

Paradoksy świata fizyki: czy jesteśmy sami?

Szymon Zelewski

Politechnika Wrocławska, Wydział Elektroniki

Wstęp

Paradoksem nazywamy stwierdzenie logiczne sprzeczne z intuicją, pierwotnymi oczekiwaniami. Zazwyczaj opiera się na pozornie prawidłowych przesłankach, prowadzących do absurdalnych lub niejednoznacznych wniosków.

Sprzeczności w fizyce mogą wynikać z wielu przyczyn, między innymi:

- stosowania niedokładnych lub niepoprawnych (w kontekście oczekiwanych wyników) metod badawczych,
- niezrozumienia w wystarczającym stopniu praw fizycznych do przeprowadzenia eksperymentu lub kierowanie się niepotwierdzonymi wynikami,
- próby mierzenia wielkości niemierzalnych, opracowanych „na własny użytek” lub braku powtarzalności wyników, potrzebnej do wyciągnięcia jednoznacznych wniosków.

Jednym z pierwszych tematów dotyczących fizyki gdzie możemy mówić o paradoksie, jest Perpetuum mobile – sięgająca historycznie średniowiecza koncepcja maszyny pracującej w nieskończenie długim czasie przy jednorazowym pobudzeniu siłą zewnętrzną, np. silnik o sprawności przekraczającej 100%. Dziś wiemy, że nie istnieje rozwiązanie tego problemu, zważywszy przede wszystkim na zasadę zachowania energii i zasady termodynamiki, w przypadku propozycji opartych na silnikach cieplnych.

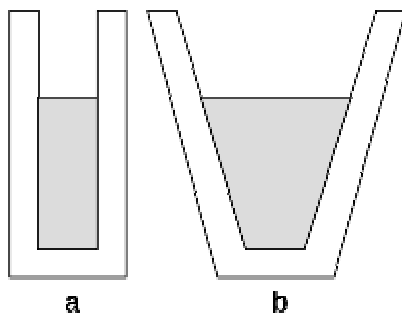


Rysunek 1: Kolba Boyle'a, jeden z przykładów perpetuum mobile [1]

Wiele nowożytnych paradoksów jest powiązanych z szczególną teorią względności i mechaniką kwantową (paradoks bliźniąt, problem kota Schrödingera, tzw. paradoks EPR). Są one szeroko opisane i cały czas prowadzone są na ich temat dyskusje. Wynika to zapewne ze zwiększonego zainteresowania fizyków tymi dziedzinami – wielu naukowców inspirowane jest dokonaniem takich sław jak Albert Einstein czy Richard Feynman.

Paradoks hydrostatyczny

W naczyniach o różnej budowie (zmiennym przekroju), po wypełnieniu cieczą o jednakowych właściwościach do tego samego poziomu, na dnie będzie panowało jednakowe ciśnienie hydrostatyczne. Klóci się to z intuicją, ponieważ pozornie w naczyniu, którego dno ma znacznie mniejszą średnicę niż wyższa część, powinno panować wyższe ciśnienie, niż w walcu lub kolbie o tej samej podstawie.



Rysunek 2: Ciśnienie na dnie obu naczyń jest identyczne [5]

Ciśnienie hydrostatyczne na dowolnej wysokości h opisuje się zależnością [3]

$$p = p_0 + \rho gh,$$

gdzie p_0 oznacza ciśnienie działające na powierzchni cieczy (np. ciśnienie atmosferyczne), ρ gęstość cieczy, a g przyspieszenie ziemskie. Stąd ciśnienie na dnie (a także w innym dowolnym miejscu naczynia) jest zależne od wysokości słupa cieczy.

