

# FIZYKA

## w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

381 (LXIV) indeks 35810X Nr 4 lipiec/sierpień 2022 CENA 35,00 zł (w tym 8% VAT)

**Astronomiczna rachuba czasu**  
Czas słoneczny, gwiazdowy, strefowy

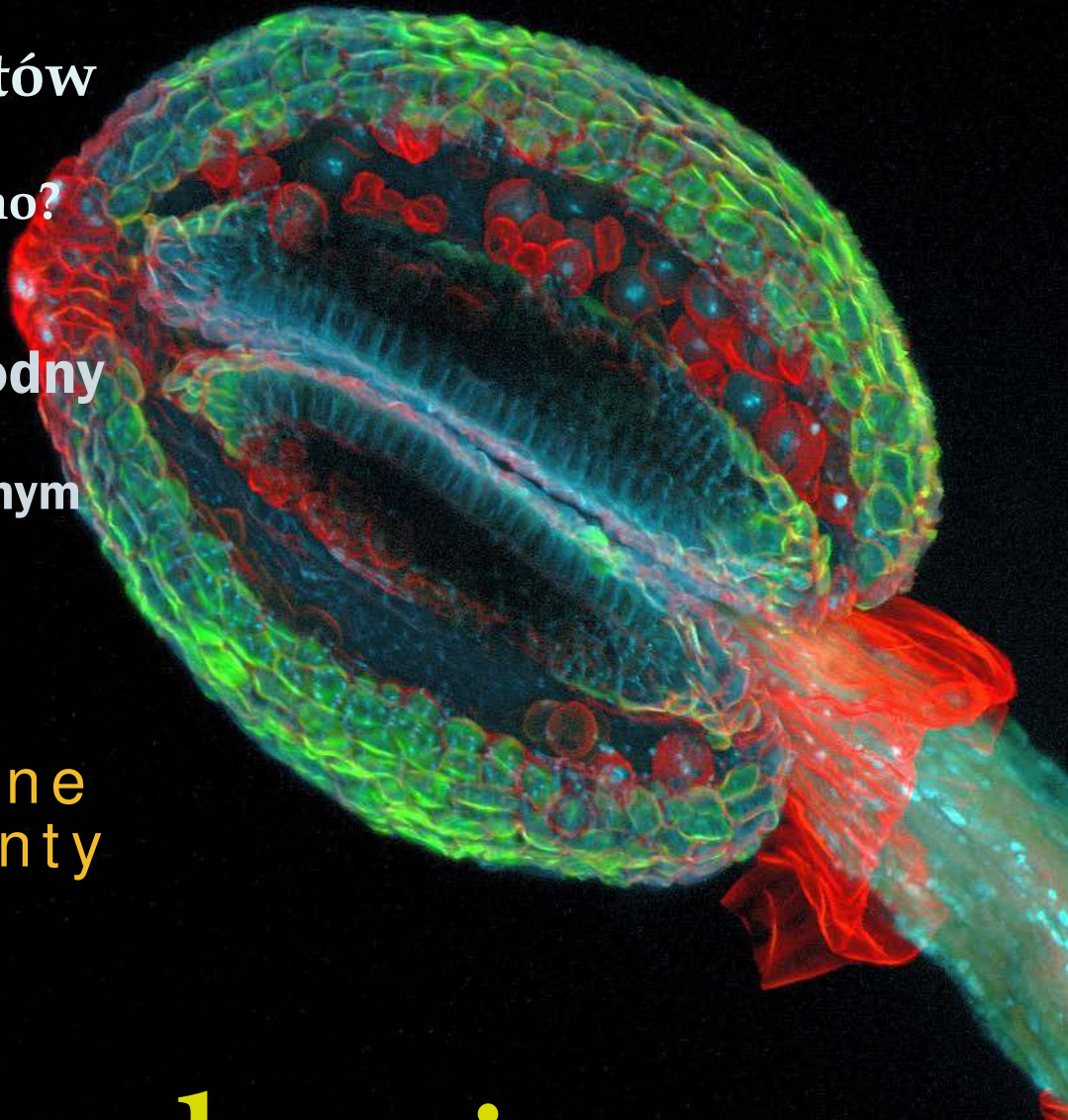
**Pogromcy mitów**  
Jak uczyć fizyki  
by nas rozumiano?

