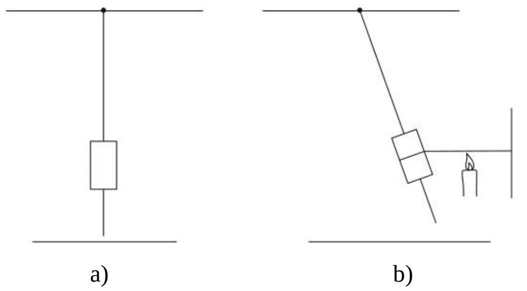
Wahadło Foucaulta – tajniki działania

Wojciech Winiarczyk
Instytut Fizyki UJ

Wstęp

Gdyby zaproponowano ułożenie listy najprostszych doświadczeń fizycznych, pewnym kandydatem do czołówki, może nawet doświadczeniem nr 1, byłoby to przedstawione na rys. 1: ciężarek zawieszony na nitce lub druciku, mogący się wahać. Przede wszystkim będzie można zaobserwować zmniejszanie się amplitudy wahań. Jeżeli wahadło nie zatrzyma się w ciągu kilkudziesięciu minut, możemy się spodziewać, że płaszczyzna wahań będzie się obracać w lewo z prędkością kątową, która dla Krakowa wynosi 11,5°/h.



Rys. 1. Schemat prostego doświadczenia z wahadłem (opis w tekście)

Rezultat takiego doświadczenia może jednak być dla nas zaskakujący. Po pewnym czasie ciężarek przestaje poruszać się w płaszczyźnie, a zaczyna ruch po elipsie, która precesuje. Powstawanie takich elips i ich precesja powodują, że obserwacja efektu Foucaulta jest bardzo utrudniona. Opiszmy to doświadczenie dokładniej. Weźmy drucik, np. stalowy o średnicy $\phi = 0,3$ mm, długości $l = 1$ m i ciężarek o masie $m = 1$ kg. Zawieśmy ciężarek tak, by mógł się swobodnie przemieszczać w ruchu wahadłowym. Do ciężarka dobrze jest zamocować ostro zakończony wskaźnik, a pod nim umieścić kartkę papieru z narysowaną linią prostą. Wychylamy ciężarek o ok. 10 cm i obserwujemy wahania. Kartkę papieru ustawiamy tak, by koniec wskaźnika przesuwał się wzdłuż narysowanej na niej linii. Po kilku minutach obserwacji widzimy, że amplituda zmalała; wskaźnik cały czas przesuwa się wzdłuż narysowanej prostej. Jednak po 15 minutach koniec wskaźnika zaczyna kreślić wąską elipsę. Później obserwujemy jak elipsa staje się szersza i zaczyna precesować. Kierunek precesji określamy umieszczając pod wahadłem zegarek i ustalając, czy ruch odbywa się zgodnie z kierunkiem ruchu wskazówek zegara, czy w kierunku przeciwnym; w skrócie zgodnie z zegarem lub przeciwnie. Kierunek obserwowanej przez nas precesji jest na ogół dla danego wahadła stały. Jeżeli weźmiemy inne wahadło, może on ulec zmianie. Zdarza się, że elipsa powstaje, ale nie precesuje. Zdarza się też, że elipsa przechodzi w koło.

Jeżeli podejrzewamy, że wahadło zostało „źle uruchomione", możemy zastosować sposób jak na rys. 1b. Podobnie jak Foucault, mocujemy wychylony ciężarek nitką do stabilnego przedmiotu, odczekujemy, aby ustały wszelkie ruchy ciężarka i przepalamy nitkę. Ciężarek zaczyna poruszać się stabilnym ruchem. Po pewnym czasie elipsa jednak i tym razem powstaje. Można zmienić drut na inny, o innej średnicy, zastosować, zamiast drutu, nić ze sztucznego tworzywa, zmienić rodzaj zawieszenia, np. na zawieszenie typu Cardana. Wcześniej czy później obserwujemy pojawianie się elipsy. Jeżeli wykonamy tych prób kilkadziesiąt lub nawet więcej, może się zdarzyć, że przy pewnej kombinacji parametrów opisujących wahadło, elipsa nie powstanie i obserwujemy efekt Foucaulta: płaszczyzna wahań obraca się zgodnie z zegarem, z prędkością 11,5°/h. Przypuszczamy, że w przestrzeni parametrów wahadła znaleźliśmy „wyspę Foucaulta". Następna próba pozbawia nas złudzeń. Elipsa pojawia się znowu. Powstawanie tych elips jest związane z różnymi asymetriami występującymi w układzie (asymetrie: struktury drutu, zawieszenia wahadła, jednorodności masy ciężarka). Ich powstawania nie unikniemy. Zrozumienie, od czego zależą kierunek i prędkości kątowe precesji tych elips, ma przy budowie wahadeł Foucaulta podstawowe znaczenie.

