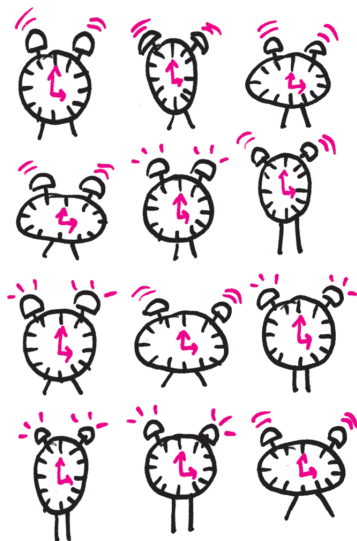


# Tachiony, czyli absolutna synchronizacja zegarów

Jacek CIBOROWSKI\*, Marta WŁODARCZYK\*\*



Michelson i Morley próbowali zmierzyć prędkość Ziemi względem eteru – hipotetycznego ośrodka, w którym miało rozchodzić się światło. W tym celu chcieli wykorzystać fakt, że światło w eterze rozchodzi się izotropowo. Jeśli więc Ziemia porusza się względem eteru, można to zweryfikować, porównując prędkość światła w różnych kierunkach. Do weryfikacji zbudowany został przyrząd zwany teraz interferometrem Michelsona. Składał się z dwóch prostopadłych ramion, w których biegły wiązki światła. Po odbiciu od zwierciadeł na końcach ramion wiązki wracały i interferowały ze sobą. W wyniku interferencji powstawał układ jasnych i ciemnych prążków, z których położenia można było odczytać różnicę prędkości światła w każdym z ramion. Eksperyment Michelsona–Morleya pokazał, że w obu ramionach światło porusza się z taką samą prędkością, należy jednak zwrócić uwagę, że *de facto* był to pomiar prędkości światła po drodze zamkniętej.

**Efekt Dopplera a względność ruchu.** Efekt Dopplera dla dźwięku jest powszechnie znanym zjawiskiem. Polega on na zmianie częstotliwości fali dźwiękowej odbieranej przez obserwatora wskutek wzajemnego ruchu źródła i odbiornika dźwięku. Jednak zmiana ta jest całkiem zastanawiająca. Gdy przyjrzymy się uważnie równaniom, okaże się, że jeżeli źródło dźwięku zbliża się do nieruchomego obserwatora z prędkością  $V$ , emitując dźwięk o częstotliwości  $f$ , obserwator zarejestruje częstotliwość  $f' = f \frac{c}{c-V}$  (gdzie  $c$  jest prędkością dźwięku w nieruchomym powietrzu). Natomiast gdy to obserwator będzie zbliżał się, z tą samą prędkością, do nieruchomego źródła, częstotliwość odebrana będzie wyrażona wzorem  $f' = f \frac{c+V}{c}$ . Czy ten wynik nie stoi w sprzeczności z zasadą względności ruchu? Przecież już w szkole podstawowej uczono nas, że na zjawiska fizyczne nie powinno mieć wpływu, który obiekt uznamy za ruchomy, a który potraktujemy jako punkt odniesienia?

Kluczem do rozwiązania tego problemu jest spostrzeżenie, że w przypadku rozważania ruchu fali dźwiękowej nie wszystkie układy odniesienia są równoprawne. Istnieje pewien *układ wyróżniony* – jest nim nieruchome powietrze. Wyróżnia go – w sensie fizycznym – fakt, że to właśnie powietrze jest ośrodkiem, w którym porusza się dźwięk. Jeśli układ odniesienia porusza się względem powietrza, ruch ten wpływać musi na prędkość rozchodzenia się dźwięku w tym układzie. A zatem, mierząc prędkość dźwięku w przeciwnych kierunkach, jesteśmy w stanie jednoznacznie stwierdzić, czy i z jaką prędkością poruszamy się względem układu wyróżnionego.

W podobny sposób Michelson i Morley próbowali ustalić, z jaką prędkością Ziemia porusza się względem eteru, hipotetycznego ośrodka, który miał być nośnikiem fal elektromagnetycznych. Jednak ich pomiar pokazał, że prędkość światła jest stała i izotropowa, w efekcie doprowadzając do powstania szczególnej teorii względności (STW) oraz odrzucenia hipotezy eteru. Czy słusznie?