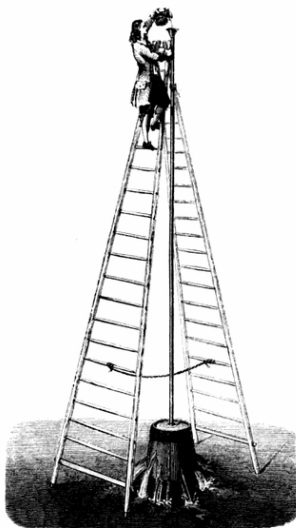
Jedną z propozycji rozwiązania paradoksu jest rozważenie rozkładu sił w naczyniu z cieczą, zamiast analizy samych ciśnień. Siła parcia zależy od powierzchni jak i ciśnienia, zgodnie ze wzorem

$$F_p = \rho ghS = \rho gV.$$

Przyjmując dwie objętości naczynia V_1 oraz V_2 , gdzie $V_1 < V_2$ a V_1 oznacza objętość słupa cieczy bezpośrednio nad dnem, łatwo zauważyć że siła parcia zależna od V_2 będzie większa od siły ciężkości słupa cieczy, przez którą powinno być powodowane ciśnienie hydrostatyczne na dnie cieczy. Dzieje się tak zawsze, gdy ściany naczynia nie są idealnie prostopadłe do dna. Wielkością fizyczną której zmiany tutaj obserwujemy jest więc siła, a nie ciśnienie hydrostatyczne.

Najbardziej znanym eksperymentem ilustrującym podstawowe prawo hydrostatyki była tzw. beczka Pascala. Znany naukowiec połączył wypełnioną

wodą, szczelną dębową beczkę z długą rurką, tworząc w ten sposób słup cieczy o wysokości – według różnych źródeł – 10 do 12 metrów. Wlewając do rurki zaledwie kilka litrów wody, udało mu się rozsadzić beczkę. Jest to możliwe, ponieważ wytworzone wysokie ciśnienie działa jednakowo na wszystkie powierzchnie (zgodnie z prawem Pascala). Udowodnił w ten sposób, że ciśnienie hydrostatyczne zależy od wysokości słupa cieczy, a jego objętość nie ma znaczenia.



Rysunek 3: Beczka Pascala [2]

Propozycja dla nauczycieli: proszę przeprowadzić z udziałem uczniów eksperyment polegający na pomiarze manometrem ciśnienia w kilku naczyniach napełnionych do tego samego poziomu, lub naczyniach połączonych.

Paradoks hydrodynamiczny

Ciecz przepływająca przez zwężenie w podłużnym naczyniu, np. rurze, ma niższe ciśnienie w zwężeniu, niż bezpośrednio przed i za zwężeniem. Ponadto, ciśnienie cieczy płynącej w rurze zmienia się proporcjonalnie do pola przekroju rury.

Intuicja podpowiada nam, że w momencie przepływu przez przewężenie ciśnienie powinno znacznie wzrosnąć, ze względu na konieczność „ściskania” cieczy w zwężce. W warunkach rzeczywistych rzadko obserwujemy jednak wpływ ściśliwości na zmianę ciśnienia, ze względu na wysoki współczynnik sprężystości objętościowej wody, zaledwie dwa rzędy mniejszy od tego samego współczynnika dla solidnych ciał stałych. Niecodzienny wydaje się też fakt, że spośród dwóch rurek o różnych średnicach, to w tej szerszej panuje w trakcie przepływu wyższe ciśnienie, choć ciecz ma „więcej swobody”.

Aby zrozumieć i rozwiązać ten problem, należy przyjrzeć się równaniu Bernoulliego [4].

Zakładając przepływ laminarny nieściśliwej cieczy w każdym odcinku naczynia (rury), prawdziwe jest równanie

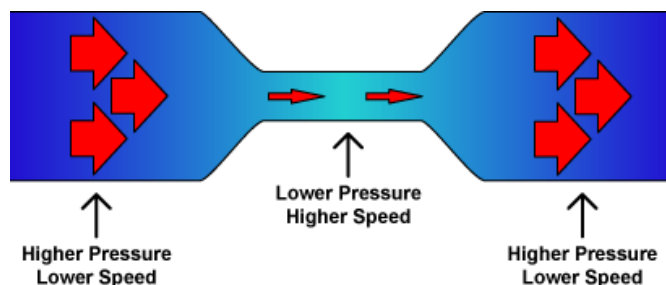
$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = const$$

gdzie p oznacza ciśnienie cieczy w rozpatrywanym miejscu naczynia, ρ gęstość cieczy, v prędkość przepływu, g przyspieszenie ziemskie, a h uśrednioną wysokość naczynia względem układu odniesienia (np. powierzchni ziemi).