Pierwsze doświadczenie demonstrujące obrót dobowy Ziemi. Paryż rok 1851

Biografia Léona Foucaulta, z uwzględnieniem szerokiego tła historycznego epoki, została przedstawiona w interesującej książce Amira D. Aczela *Wahadło. Léon Foucault i tryumf nauki* [1]. Pomijając historię walki, jaką musiał stoczyć Foucault w staraniach o uznanie dla swoich prac ze strony społeczności akademickiej, przystąpmy do omówienia jego pracy dotyczącej wahadła. Zanim to zrobimy przedstawimy genezę pomysłu tego doświadczenia. Pochodzi ona z obserwacji pręta żelaznego zamocowanego poziomo w uchwycie tokarki i drgającego w pewnej płaszczyźnie. Intuicja podpowiada nam, że w przypadku powolnego obrotu uchwytu, płaszczyzna drgań też będzie się obracać. Jednakże przy obrocie uchwytu płaszczyzna ta nie ulega zmianie. Nasunęło to Foucaultowi myśl o rozważeniu zachowania się wahadła na biegunie Ziemi. Od opisu takiego właśnie doświadczenia myślowego rozpoczyna on swoją pracę, przedstawioną na posiedzeniu Paryskiej Akademii Nauk 3 lutego 1851 roku [2]. Jest to praca doświadczalna, której główne punkty przestawiamy poniżej. Po wyjaśnieniu, że na północnym biegunie Ziemi obserwuje się pełny obrót płaszczyzny wahań w czasie 24 godzin, zgodnie z zegarem, Foucault stwierdza, że dla innych szerokości geograficznych obrót płaszczyzny wahań wahadła odbywa się z częstością kołową $\omega = \omega_e \sin\varphi$, gdzie ω_e odnosi się do obrotu dobowego Ziemi, a φ jest szerokością geograficzną miejsca, w którym zawieszone jest wahadło. Wzór ten podany jest bez dowodu, ale wyjaśniono, że można go wyprowadzić stosując „metodę zarówno analizy, jak i metodę mechaniki i geometrii".

Doświadczenie wykonane w Paryżu, Foucault przeprowadził w piwnicy domu, w którym mieszkał. Wahadło miało długość 2 m, ciężarek masę m = 5 kg, stalowy drut średnicę 1 mm. Obserwacje efektu obrotu płaszczyzny wahań przeprowadzono w ciągu pół godziny, ale szczegółowo opisano doświadczenie przeprowadzone w ciągu 1 minuty. Eksperyment został powtórzony w Auli Południka Obserwatorium Paryskiego z wahadłem o długości 11 m. W zakończeniu wspomniano o zgodności dokonanych obserwacji z wynikami memoriału Poissona, w którym zajmował się on torami pocisków artyleryjskich.

Trzy problemy wymienione w powyższej pracy Foucaulta będą przedmiotem rozważań zawartych w dalszych częściach tego artykułu:

- wyprowadzenie wzoru $T = \dfrac{24\text{h}}{\sin\varphi}$,
- wyjaśnienie, dlaczego Foucault skupił się na opisie eksperymentu wykonywanego w ciągu 1 minuty,
- dlaczego eksperyment łatwiej wykonać używając długich i ciężkich wahadeł.