**Prędkość dźwięku po drodze otwartej.** Zastanówmy się, w jaki sposób można wyznaczyć prędkość dźwięku w jedną stronę. Niech będzie dana platforma kolejowa o długości  $L$ , poruszająca się w nieruchomym powietrzu z prędkością  $V$  względem torów. Prędkość dźwięku w układzie odniesienia spoczywającym względem powietrza wynosi  $c$  – jest stała i izotropowa. Na przeciwległych krańcach platformy umieszczono nadajniki oraz odbiorniki dźwięku, emitujące i odbierające fale dźwiękowe przesyłane w obydwu kierunkach.

Przyjmijmy, że  $V \ll c$  oraz że obserwator na platformie ma znikający wymiar prostopadły do kierunku jej ruchu (jest dwuwymiarowy). Ruch powietrza nie będzie więc przez niego wyczuwalny. Dlatego taki obserwator, nie mając żadnych zewnętrznych punktów odniesienia, nie jest świadom faktu, że platforma porusza się względem torów ani że powietrze jest ruchome względem platformy. Czy może mimo wszystko ustalić to, wykonując pomiar prędkości dźwięku?

**Światło i dźwięk.** Załóżmy na początek, że obserwator na platformie ma do swojej dyspozycji laser. Ponieważ prędkość światła jest nieporównanie większa od prędkości dźwięku, może on dokonać w zasadzie *absolutnej* (natychmiastowej) *synchronizacji zegarów* na obu końcach platformy. Wystarczy, że ze środka platformy wyśle w kierunku obu zegarów impuls światła, ustawiający ich wskazania na 0. Po zsynchronizowaniu zegarów mierzy czas przelotu fali dźwiękowej w kierunku ruchu platformy oraz w kierunku przeciwnym i otrzymuje odpowiednio  $\Delta T_+$  i  $\Delta T_-$ . Porównując odczyty zegarów, wnioskuje, że prędkość dźwięku w kierunkach przeciwnych jest różna. Używając równań fizyki galileuszowskiej, nasz obserwator szuka metody ustalenia prędkości platformy względem powietrza. Zapisuje równania:

$$\frac{L \pm V \Delta T_{\pm}}{c} = \Delta T_{\pm} \quad \text{i} \quad c_{\pm} = \frac{L}{\Delta T_{\pm}},$$

\*Wydział Fizyki

Uniwersytetu Warszawskiego

\*\*Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytetu Łódzkiego

gdzie  $c_{\pm}$  to prędkość dźwięku, odpowiednio, w kierunku ruchu platformy i w przeciwnym. Rozwiązanie powyższych równań daje:

$$c_{\pm} = c \left( 1 \mp \frac{V}{c} \right) \quad \text{i ostatecznie:} \quad V = \frac{c_- - c_+}{2}.$$

Zauważmy, że w tym przypadku:

$$c = \frac{c_- + c_+}{2},$$

czyli prędkość dźwięku w nieruchomym powietrzu jest średnią prędkości  $c_+$  i  $c_-$ .

**Tylko dźwięk.** A jak sobie poradzić, gdy obserwator nie ma do dyspozycji lasera? Może wówczas użyć jedynie fal dźwiękowych, wiedząc, że prędkość dźwięku w nieruchomym powietrzu jest stała i izotropowa. Można spróbować zsynchronizować zegary analogicznie, umieszczając źródło fali pośrodku (punkt  $O$ ) platformy i wysyłając sygnał dźwiękowy jednocześnie w kierunku obu zegarów (nazwijmy je odpowiednio  $A$  i  $B$ ). W momencie dotarcia dźwięku do zegara zostaje on ustawiony na czas równy 0. Załóżmy, że (nieznane) prędkości dźwięku w jedną stronę spełniają zależność:  $c_+ < c_-$  (jak powyżej). Oczywiście jest, że sygnał dźwiękowy wyemitowany z  $O$  do  $B$  dotrze do celu później niż z  $O$  do  $A$ . W momencie gdy sygnał dźwiękowy restartuje zegar  $B$ , zegar  $A$  wskazuje:

$$\Delta t_A^{(0)} = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{c_+} - \frac{1}{c_-} \right).$$

Założmy, że w chwili, gdy  $B$  jest zresetowany, sygnał dźwiękowy zostaje wysłany z  $B$  do  $A$ , w celu pomiaru prędkości dźwięku z  $B$  do  $A$ . Gdy sygnał ten osiągnie zegar  $A$ , odczyt zegara będzie równy:

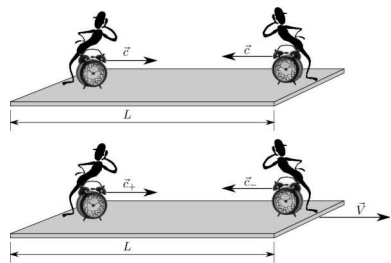
$$\Delta t_A^{(1)} = \Delta t_A^{(0)} + \frac{L}{c_-} = \frac{L}{2} \left( \frac{1}{c_+} - \frac{1}{c_-} \right) + \frac{L}{c_-}.$$

Zatem zmierzona prędkość od  $B$  do  $A$  wynosi:  $c_{BA} = L/\Delta t_A^{(1)}$ . Po elementarnych rachunkach otrzymujemy:

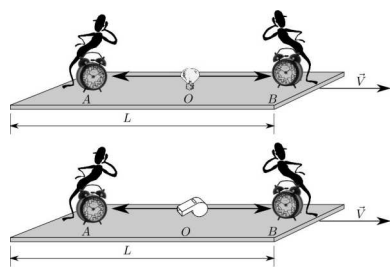
$$\frac{1}{c_{BA}} = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{c_+} + \frac{1}{c_-} \right).$$

Widzimy zatem, że eksperymentalnie zmierzona prędkość w jedną stronę jest w rzeczywistości średnią harmoniczną prędkości z  $A$  do  $B$  oraz z  $B$  do  $A$ , czyli prędkością po drodze zamkniętej  $ABA$  (mierząc prędkość z  $A$  do  $B$ , otrzymalibyśmy identyczny rezultat). Oznacza to, że niemożliwe jest zmierzenie prędkości  $V$  platformy względem torów czy nieruchomego powietrza przy użyciu jedynie sygnałów dźwiękowych, gdyż nie są one wystarczające do zmierzenia prędkości dźwięku w jedną stronę  $c_{\pm}$ . Obserwator, mający do dyspozycji jedynie falę dźwiękową, nie byłby w stanie eksperymentalnie zweryfikować, czy porusza się względem ośrodka, w którym ta fala się rozchodzi (układu preferowanego), czy też nie. Podobnie nie można na podstawie wyniku doświadczenia Michelsona–Morleya wyciągnąć wniosku, że układ wyróżniony nie istnieje. Dysponując jedynie falami świetlnymi, nie możemy tego zweryfikować, a wszystkie pomiary prędkości światła są *de facto* pomiarami po drodze zamkniętej.

**Podsumowanie.** Czy Natura wybrała układ wyróżniony? Odpowiedź na to pytanie jest na razie nieznana, choć istnieją przesłanki świadczące o tym, że może tak być. Kolejne pytanie, jakie się pojawia, brzmi: czy Natura dała nam narzędzia, dzięki którym możemy to zweryfikować? Aby znaleźć układ wyróżniony, trzeba dokonać pomiaru prędkości światła w przynajmniej dwóch kierunkach. Nie da się tego zrobić, mając do dyspozycji jedynie sygnały świetlne (lub obiekty poruszające się z prędkościami mniejszymi lub równymi prędkości światła). Jednak gdyby istniały tachiony, hipotetyczne cząstki nadświetlne, mogłyby one zostać wykorzystane do absolutnej (natychmiastowej) synchronizacji zegarów z dowolną dokładnością i pomiaru prędkości światła po drodze otwartej. Spełniałyby one podobną rolę jak wiązka światła laserowego przy pomiarze prędkości dźwięku w ruchomym powietrzu. Czy tachiony istnieją? Na to pytanie na razie również nie znamy odpowiedzi. Ale czy Natura byłaby na tyle złośliwa, by dać nam zjawisko bez narzędzi do jego zbadania?



Rys. 1. W nieruchomym powietrzu prędkość dźwięku jest stała i izotropowa, równa  $c$ . Ruch platformy wpływa na prędkość dźwięku w kierunkach zgodnym i przeciwnym do jej ruchu, mierzona w układzie odniesienia związanym z platformą.



Rys. 2. Synchronizacja zegarów za pomocą światła i dźwięku.



Tachiony to hipotetyczne cząstki poruszające się zawsze z prędkością większą niż światło względem dowolnego układu odniesienia. Aby je poprawnie opisać, trzeba posłużyć się inną konwencją synchronizacji zegarów (zwaną absolutną) niż powszechnie znana metoda Einsteina, prowadzącą do wyróżnienia pewnego układu odniesienia. Wówczas – inaczej niż w zazwyczaj rozważanej relatywistycznej mechanice kwantowej – można jednoznacznie zdefiniować kowariantny operator spinu.