**Namiocik**  
lub parasol wodny  
czyli fizyka  
w zlewie kuchennym

**Wahadło**  
nie takie proste

Interaktywne  
eksperymenty

**Mikroskopia**  
fluorescencyjna i konfokalna



# Najlepsza lektura na jesień!



ROCZNIK 2021  
75% taniej!

Szczegóły i formularz zamówienia na [www.aspress.com.pl/roczniki/](http://www.aspress.com.pl/roczniki/)

eprasa.pl 2682b077bc

## Drodzy Czytelnicy!

**M**am przyjemność przekazać w Państwa ręce pierwszy powakacyjny numer „Fizyki w Szkole”. Kiedyś Mickiewicz mówił, że wiara i czucie silniej mówi do niego niż mędrca szkielko i oko. O jakim szkiele mógł myśleć? Ogólnie chodziło o soczewki. W pierwszym rzędzie mogło chodzić o soczewki wmontowywane w lunety. Ten holenderski wynalazek nie tylko miał wpływ na sztukę wojenną i nawigację, lecz także zmienił obraz Wszechświata. Holendrzy są też wynalazcami innego przyrządu, w którego skład wchodzi soczewki. Tym przyrządem jest mikroskop. Na salony światowej nauki wprowadził go Antoni van Leeuwenhoek.

Mimo, że jest to dość stary wynalazek, to jednak wciąż się rozwija. Opracowywane są nowe techniki obrazowania, a wielkim przełomem w mikroskopii było wprowadzenie kamery CCD i technik komputerowych. Jedną z nowych technik mikroskopii są mikroskopia fluorescencyjna i mikroskopia konfokalna. Jest nim poświęcony artykuł Tadeusza Kubiaka „Mikroświat w powiększeniu”, do którego lektury serdecznie zapraszam.

W tym wydaniu większość artykułów poświęconych jest dydaktyce, co jest zrozumiałe biorąc pod uwagę, że zaczyna się kolejny rok szkolny. Jak uczyć by nas rozumiano – pyta w artykule pod tym tytułem Przemysław Krakowiak. Odpowiedź może Was zaskoczyć.

Jeśli ktoś będzie szukał inspiracji do doświadczeń i eksperymentów znajdzie je w artykule Stanisława Bednarka „Namiocik wodny” i Andrzeja Sokolowskiego „Interaktywne eksperymenty”

Polecamy też artykuł problemowy Jana Kurzyka – „Wahadło nie takie proste”, w którym autor omawia dokładnie zagadnienie drgań kulki zawieszona na sznurku. Kulka nie jest tak naprawdę wahadłem matematycznym, bo takiego nie ma, ale wahadłem fizycznym i to tłumionym. Jeśli któryś z czytelników będzie kiedyś na Politechnice Warszawskiej w Laboratorium Fizyki I, to z pewnością natknie się na to ćwiczenie, a wtedy wiedza zawarta we wspomnianym artykule z pewnością mu się przyda.

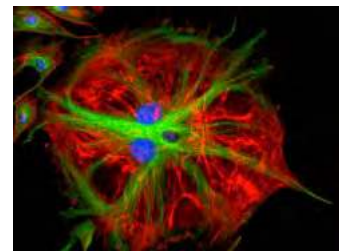
Kończąc tradycyjnie życzę udanej lektury!

W imieniu redakcji  
Zbigniew Wiśniewski

## Fizyka wczoraj, dziś, jutro

### 4 Mikroświat w powiększeniu, czyli tajniki mikroskopii fluorescencyjnej i konfokalnej | Tomasz Kubiak

Klasyczna mikroskopia optyczna przyczyniła się do fundamentalnych odkryć w zakresie nauk biomedycznych. Prawdziwym przełomem okazało się jednak wprowadzenie do laboratoriów mikroskopów fluorescencyjnych.



## Z naszych lekcji

### 12 Namiocik lub parasol wodny, czyli fizyka w zlewku kuchennym | Stanisław Bednarek

### 16 Jak uczyć by nas rozumiano? | Przemysław Krakowiak

Jest tylko jedna rzecz, która dotrze do uczniów lepiej niż nauka – popkultura. Dlatego szukajmy przykładów w filmach, muzyce, sprawdzając to, co możliwe lub niemożliwe, ale popularne w Internecie.