Pełny obrót płaszczyzny wahadła Foucaulta następuje w czasie $T = \dfrac{24\text{h}}{\sin\varphi}$

Rozpatrzmy, za Sommerfeldem [3], ruch wahadła w układzie nieinercjalnym xyz, związanym z obracającą się Ziemią (rys. 2a). Początek układu znajduje się w punkcie 0, którego szerokość geograficzna jest φ. Oś 0z skierowana jest wzdłuż kierunku lokalnego pionu, oś 0x stycznie do południka w kierunku na południe, a oś 0y na wschód. Wahadło ma długość l, ciężarek masę m. Aby zbadać ruch tego wahadła możemy skorzystać z równań Lagrange'a pierwszego rodzaju, które zapisane z uwzględnieniem więzów, w nieinercjalnym układzie xyz mają postać

$$m(\boldsymbol{a} + 2\boldsymbol{\omega}\times\boldsymbol{v}) = m\boldsymbol{g}_{ef} + \lambda_0 \operatorname{grad} f(x,y,z), \qquad f(x,y,z) = x^2 + y^2 + z^2 - l^2 = 0,$$

gdzie $\boldsymbol{a}$ – przyspieszenie, $\boldsymbol{v}$ – prędkość mierzone są w układzie nieinercjalnym xyz, λ_0 jest mnożnikiem Lagrange'a, a g_{ef} jest efektywnym przyspieszeniem ziemskim (jego kierunek pokrywa się z kierunkiem osi 0z). Równanie to po rozpisaniu na składowe w układzie xyz przyjmuje postać

$$\ddot{x} = +2u\dot{y} + \lambda x$$

$$\ddot{y} = -2u\dot{x} - 2u\dot{z} + \lambda y$$

$$\ddot{z} = -g_{ef} + 2u\dot{y} + \lambda z$$

gdzie $\lambda = 2\lambda_0 / m \approx -\frac{g_{ef}}{l}, \quad u = \omega_e \sin\varphi$.

Rozpatrując małe wychylenia (x, $y \ll l$) przyjmujemy $z \approx$ l oraz pomijając $\ddot{z}$ i $\dot{z}$ jako małe wyższych rzędów, otrzymujemy

$$\ddot{x} - 2u\,\dot{y} + \omega_0^2\,x = 0$$

$$\ddot{y} + 2u\,\dot{x} + \omega_0^2\,y = 0\,,$$

gdzie $\omega_0^2 \equiv g_{ef} / l$.

Równania te można połączyć mnożąc drugie przez jednostkę urojoną i, dodając stronami do pierwszego i wprowadzając nową zmienną $s = x + i y$

$$\ddot{s} + 2iu\dot{s} + \omega_0^2 s = 0$$

Równanie to rozwiązuje się standardowo

$$s = A_1 e^{i\alpha_1 t} + A_2 e^{i\alpha_2 t}\,,$$

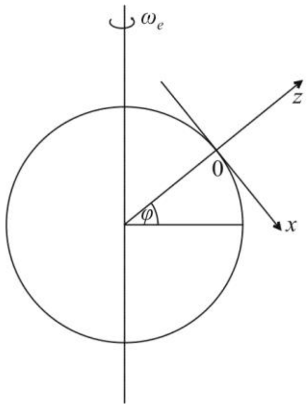
gdzie $\alpha_1 = (u^2 + \omega_0^2)^{1/2} - u, \qquad \alpha_2 = -(u^2 + \omega_0^2)^{1/2} - u.$

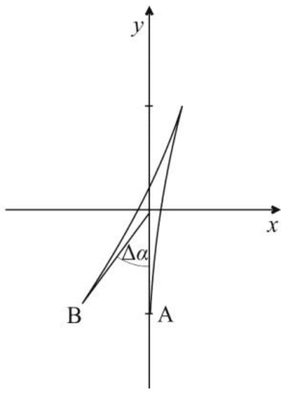
Dla $u \ll \omega_0 \quad \alpha_1 \approx -\alpha_2 \approx \omega_0$

Przyjmując, że w chwili $t = 0$

$x = a,\ y = 0, \quad \dot{x} = 0,\ \dot{y} = 0$ otrzymujemy

$$\dot{s} = -a\omega_0 e^{iut} \sin\omega_0 t$$





Rys. 2. a) Wybór nieinercjalnego układu *xyz* sztywno związanego z obracającą się Ziemią, b) Tor przebiegany na płaszczyźnie *x*0*y* przez wskaźnik wahadła