Wynika stąd zależność między ciśnieniem statycznym ($p + \rho gh$) a dynamicznym ($\frac{1}{2} \rho v^2$) – oba człony równania muszą się wzajemnie kompensować, aby spełnić warunek stałości. Można zatem przyjąć, że

$$p_{stat} \propto \frac{1}{v^2}.$$

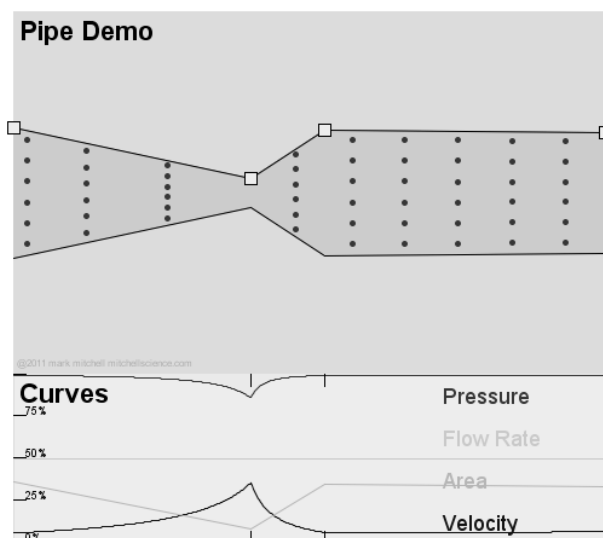
Teraz łatwo zauważyć, że zmniejszenie ciśnienia statycznego idzie w parze ze wzrostem prędkości przepływu, i odwrotnie – wzrost prędkości przepływu sprawia, że dominuje człon dynamiczny.



Rysunek 4: Zasada działania równania Bernoulliego [7]

Badania zachowania się cieczy wykazały, że w momencie przepływu przez przewężenie znacznie zwiększa się prędkość przepływu (przecząc przesłankom o ściśliwości), a tym samym ciśnienie dynamiczne, co prowadzi do spadku ciśnienia statycznego.

Na rysunku poniżej przedstawiono zrzut ekranu przykładowej symulacji komputerowej ilustrującej działanie prawa Bernoulliego, zamieszczonej na stronie internetowej [6]. Znaczniki o kształcie kwadratów pozwalają zmieniać zwężenia wirtualnej rury, przez którą przepływa ciecz. Na wykresach przedstawiono ciśnienie, natężenie przepływu, pole przekroju rury oraz prędkość przepływu cieczy. Animacja jest interaktywna – można w trakcie jej działania zmieniać kształt rury.



Rysunek 5: Animacja ilustrująca działanie prawa Bernoulliego [6]

Warto w pełni zrozumieć równanie Bernoulliego jako podstawowe prawo hydrodynamiki, zwłaszcza że układ krwionośny człowieka zawiera żyły – naczynia z przewężeniami, gdzie również można rozpatrzeć działanie opisanego tutaj paradoksu. Działanie równania Bernoulliego jest wykorzystywane praktycznie w zwężce Venturiego do pomiarów prędkości cieczy.

Paradoks Fermiego

Fizycy najczęściej zajmują się zjawiskami obserwowalnymi na Ziemi – jest to wygodne i praktyczne. Astronomowie nie lubią się ograniczać i badają wszelkie ciała niebieskie, poznając ich strukturę i wzajemne oddziaływania. Enrico Fermi, wybitny noblista, choć nie jest kojarzony z osiągnięciami astronomicznymi, sformułował pod koniec lat 40. jeden z najbardziej znanych paradoksów z pogranicza astronomii i filozofii.

Paradoks Fermiego wyraża sprzeczność między wysoko oszacowanym prawdopodobieństwem istnienia cywilizacji pozaziemskich i jednoczesnym brakiem dowodów, które wskazywałyby na jakąkolwiek obserwowalną działalność takich cywilizacji.