### 18 CREDO-Maze: promieniowanie kosmiczne a fizyka cząstek elementarnych | Tadeusz Wibig

### 25 Albert Einstein (1879-1955) – ruchy Browna | Tadeusz Wibig

### 28 Interaktywne eksperymenty badające zmianę długości i prędkości fali świetlnej | Andrzej Sokolowski

### 31 Wahadło nie takie proste | Jan Kurzyk

Wykonując z uczniami lub studentami ćwiczenie, którego celem jest wyznaczenie wartości przyspieszenia ziemskiego za pomocą wahadła korzystamy zwykle ze wzoru na okres drgań harmonicznym wahadła prostego zwanego też wahadłem matematycznym. Tym samym godzimy się na to, że popełniamy szereg błędów systematycznych będących konsekwencją zastosowanych przybliżeń.

### 39 Tarcie toczone czy raczej opór toczone? (Miniatura dydaktyczna) | Waldemar Reńda

### 40 Kilka uwag o nauczaniu fizyki w oparciu o raport Johna Hattiego | Kazimierz Mikulski

## Astronomia dla każdego

### 46 Astronomiczna rachuba czasu. Cz. 1 | Marcin Wesołowski

Astronomia jest jedną z najstarszych nauk zajmujących się wyjaśnianiem i analizą ruchów ciał niebieskich. Jednym z fundamentalnych problemów astronomii jest astronomiczna rachuba czasu



**FIZYKA**  
w Szkole z Astronomią

NUMER 4 LIPIEC/SIERPIEŃ 2022  
381 (LXIII) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 35,00 zł  
(w tym 8% VAT)

**Komitet redakcyjny** Krystyna Jabłońska-Ławniczak, Jerzy Kreiner, Andrzej Majhofer (Przewodniczący Komitetu), Zygmunt Mazur, Andrzej Szymacha, Mirosław Trociuk  
**Redakcja** Zbigniew Wiśniewski (redaktor prowadzący – fizyks@wp.pl) **Adres redakcji** ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa **Wydawnictwo** Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244, www.aspress.com.pl, NIP: 951-134-91-51 **Wydawca i redaktor naczelny** Józef Szewczyk, szewczyk24@gmail.com **Prenumerata** www.aspress.com.pl/prenumerata/, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244 **Reklama** Jędrzej Chodakowski, jchodakowski1953@gmail.com **Skład i łamanie** ScanSystem.pl Ewa Szelażyńska **Druk i oprawa** Paper & Tinta, ul. Ceglana 34, 05-270 Nadma

Zdjęcie na okładce: Dreamstime

Redakcja nie zwraca nadesłanych materiałów, zastrzega sobie prawo formalnych zmian w treści artykułów i nie odpowiada za treść płatnych reklam.