Miejsca zerowe tej funkcji określają chwile, w których wahadło ma zerową prędkość. Rzut toru na płaszczyznę $x0y$ pokazany jest na rys. 2b. Rozpoczynając ruch z punktu A, wahadło po czasie $T_0 = 2\pi/\omega_0$ znajdzie się w punkcie B, a kąt $\Delta\alpha = uT_0 = \omega_e T_0 \sin\varphi$. Obrót Ziemi wokół własnej osi następuje w czasie jednej doby gwiazdowej (86 146 s). Łatwo stąd obliczyć, że płaszczyzna wahadła dokona pełnego obrotu w czasie 86 146 s/sinφ. Przybliżając czas doby gwiazdowej przez 24 h otrzymujemy ostateczny czas obrotu płaszczyzny wahadła Foucaulta w postaci: 24 h/sinφ.

Wahadło sferyczne; precesja jego toru

Rozważmy teraz ruch wahadła zawieszonego w początku inercjalnego układu *xyz*, którego oś 0z jest skierowana pionowo w dół. Będziemy wybierać warunki początkowe tak, aby wahania nie ograniczały się do jednej płaszczyzny. Ruch będziemy opisywać, jak wyżej, za pomocą równań Lagrange'a pierwszego rodzaju, które po rozpisaniu na składowe w układzie inercjalnym *xyz* i dołączeniu równania więzów przyjmują postać

$$m\ddot{x} = \lambda x$$

$$m\ddot{y} = \lambda y$$

$$m\ddot{z} = mg + \lambda z$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - l^2 = 0$$

Korzystając z równania więzów, można z równania trzeciego obliczyć λ jako funkcję x i y, i po jej wstawieniu do dwu pierwszych równań otrzymujemy

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x\left(1 - d^2/l^2\right)^{1/2} + \frac{x}{l^2}\left(\dot{x}^2 + \dot{y}^2\right) + \frac{x}{l^4}\frac{(x\dot{x} + y\dot{y})^2}{\left(1 - d^2/l^2\right)} = 0$$

oraz analogiczne równanie dla y. W równaniach tych $d^2 = x^2 + y^2$, l – długość wahadła, g – przyspieszenie ziemskie, $\omega_0^2 = g/l$. Są to równania dokładne. Jeżeli ograniczymy się do badania małych wychyleń, to w pierwszym rzędzie przybliżeń przyjmują one formę

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

$$\ddot{y} + \omega_0^2 y = 0$$

Rozwiązanie ich można przedstawić w postaci

$$x = a\cos(\omega_0 t + \delta_1)$$

$$y = b\sin(\omega_0 t + \delta_2)$$

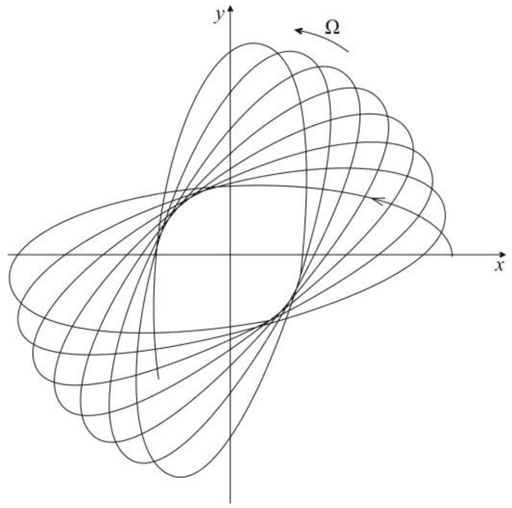
Dla $\delta_1 = \delta_2 = 0$, rozwiązanie przedstawia nieprecesującą elipsę o osiach a, b, skierowanych wzdłuż osi $0x$ i $0y$.

Jeżeli w przybliżeniach stosowanych do układu równań dokładnych zostawimy wyrazy kubiczne, otrzymamy

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x - \frac{1}{2}\omega_0^2 \frac{x}{l^2}(x^2 + y^2) + \frac{x}{l^2}(\dot{x}^2 + \dot{y}^2) = 0$$

oraz analogiczne równanie dla y [4].

