. Odwołajmy się zatem do wzoru wyrażającego siłę oporu ośrodka (F) stawianego poruszającemu się w nim ciału. Ma on następującą postać:

$$F = C\rho v^2 S/2 \quad (5)$$

gdzie ρ jest gęstością ośrodka, v – prędkością ciała, S – jego polem powierzchni (przekrojem) w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu, a C tzw. współczynnikiem kształtu.

Z zależnością oporu powietrza od jego gęstości wiążą się na przykład trudności z grą na dużych wysokościach. Piłeczka przy mniejszej gęstości powietrza jest po prostu wyraźnie szybsza. Zbyt wolna reakcja może zatem opóźnić jej odbicie przez odbierającego. Wymaga to z kolei odsunięcia ręki z raketką do tyłu. Przy *forhandzie* nie stanowi to większego problemu i praktycznie nie wpływa na poprawność odbicia. Przy *backhandzie*, w szczególności przy *zagranu topspina*, wykonanie prawidłowego ruchu cofniętą ręką staje się znacząco utrudnione. Jako ciekawostkę można podać, że między innymi z powodu specyfiki gry w miejscach wysoko położonych mistrzostwa świata w 1995 roku przeniesione zostały z Acapulco do Chin.

Ze wzoru (5) wynika, że stawiany przez powietrze opór (F) bardzo szybko (kwadratowo) wzrasta wraz z prędkością ruchu. Wzrasta on również wraz z rozmiarami piłki, a dokładniej wraz z kwadratem jej promienia ($F \sim S \sim r^2$). Dla piłki pingpongowej jest więc kilkakrotnie mniejszy niż dla tenisowej przy takich samych prędkościach. Dlatego też, czujemy to zresztą intuicyjnie, nawet najsilniej uderzona piłeczka pingpongowa nie będzie w stanie przelecieć przez całą długość kortu, podczas gdy piłka tenisowa może pokonać nawet znacznie większą odległość. Jak wytłumaczyć ten fakt i odpowiedzieć na pytanie: dlaczego piłeczka pingpongowa tak gwałtownie hamuje? Najprostsza odpowiedź może stanowić sformułowanie trzeciego prawa gry w ping-ponga:

Piłeczka pingpongowa gwałtownie hamuje dlatego, że jest lekka.

Zgodnie z drugą zasadą dynamiki, przyspieszenie jest wprost proporcjonalne do działającej siły i odwrotnie proporcjonalne do masy ciała ($a = F/m$). Jeśli jako obiekt naszych zainteresowań wybierzemy kilka piłek używanych w różnych dyscyplinach sportowych, to siła oporu powietrza okaże się być proporcjonalna do kwadratu promienia każdej z nich. Stosunek r^2/m może być więc miarą opóźnienia piłki w wyniku oporu powietrza lub też, inaczej mówiąc, miarą skuteczności jej

hamowania. W tabeli 1 przytoczone są wartości r^2/m dla kilku wybranych rodzajów piłek. Wyższa pozycja w tabeli oznacza oczywiście mniejszą stratę prędkości w wyniku oporu powietrza. Jak widać, ping-pong wyróżnia się zdecydowanie największą wartością r^2/m i w tabeli znajduje się na ostatniej pozycji.

Tabela 1

	m [g]	r [cm]	r^2/m [cm ² /g]
Baseball	145	3,7	0,09
Golf	46	2,1	0,10
Squash	24	2,0	0,17
Tenis	57	3,2	0,18
Ping-pong	2,5	1,9	1,60

Tenis stołowy sprawia wrażenie gry bardzo szybkiej. Określenie *bardzo szybko* jest jednak określeniem względnym. Postarajmy się zatem uściślić je w jakiś sposób. Wykorzystajmy w tym celu informację o pewnym rekordowym osiągnięciu. Otóż dwaj angielscy tenisiści stołowi (znakomici zresztą) Desmond Douglas i Allan Cook, stojąc po przeciwnych stronach stołu, odbili piłeczkę 170 razy w ciągu minuty. Mając na uwadze zarówno ich klasę, jak i dążenie do uzyskania maksymalnej częstości odbić, możemy przypuścić, że piłka przebijana była bardzo szybko. Obliczmy średnią prędkość (v_{sr}) piłeczki w czasie trwania próby, wiedząc, że odległość między graczami odpowiadała w przybliżeniu długości stołu, czyli 2,74 m. Prędkość ta wynosi zaledwie 28 km/h i jest znacznie mniejsza, niż można by oczekiwać, w szczególności mając na uwadze przytaczane wcześniej rekordowe prędkości. Jest to właśnie efekt tak silnego hamowania piłeczki w wyniku oporu powietrza.