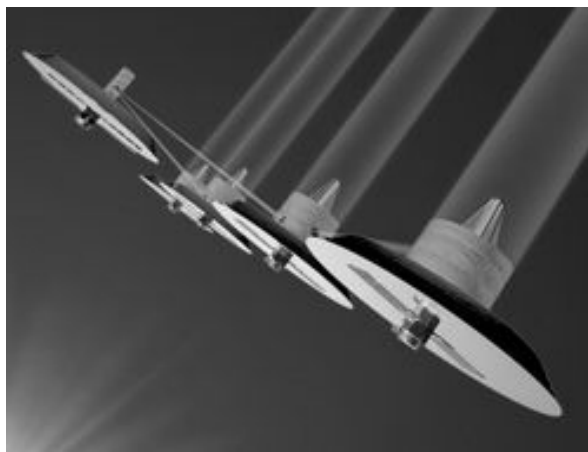
Przykładowe argumenty za:

- Ziemia jest stosunkowo młodą planetą i typowym obiektem we wszechświecie. Liczbę planet przypadających na każdą gwiazdę w Drodze Mlecznej szacuje się na 1,6 [14] (w najgorszym przypadku 0,71). Istnieje wiele układów słonecznych.
- Zakłada się niezerowe rozwiązanie równania Drake'a.

- Zgodnie z prawem Hubble'a galaktyki oddalają się coraz szybciej – nie jesteśmy w stanie ich „dogonić”, możemy więc nie dysponować aparaturą, która odbierze sygnały z kosmosu, nawet jeśli takowe by się pojawiły.

Przykładowe argumenty przeciw:

- Nie każda cywilizacja musi komunikować się z innymi – może czuć się zagrożona, być świadoma konkurencji lub nie podjęła takiej próby, pomimo możliwości.
- Obca cywilizacja nie posiada rozwiniętego systemu łączności, lub posługuje się niezrozumiałym dla nas (i urządzeń) językiem.
- Istoty nie chcą poświęcić bardzo długiego okresu (np. porównywalnego ze średnim czasem życia) na podróż międzygalaktyczną, która może zakończyć się niepowodzeniem.



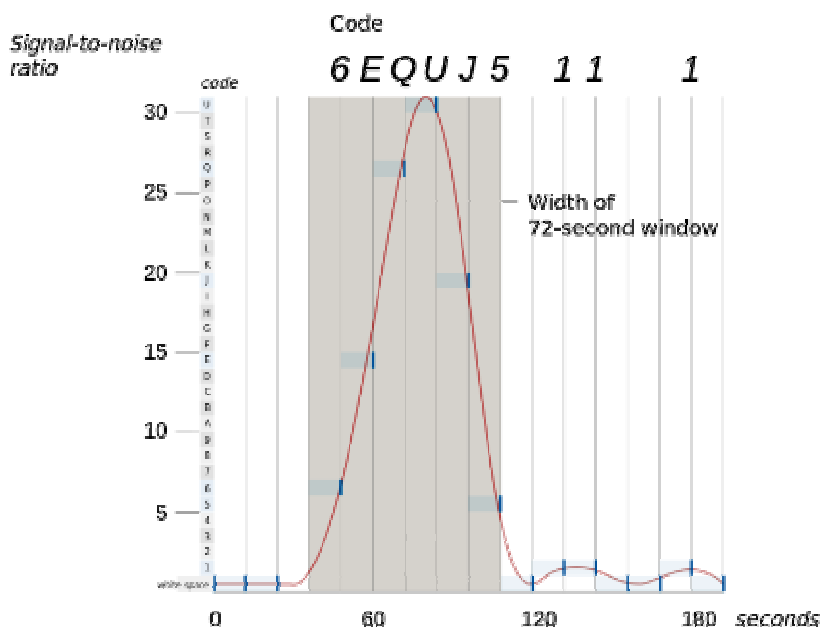
Rysunek 6: Statek - poszukiwacz planet (wizja artystyczna) [13]

W 1959. roku Giuseppe Cocconi i Philip Morrison opublikowali zaledwie dwustronicowy artykuł, w którym przedstawili propozycję komunikacji z potencjalnymi cywilizacjami pozaziemskimi za pomocą fal radiowych o częstotliwości 1420MHz (z pełnym uzasadnieniem) [15]. Zapoczątkowało to kontrowersyjny program SETI (ang. Search for Extra-Terrestrial Intelligence) [17], w ramach którego przeprowadzono wiele działań mających wspólny cel – nawiązanie kontaktu z inteligentnymi formami życia poza Ziemią. Większość prób polegała na nadaniu sygnałów radiowych (zgodnie z zaleceniami Cocconiego i Morrisona), a także świetlnych.