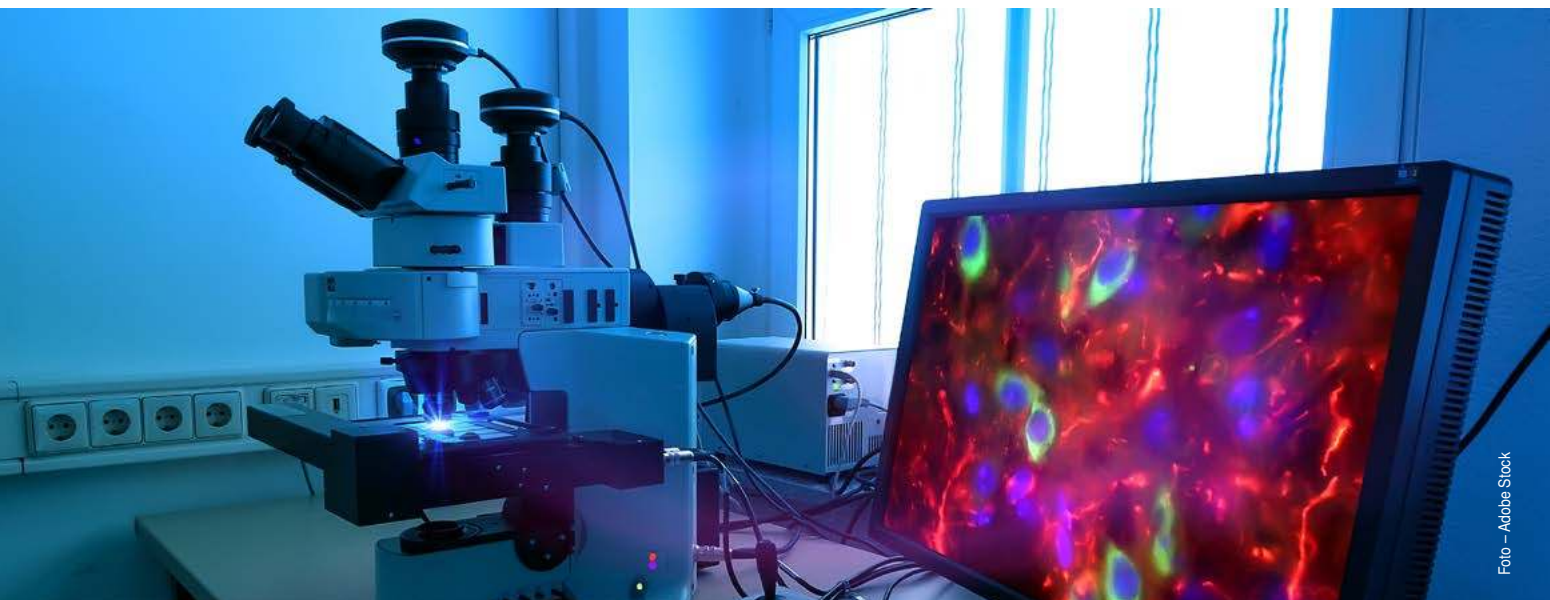


Foto – Adobe Stock

## Mikroświat w powiększeniu, czyli tajniki mikroskopii fluorescencyjnej i konfokalnej

Klasyczna mikroskopia optyczna przyczyniła się do fundamentalnych odkryć w zakresie nauk biomedycznych. Prawdziwym przełomem okazało się jednak wprowadzenie do laboratoriów mikroskopów fluorescencyjnych.

Tomasz Kubiak

Mikroskopia optyczna to jedna z najlepszych i najpopularniejszych technik obserwacji mikroświata. Proste, znane nam z podręczników szkolnych mikroskopy świetlne w profesjonalnych laboratoriach coraz częściej zastępowane są przez nowoczesną aparaturę fluorescencyjną i konfokalną. Umożliwia ona nie tylko poznawanie budowy komórek, organelli oraz rozmaitych mikrostruktur, ale przede wszystkim śledzenie procesów zachodzących w mikroskali w żyjących organizmach.

Zaawansowane urządzenia dostarczają badaczom zdjęcia o niezwykle wysokiej jakości i rozdzielczości. Pozwalają również nagrywać sekwencje wideo, a dzięki oprogramowaniu komputerowemu tworzyć rekonstrukcje 3D oraz przeprowadzać zautomatyzowane analizy. Wiele spektakularnych odkryć z zakresu nauk przyrodniczych i medycznych zawdzięczamy wciąż udoskonalanym metodom mikroskopii fluorescencyjnej oraz konfokalnej. Spróbujmy zatem zgłębić ich tajniki. Przed omówieniem podstaw fizycznych współczesnych technik, wykorzystywanych do prowadzenia obserwacji obiektów biologicznych, warto nawiązać nieco do historii.

### Historia obserwacji mikroskopowych w biologii i medycynie

W 1590 r. dwaj optycy okularowi z Holandii Hans i Zacharias Janssen zbudowali pierwszy mikroskop świetlny oferujący 10-krotne powiększenie. Składał się z trzech połączonych teleskopowo tub a na jego przeciwnych

końcach zamontowano soczewki, pełniące rolę obiektywu i okularu. Konstrukcję oczywiście w kolejnych dziesięcioleciach udoskonalano. Robert Hooke w swoim opublikowanym w styczniu 1665 roku, słynnym dziele „Micrographia” zamieścił ilustracje owadów (np. pchły) i roślin (tkanki z dębu korkowego), sporządzone na podstawie własnych, pionierskich obserwacji mikroskopowych. Co ciekawe, jest to pierwsza książka, zawierająca termin „komórka” w znaczeniu biologicznym.