Rozwiązania tego układu równań poszukuje się w formie precesującej elipsy. W tym celu przechodzi się do układu obracającego się wokół osi 0z z częstością Ω i pokazuje, że dla $\Omega = \frac{3}{8}\omega_0 \frac{ab}{l^2}$ ruch jest rzeczywiście eliptyczny. Kierunek precesji elipsy jest zgodny z kierunkiem ruchu po elipsie (rys. 3). Wielkości półosi a i b zależą od wybrania warunków początkowych. Zobrazujmy powyższe wzory kilkoma danymi liczbowymi. Częstość Foucaulta ω dla Krakowa (φ = 50°) wynosi $5{,}6\cdot 10^{-5}$ 1/s. Dla wahadła o długości l = 1 m, a = 10 cm, b = 1 mm wartość Ω jest $6{,}4\cdot 10^{-5}$ 1/s, a dla wahadła l = 50 m, a = 1,5 m, b = 0,15 m, $\Omega = 1{,}5\cdot 10^{-5}$ 1/s. Wynika z tych przykładów, że nawet dla długich wahadeł należy się liczyć z częstościami precesji porównywalnymi z częstościami Foucaulta.



Rys. 3. Precesja wahadła sferycznego

Ruch wahadła sferycznego przy wykorzystaniu współrzędnych sferycznych opisany jest np. w [5].

Czy można stosować wyniki uzyskane dla wahadła sferycznego w układzie inercjalnym dla rozważań związanych z wahadłem Foucaulta? Jest to procedura uświęcona tradycją. Opisowi wahadła sferycznego umieszczonego w układzie rotującym poświęcona jest praca [6].

Z przedstawionych powyżej rozwiązań wynika, że nie mogąc uniknąć powstawania elips możemy wybrać jedną z dwu metod ograniczenia ich wpływu na obserwację efektu Foucaulta. Możemy obserwować ten efekt w czasie tuż po uruchomieniu wahadła, kiedy elipsa jest jeszcze bardzo mała, tak jak zrobił to Foucault w swojej pracy z roku 1851. Możemy też do demonstracji efektu używać wahadeł długich, dla których Ω jest małe, tak jak zrobił to Foucault w swoich kolejnych pracach dotyczących jego wahadła.

Geografia wahadeł Foucaulta

Na świecie znajduje się ponad 300 dużych wahadeł Foucaulta. Ich rozkład na poszczególne kontynenty przedstawia poniższe zestawienie.

Afryka	6
Ameryka Północna	161
Ameryka Środkowa i Południowa	8
Antarktyda	1
Azja	26
Europa	108

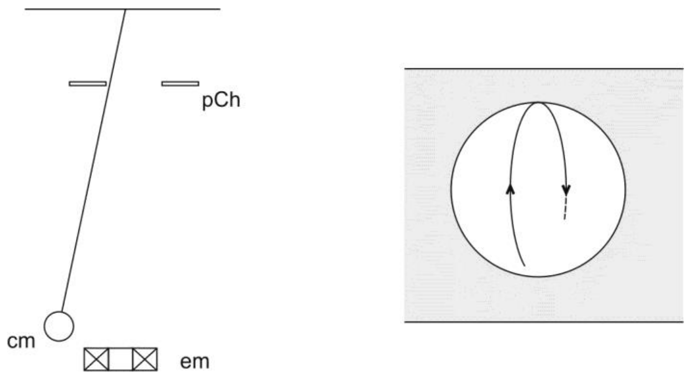
Niekwestionowanym liderem wśród poszczególnych krajów są Stany Zjednoczone posiadające 147 wahadeł. Najszybsze wahadło znajduje się na biegunie południowym w stacji badawczej Amundsen-Scott.

Oprócz wymienionych powyżej, w każdym kraju znajduje się bliżej nieokreślona liczba wahadeł pokazywanych podczas wykładów w salach uniwersyteckich i w szkołach średnich.

Pierścień Charrona

Wahadła, o których była mowa powyżej, są duże. Mają długości od dziesięciu do kilkudziesięciu metrów. To, chyba najsłynniejsze, w paryskim Panteonie, ma długość 67 m. Masy tych wahadeł wynoszą zwykle kilkadziesiąt kilogramów, ale najcięższe mają prawie tonę. Tak duża masa gwarantuje powolne zmniejszanie się amplitudy wahań, która nawet po kilku godzinach demonstracji pozostaje znaczna. Ich długość powoduje, że prędkość precesji elipsy, która zawsze się pojawi, jest niewielka.