Za najważniejszy krok wykonany podczas programu SETI uznaje się wysłanie z obserwatorium w Arecibo piktogramu zawierającego najważniejsze informacje o człowieku oraz schemat Układu Słonecznego. Wiadomość zapro-

jektował Frank Drake, zawzięty popularyzator idei cywilizacji pozaziemskich i były dyrektor ośrodka badawczego w Arecibo.

Rok 1977. przyniósł nadzieje na przełom. Za pomocą radioteleskopu The Big Ear odebrano silny sygnał radiowy o wąskim paśmie, trwający 72 sekundy, w wysokim stopniu zgodny z oczekiwaną odpowiedzią ze strony obcej cywilizacji. Tajemniczą wiadomość szeroko opisał Jerry R. Ehman [16], a zakreślony na wydruku komputerowym komentarz naukowca sprawił, że zaczęto mówić o „Sygnale Wow!”. Najbardziej obiecującym parametrem była częstotliwość sygnału, na tyle zbliżona do 1420MHz, że naukowcom pracującym na rzecz SETI trudno byłoby uznać jego przypadkowość. Niestety „Sygnał Wow!” był jednorazowym zjawiskiem – nigdy później nie udało się odebrać tak intensywnych fal w pasmach nasłuchu. Wiadomość do dziś budzi kontrowersje, nie jest też możliwe precyzyjne określenie źródła sygnału.



Rysunek 7: Intensywność "Sygnału Wow!" w czasie

Tematyka cywilizacji pozaziemskich szybko przeniknęła do kultury popularnej; stała się bazą dla wielu powieści science-fiction, komiksów czy filmów – tutaj warto wymienić „Kontakt” z 1997. roku, w reżyserii Roberta Zemeckisa, będący luźną interpretacją projektów wykonanych w ramach programu SETI.

Paradoks Fermiego jest źródłem wielu dyskusji pomiędzy naukowcami z różnych dziedzin – przede wszystkim fizyki i astronomii, lecz także teologii i filozofii. Niekiedy mówi się o nowej dziedzinie nauki: astrobiologii, badającej życie poza Ziemią, niekoniecznie w opisanym tutaj kontekście. Poszukiwanie

rzekomych śladów działalności obcych cywilizacji jest często krytykowane, jako marnotrawstwo funduszy i realizowanie bezużytecznych idei. Nawet obiecujący „Sygnał Wow!” okazał się niewypałem, ponieważ nie ustalono dokładnego źródła wiadomości, ponadto komunikat był zbyt krótki, by mówić o udanym kontakcie.

Pozostawia to paradoks Fermiego nierozwiązanym po dziś dzień.

Efekt Mpemby: dlaczego trudno zamrozić zimną wodę?