Wrażenie szybkiej gry i dużej prędkości piłki wynika przede wszystkim z wzajemnej bliskości graczy i bardzo dużej częstości odbijania piłki, nie mającej sobie równej w żadnej innej grze sportowej. Pojawiły się kilka lat temu głosy, aby odpowiednimi przepisami doprowadzić do zwolnienia gry, wydłużając w ten sposób wymianę piłek. Sugerowano podwyższenie siatki lub zwiększenie piłeczki jako dwie ewentualne drogi realizacji tego celu. Wreszcie w ubiegłym roku, bezpośrednio po Olimpiadzie w Sydney, zrealizowano wcześniejsze zamiary i zwiększono średnicę piłeczki z 38 mm do 40 mm. Zwolnienie gry uzyskano dzięki zwiększeniu siły oporu powietrza działającej na piłeczkę. W ten sposób osiągnięto również spowolnienie rotacji piłki, co z kolei jest konsekwencją zwiększenia jej momentu bezwładności. Warto zaznaczyć, że zmiana rozmiarów piłeczki odczuwalna jest jedynie przez graczy na poziomie wyczynowym. Amatorom nie sprawi różnicy, którą piłeczkę wybiorą do gry.

6. Zakrzywienie toru

Jest jeszcze jeden bardzo ważny element odróżniający zachowanie się piłki rotującej od pozbawionej rotacji. Różnica ta związana jest z jej lotem i jest następstwem prostego faktu, że każda piłka, niezależnie od jej wielkości czy stopnia gładkości powierzchni, porywa za sobą sąsiadujące z nią cząsteczki powietrza, które w ten sposób zaczynają wirować razem z nią. Ze względu na lepkość powietrza, taki przekaz energii następuje również do dalszych jego warstw, z tym że prędkość ruchu porywanych cząsteczek powietrza maleje wraz z odległością od piłki. Nałożenie tego ruchu na ruch cząsteczek powietrza względem piłki, będący wynikiem jej ruchu postępowego, prowadzi do asymetrii w prędkości opływu piłeczki przez warstwę przyścienną. Zgodnie z twierdzeniem Bernoulliego, ciśnienie wzrasta tam, gdzie prędkość przepływu maleje. Różnica w prędkości przepływu po dwóch stronach piłki powoduje zatem powstanie różnicy ciśnień, a w konsekwencji pojawienie się siły spychającej piłkę w kierunku zależnym od rodzaju rotacji.

Piłka z rotacją dolną będzie miała, w stosunku do piłki pozbawionej rotacji, tor zakrzywiony ku górze i spadnie na stół później niż piłka nie rotująca. Zupełnie odwrotnie zachowa się piłka z rotacją górną. Będzie ona miała tor zakrzywiony ku dołowi, a tym samym krótszy czas lotu. Siła spychająca piłkę jest, jak już wiemy, wynikiem powstającej różnicy ciśnień, a ta z kolei zależy od prędkości kątowej ruchu obrotowego i prędkości liniowej ruchu postępowego. Efekt ten jest dobrze widoczny dla różnych rodzajów piłek, ale piłeczka pingpongowa jest szczególnie nań podatna. Wynika to z bardzo małej jej masy, co wyjaśnia drugie prawo gry w ping-ponga.

7. Zakończenie

Przedstawiliśmy kilka wybranych przykładów ilustrujących ingerencję podstawowych praw fizyki w zachowanie piłeczki pingpongowej, związanych z jej odbiciem od rakiетки i od stołu, a także z jej lotem. Kluczowym elementem w tenisie stołowym jest rotacja piłeczki. Umiejętność jej nadania z jednej strony oraz właściwego jej odczytania i odpowiedniego na nią zareagowania z drugiej, określają podstawowe wymagania stawiane tenisistom stołowym i pozwalają natychmiast odróżnić amatora od wyczynowca.

Elementem wyróżniającym ping-pong na tle innych gier z użyciem piłki jest bardzo duża wartość wielkości r^2/m , którą zdefiniowaliśmy jako miarę skuteczności hamowania. Jest to konsekwencją bardzo małej masy piłeczki pingpongowej, a tym samym szczególnej jej podatności na wszelkie działające na nią siły.

Te cechy tenisa stołowego, które uznaliśmy za szczególnie dla tej gry charakterystyczne, ujęliśmy w postaci trzech praw gry w ping-ponga. Istnieje oczywiście znacznie więcej elementów gry, które – analizowane przez pryzmat praw fizyki – pozwalają lepiej zrozumieć to wszystko, co dzieje się wokół stołu. Dotyczy to samej techniki gry, wykorzystywanego w grze sprzętu, a nawet powodów modyfikacji przepisów.