W pracy opublikowanej w 1931 roku Charron pokazał, jak prosto można rozwiązać problem zmniejszania się amplitudy wahań i powstawania elips [7]. Na rys. 4a przedstawiono zaproponowaną przez niego konstrukcję. Do wahadła dodano płytkę z wyciętym w niej otworem, przez który przechodzi centralnie drut. Płytka umieszczona jest blisko punktu zawieszenia wahadła. W skrajnym wychyleniu drut dotyka krawędzi otworu, co pozwala uzyskać impuls uruchamiający elektromagnes. Ciężarek wahadła wykonany z miękkiego żelaza jest wtedy przyciągany do centrum i wahania są podtrzymywane. Okazało się także, iż otwór wykonany w formie pierścienia zapobiega powstawaniu elips. Schematycznie zostało to przedstawione na rys. 4b.



a) b)

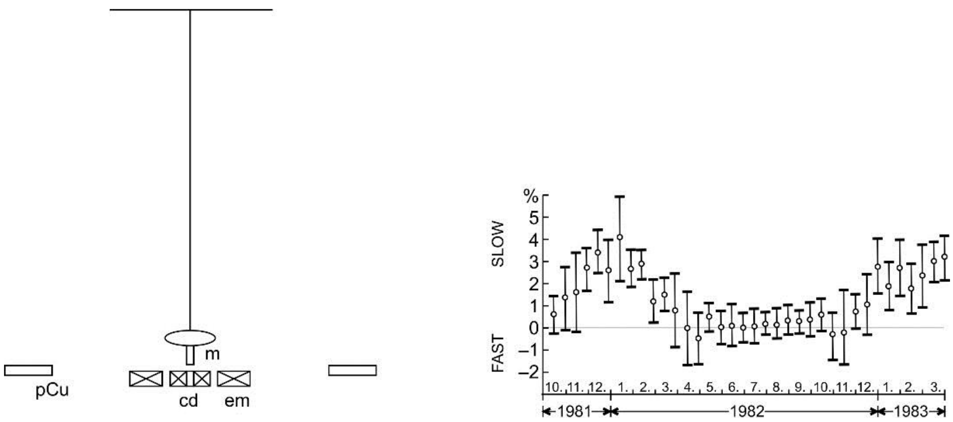
Rys. 4. a) Wahadło Charrona: pCh – pierścień Charrona, cm – ciężarek z miękkiego żelaza, em – elektromagnes; b) Tor drutu w płaszczyźnie pierścienia Charrona

W chwili, gdy poruszający się po elipsie drut dotyka krawędzi otworu, jego prędkość skierowana stycznie do krawędzi jest znacznie zmniejszana wskutek tarcia drutu o krawędź. Po kilku takich zetknięciach, wahadło przestaje poruszać się po elipsie. Tego typu rozwiązanie stosowane jest w wielu wahadłach, niekoniecznie krótkich, np. w wahadle znajdującym się w budynku ONZ w Nowym Yorku. W wahadle tym pierścień Charrona ukryto w konstrukcji zawieszenia i dlatego jest niewidoczny, natomiast widać go doskonale w wahadle znajdującym się w Centrum Nauki Kopernik w Warszawie.

Wahadło Foucault-Foucault

Tak można nazwać wahadło, które zostało zbudowane w Brown Boveri Research Center w Baden, w Szwajcarii [8]. Szkic jego budowy został przedstawiony na rys. 5. Pierścień Charrona zastąpiono miedzianą płytką w formie szerokiego pierścienia o promieniu wewnętrznym nieco mniejszym niż amplituda wahań ciężarka. Na spodzie ciężarka znajduje się magnes stały w formie krótkiego pręta, który przesuwając się nad centralnie umieszczoną cewką detekcyjną daje impuls elektryczny uruchamiający system elektroniczny. System ten służy do zasilania elektromagnesu podtrzymującego wahania, do zasilania dodatkowych cewek (nie zaznaczonych na rysunku) stabilizujących wielkość amplitudy wahań oraz do automatycznego pomiaru częstości efektu Foucaulta.