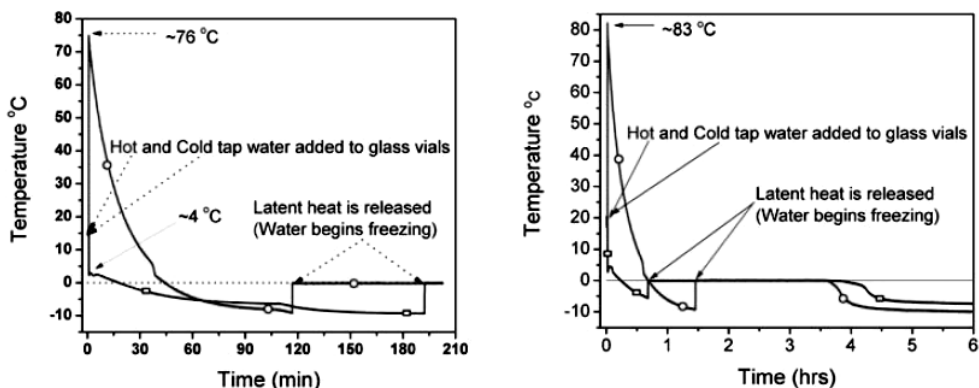
W 1963 roku Erasto Mpemba, uczeń w tanzańskim miasteczku Moshi u podnóża Kilimandżaro, zwrócił uwagę na niecodzienne zjawisko fizyczne [8]. Ze względu na wysoką temperaturę, młodzieńcy zajmowali się produkcją lodów. Zapotrzebowanie było tak duże, że konieczna była rywalizacja o miejsce w szkolnej chłodziarce. Mpemba, aby wykorzystać ostatnie wolne miejsce do zamrożenia zagotowanego wcześniej mleka, włożył je nie czekając na ostudzenie, ryzykując tym samym zniszczenie zamrażarki. Mleko w jego kubku przeszło w stan stały szybciej, niż mleko włożone do chłodziarki w bardzo krótkim odstępie czasu, lecz mające temperaturę pokojową. Jak się później okazało, ten fenomen był powszechnie wykorzystywany przez wielu sprzedawców lodów. Nauczyciele przekonywali Mpembę, że zgodnie z zasadami termodynamiki nie jest to możliwe, a jego obserwacje są błędne. Był wręcz wyśmiewany za wygłaszane opinie na ten temat, a wszelkie błędy mianowano jego nazwiskiem: „to jest fizyka według Mpemby”, „to jest matematyka według Mpemby”, itp. To jednak nie przeszkodziło młodemu odkrywcy, a jedynie zmotywowało do poważniejszych eksperymentów w szkolnym laboratorium.

Denis Osborne, doktor nauk fizycznych, uczestniczył pewnego razu w spotkaniu, którego uczestnikiem był Mpemba. Jako pierwsza w pełni kompetentna osoba zainteresował się odkryciem, próbował także znaleźć dla niego rozwiązanie. Ponownie przeprowadził doświadczenie Mpemby, dążąc do obiektywizmu eksperymentu – zapewniając jednorodne schładzanie obu próbek cieczy (wody), zauważając ubytek objętości z powodu parowania oraz mierząc dokładnie zmiany temperatury w czasie i punkt przejścia w stan stały. W artykule napisanym wspólnie z Erasto Mpembą [8], przytacza kluczowy fakt fizyczny: szybkość schładzania cieczy nie zależy od średniej temperatury w całej objętości, lecz od temperatury na powierzchni płynu. Ze względu na silniejsze działanie konwekcji w naczyniu z ogrzaną cieczą, również wymiana ciepła z otoczeniem może zachodzić szybciej. Osborne nie stwierdził jednoznacznie, jakie czynniki decydują o takim zachowaniu się cieczy i zaproponował przeprowadzenie dokładniejszych eksperymentów.

Obok wielu amatorskich prób wyjaśnienia efektu Mpemby, prawdopodobnie najobszerniejsze badania w tym kierunku podjął w 2011 roku James Brownridge [9]. Motywacją jego działań był szereg nieścisłości w opisach doświadczeń i brak wyraźnej powtarzalności wyników w różnych warunkach badawczych.

Przykładowo: w identycznie przygotowanych stanowiskach, z różnie umiejscowionymi punktami pomiaru temperatury, uzyskamy inne czasy potrzebne do pełnego zamrożenia próbki, jakkolwiek opiszemy ten stan. Brownridge, dla ujednoczenia badania, przyjął „czas zamrożenia” jako czas, w którym wyzwala się ciepło utajone. W większości przypadków ten moment oznacza skok temperatury ze stanu przechłodzenia do 0°C .

Już pierwsze próby wykazały, że dla różnych temperatur wody w probówkach można uzyskać szybsze zamrożenie zarówno gorącej, jak i chłodniejszej cieczy. Skłoniło to Brownridge'a do określenia warunków eksperymentu, dla których prawdziwy jest efekt Mpemby.



Rysunek 8: Punkty zamrożenia cieczy dla różnych temperatur początkowych [9]

Moment zmiany wody w lód był dodatkowo wykrywany miernikiem pola elektromagnetycznego, którym odbierano sygnał na kilka sekund, zanim odczyt termopary wykazał skok temperatury. Dowodzi to skrupulatności eksperymentu i zapobiega błędnej decyzji, jeśli ciecz nie ulega przechłodzeniu.

Brownridge udowodnił, że samo podgrzanie wody zamkniętej w fiolce nie powoduje zmniejszenia czasu zamrożenia. Potwierdziły to wyniki powtórzonego kilkaset razy (!) doświadczenia.

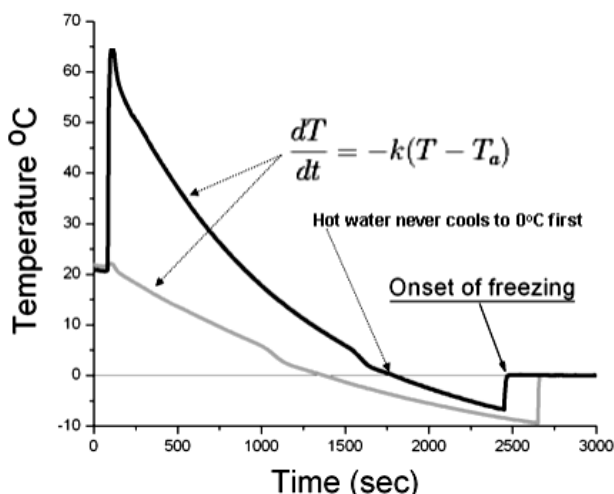
Szybkość zamarzania cieczy w zamrażarce zależy od tego, czy naczynie położymy bezpośrednio na oszronionej powierzchni, czy podłożymy próbki np. kartonem izolującym ciepło. Naczynie z gorącą cieczą powoduje miejscowe topnienie szronu – powstaje cienka warstwa wody, która lepiej przewodzi ciepło, niż lód. Prowadzi to do lepszego kontaktu cieplnego z chłodziarką, co pozwoliło na uzyskanie krótszego czasu zamarzania, niż w przypadku chłodniejszej próbki. Wskazywałoby to na zbieżność z efektem Mpemby. Nie przekonało to Brownridge'a i zostało uznane za zmianę warunków eksperymentu.

Podstawą fizyczną do szybszego osiągnięcia temperatury 0°C przez cieplejszą wodę spośród dwóch próbek, zgodnie z prawem stygnięcia Newtona, musi

być zmiana właściwości wody w jednej z nich, lub zmiana warunków doświadczenia [12].

Szereg pomiarów wykonanych przez Brownridge'a dla różnych próbek (woda destylowana, stopiony śnieg, a nawet mieszanina wody z wodą ciężką) wykazał, że efekt Mpemby jest prawdziwy wyłącznie wtedy, gdy ciecz ulega przechłodzeniu, a chłodniejsza woda ma niższą temperaturę nukleacji, niż cieplejsza – mogą tu wystąpić nawet kilkustopniowe różnice. Nie możemy mówić o działaniu efektu Mpemby, jeśli zmienimy warunki eksperymentu, w które wlicza się przede wszystkim: równomierne przewodnictwo cieplne dla wszystkich powierzchni próbek, brak wzajemnego wpływu między cieplejszą i chłodniejszą próbką, brak zanieczyszczeń w którejkolwiek próbce.

Rozwiązanie Jamesa Brownridge'a pozostaje najbardziej szczegółowym i wiarygodnym wytłumaczeniem efektu Mpemby.



Rysunek 9: Działanie prawa Newtona podczas schładzania cieczy [9]

Ciekawostka: efekt Mpemby, choć opisany w inny sposób, zawarł w wiekopomnym dziele „Meteorologia” [10] Arystoteles:

„Gwałtowność procesu lodowacenia wzmacnia uprzednie nagrzanie wody. Wtedy bowiem oziębianie następuje rychlej. Stąd też, gdy ludzie chcą szybko oziębic wodę, najpierw poddają ją działaniu promieni słonecznych.”