Magnes ciężarka wahadła przesuwając się nad miedzianym pierścieniem powoduje powstanie w nim prądów wirowych (prądów Foucaulta). Pierścień miedziany działa więc podobnie jak pierścień Charrona, ale bez kontaktu mechanicznego.



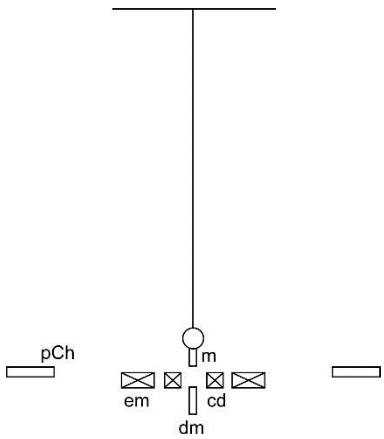
a) b)

Rys. 5. a) Wahadło Foucault-Foucault: pCu – pierścień z miedzi, cd – cewka detekcji sygnału, m – magnes stały w formie krótkiego walca, em – cewka elektromagnesu służąca do podtrzymywania drgań; b) Wykres przedstawiający odchylenia częstości zmierzonych od teoretycznych częstości Foucaulta, uzyskany w sekwencji kolejnych pomiarów trwających około półtora roku. Każdy punkt jest średnią, z zaznaczonym odchyleniem standardowym, z dziesięciu kolejnych pełnych rotacji [8].

Omawiana praca jest chyba jedyną pracą, w której można znaleźć wyniki pomiarów częstości efektu Foucaulta obejmujące dłuższy okres czasu: 18 miesięcy. Uzyskana w całym tym okresie dokładność pomiarów nie przekracza 6–7%; lepszą (1%) uzyskano dla wybranych miesięcy. Wydaje się, że są to najdokładniejsze pomiary efektu Foucaulta, jakie istnieją.

Krótkie wahadła Foucaulta

Osobną grupę stanowią wahadła krótkie o długościach poniżej 1 m. Istnieje kilka prac opisujących ich budowę [9, 10]. Wahadło przedstawione w [10] ma długość 70 cm i ciężarek o masie 5 kg. Nazwane jest wahadłem ściennym, bo jak zegar ścienny wisi na ścianie. W pracy tej zwrócono szczególną uwagę na wszystkie czynniki mające wpływ na powstawanie elips. W następnej wersji tej konstrukcji zastosowano zupełnie inne podejście do problemu precesujących elips [11]. Schemat wahadła został przedstawiony na rys. 6. Cewka detekcji przejścia magnesu ciężarka przez centrum i cewka elektromagnesu są podobne jak w pracy [8]. Pierścień Charrona znajduje się w dolnej części wahadła. Przyjmuje się, że jego działanie ogranicza, ale nie zapobiega całkowicie powstawaniu elips. Pogodziwszy się z ich istnieniem, zaproponowano sposób zlikwidowania ich precesji. Zauważono, że można to osiągnąć przez umieszczenie w pozycji jak na rys. 6 dodatkowego magnesu dm zwróconego w stronę magnesu wahadła tak, by magnesy te się odpychały. Zmieniając odległość między tymi magnesami można zatrzymać precesję elips. Przeprowadzone w ciągu kilku tygodni pomiary częstości efektu miały dokładność 2%.



Rys. 6. Schemat wahadła opisanego w pracy [11]: pCh – pierścień Charrona, m – magnes stały, dm – dodatkowy magnes stały, cd – cewka detekcji, em – cewka elektromagnesu

Opis teoretyczny wahadła sferycznego poddanego działaniu pola magnetycznego przedstawiono w pracy [12], w której do rozwiązania odpowiedniego równania Hamiltona-Jacobiego użyto techniki zmiennych działania i zmiennych kątowych.

Uwagi końcowe

Wahadło Foucaulta jest jednym z najbardziej spektakularnych widowisk, jakie fizyka może przedstawić społeczeństwu. Duża, majestatycznie płynąca w przestrzeni kula robi na każdym wrażenie. Najlepiej odczucia te oddał sam Foucault pisząc: „Zjawisko przebiega spokojnie, ale jest nieuniknione, nie do zatrzymania. Czujemy, widzimy jak się rodzi i jednostajnie narasta i nie jest w ludzkiej mocy ani go przyspieszyć ani spowolnić. Każdy człowiek, postawiony wobec tego faktu zatrzymuje się przez chwilę i trwa w zadumie i milczeniu, a potem wychodzi na zawsze unosząc ze sobą wyraźniejszą, ostrzejszą, bardziej przenikliwą świadomość naszego nieustannego ruchu w przestrzeni". Amir D. Aczel umieścił ten tekst jako motto swojej książki [1].

Oprócz tego, że wahadło Foucaulta jest wspaniałym widowiskiem, posiada także duże znaczenie dydaktyczne. Może służyć do ilustracji różnych technik rachunkowych używanych w mechanice klasycznej, od prostych do zaawansowanych.

Nie wszystkie cechy wahadła dało się uwzględnić w modelach teoretycznych. Żaden model nie uwzględnia tego, że wahadło jest „napędzane”, a proces ten może jakoś wpływać na jego zachowanie. Nie bardzo też wiadomo jak opisać różne asymetrie materiałowe i konstrukcyjne i następnie uwzględnić ich wpływ na ruch wahadła. Wahadło ma swoje tajemnice i pozostaje wyzwaniem zarówno dla teoretyków, jak i dla doświadczalników.

Pokazy wahadła Foucaulta gromadzą zawsze rzesze widzów. Przy takich okazjach zdarzają się sytuacje, które tworzą anegdotki. Na zakończenie przedstawimy jedną z nich.

Grupa turystów, wśród niej pewien profesor, zwiedzała muzeum historii naturalnej. Kiedy zatrzymali się przy wahadle Foucaulta, a przewodnik objaśniał zjawisko, jedna z pań półszeptem oświadczyła: „toż to jest *perpetuum mobile*, a sąsiadka mówiła, że takie nie istnieją”. Profesor, również półszeptem stwierdził, że to nie jest *perpetuum mobile*, ale pani replikowała, że przecież przewodnik mówi, że to się będzie tak długo obracać, jak długo obracać się będzie Ziemia. Profesor odpowiedział, że on się na tym zna, bo jest profesorem fizyki i ekspertem w dziedzinie mechaniki klasycznej. Gdyby zatrzymał na profesorze może i by mu się upiekło, ale kiedy pani dowiedziała się, że jest ekspertem, to na cały głos ujawniła, co ona sądzi o ekspertach, a już tych od mechaniki w szczególności. Grupa aktywnie ją poparła. Przewodnik zajął stanowisko neutralne. Profesor pozostałą część muzeum zwiedził w trybie indywidualnym. Wniosek z anegdotki ma charakter uniwersalny. Może i są zajęcia, które przynoszą godziwy dochód, ale nie oznacza to, że należy się nimi chwalić przy każdej okazji.

Spis literatury

[1] Amir D. Aczel, *Wahadło, Léon Foucault i tryumf nauki*, Prószyński i S-ka
[2] J.B.L. Foucault, *Compt. Rend. hebd. Seanc. Acad. Sci*. Paris **32**,135 (1851)
[3] A. Sommerfeld, *Mechanics*, Academic Press Inc., New York (1952)
[4] M.G. Olsson, *Am. J. Phys*. **49**, 531 (1981)
[5] G. Białkowski, *Mechanika klasyczna*, PWN (1975)
[6] M. de Icaza-Herrera, V.M. Castano, *Can. J. Phys*. **94**,15 (2016)
[7] M.F. Charron, *Compt. Rend. hebd. Seanc. Acad. Sci*. Paris **192**, 208 (1931)
[8] G. Mastner, V. Vokurka, M. Maschek, E. Vogt, H.P. Kaufmann, *Rev. Sci. Instrum*. **55**, 1533 (1984)
[9] H. Kruglak, *Phys. Teach*. **21**, 477 (1983)
[10] H.R. Crane, *Am. J. Phys*. **49**, 1004 (1981)
[11] H.R. Crane, *Am. J. Phys*. **63**, 33 (1995)
[12] K.T. Hecht, *Am. J. Phys*. **51**, 110 (1983)