Propozycja dla nauczycieli: jeśli szkolna pracownia dysponuje zamrażarką, warto przeprowadzić eksperyment podobny do pierwszych prób Erasto Mpemby. Uczniowie mogą zainteresować się tematem wykonując doświadczenie samodzielnie w ramach pracy domowej.

Podsumowanie

Aż trzy z przedstawionych paradoksów są powiązane z cieczami. Mimo to tematyka nie wydaje się wyczerpana – na osobne opracowanie zasługują np. ciecze nienewtonowskie; kontynuując powiązanie do układu krwionośnego należy zauważyć, że krew jest tutaj jednym z najlepszych przykładów.

Intuicja często zawodzi, a dopiero racjonalny dowód daje odpowiedź – prawdę. Próby rozwiązywania paradoksów pozwalają nam lepiej zrozumieć świat fizyki, jednak tylko część z nich jak dotąd znalazła racjonalne wytłumaczenie. Niektóre paradoksy są rozpoznawalne i zdobyły zainteresowanie badaczy, inne, choć dotyczą spraw podstawowych, przechodzą w środowisku naukowym bez większego rozgłosu, a zajmują się nimi wyłącznie pasjonaci (np. efekt Mpemby).

Co pewien czas wśród nas pojawiają się wybitne umysły, jak Izaak Newton, Nikola Tesla czy Albert Einstein, na nowo tłumacząc – wydawałoby się – doskonale znane zagadnienia, lub wprowadzając nieznanne dotychczas metody inżynierskie i naukowe, dokonując rewolucji w sposobie naszego postrzegania świata.

Odkrycia XX. wieku, zwłaszcza elektroniczne metody łączności, wpłynęły na gwałtowny rozwój nauki i zapoczątkowały rywalizację technologiczną. Przy obecnym tempie rozwoju możemy liczyć na to, że już wkrótce poznamy kolejnego z naukowych wizjonerów, który pomoże zrozumieć niewytłumaczone dotąd problemy. A przede wszystkim, zostanie wysłuchany i nie ulegnie presji środowiska naukowego, często krytykującego nowe dokonania bez prób dyskusji, lub odgórnie przypisującego rewolucyjnym pomysłom kategorię pseudonauki. Jako przykład z historii warto wspomnieć Kopernika, piętnowanego przez katolików i gnomoników za swoje największe dzieło [11]. Dziś już nikt nie kwestionuje teorii heliocentrycznej, ciągle jednak mówi się o geocentryzmie, aby udowodnić, że do wielkich zmian potrzeba wielkiego umysłu. Jak jednak widać na przykładzie Erasto Mpemby, nawet uczeń może zwrócić uwagę świata na niecodzienny fizyczny fenomen, o ile nie zabraknie mu wiary w siebie.

Literatura

- [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Boyle
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Blaise_Pascal
- [3] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker: *Podstawy fizyki*, T. 2, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2003 (s. 65).
- [4] Ibidem, (s.79).
- [5] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Hydrostatyka>
- [6] http://mitchellscience.com/bernoulli_principle_animation
- [7] <http://www.cdtextbook.com/assocStudies/supScience/fuelSys/bernoulliprinciple.html>
- [8] E. Mpemba, D. Osborne: *Cool?*, Physics Education, 1969 (May, Vol 4), s. 172-175.

- [9] J.D. Brownridge: *A search for the Mpemba effect: When hot water freezes faster than cold water*, American Journal of Physics, January 2011, Volume 79, Issue 1, s. 78-93.
- [10] Arystoteles: *Meteorologika*, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1982.
- [11] T. Przypkowski: *Dzieje myśli kopernikowskiej*, Wydawnictwo Ministerstwa Obrony Narodowej, Warszawa 1972.
- [12] http://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_stygnięcia
- [13] <http://www.fermisparadox.com/>
- [14] Cassan et al.: *One or more bound planets per Milky Way star from microlensing observations*, Nature vol. 481, s. 167-169 (2012).
- [15] G. Cocconi, P. Morrison: *Searching for Interstellar Communications*, Nature vol. 184, no. 4690, s. 844-846 (1959).
- [16] <http://www.bigear.org/wow20th.htm>
- [17] <http://www.seti.org/>