Z kolei jednym z najwcześniej opisanych w literaturze medycznych zastosowań mikroskopu były badania włoskiego lekarza Giovanni Cosimo Bonomo z 1687 roku. Przyrząd optyczny pozwolił mu odkryć świerzbowca ludzkiego (pasożytnicze roztocze drążące tunele w warstwie rogowej naskórka) w próbce pobranej osobie ze świadem skóry. W historii utrwaliła się też postać Antoniego van Leeuwenhoek (1632 - 1723), wielkiego propagatora a jednocześnie konstruktora mikroskopów optycznych, cechujących się dużym powiększeniem. Choć wspólnie z naukowcem ten, ze względu na swój dorobek związany z obserwacjami mikroorganizmów, uznawany jest za „ojca mikrobiologii”, w czasach jego naukowej aktywności sytuacja przedstawiała się zgoła odmiennie, gdyż wielu ówczesnych medyków traktowało przełomowe prace ze sceptycyzmem albo w ogóle je ignorowała.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Niestety, rozwój medycyny przez wiele stuleci hamowany był przez panujące wśród lekarzy zabobony oraz odrzucenie metod empirycznych, co barwnie opisuje Nathan Belofsky w książce „Jak dawniej leczono, czyli plomby z mchu i inne historie” (Warszawa, 2019).

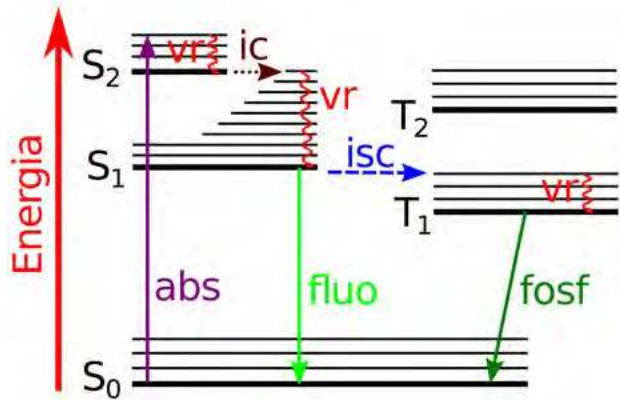
Dziś na szczęście nikt nawet nie wyobraża sobie prowadzenia badań z zakresu nauk biomedycznych bez wykorzystania nowoczesnych mikroskopów, które stanowią nieodłączny element wyposażenia każdego poważnego laboratorium. Klasyczny mikroskop pracujący w świetle przechodzącym nie jest jednak optymalnym narzędziem pracy dla biologa czy biofizyka. Wymaga bowiem przygotowania cienkich, utrwalonych preparatów, a niewielkie różnice w absorpcji światła przez poszczególne (niemal przezroczyste) struktury tkankowe nie zapewniają optymalnego kontrastu. Potrzebne są zatem bardziej zaawansowane rozwiązania.

## Obrazowanie fluorescencyjne

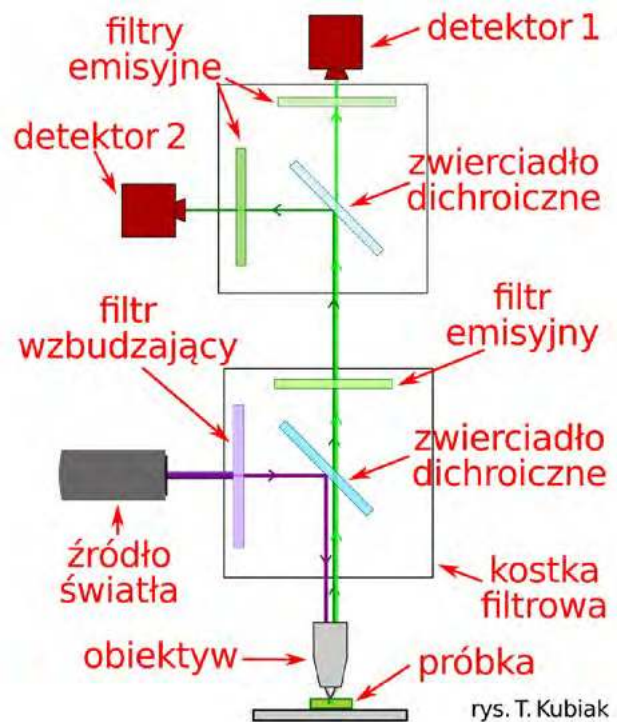
Klasyczna mikroskopia optyczna przyczyniła się do fundamentalnych odkryć w zakresie nauk biomedycznych. Prawdziwym przełomem okazało się jednak wprowadzenie do laboratoriów mikroskopów fluorescencyjnych. Samo zjawisko fluorescencji, czyli krótkiej (zanikającej zazwyczaj po  $10^{-9}$  –  $10^{-7}$  s) emisji światła przez substancję wzbudzoną wcześniej w wyniku pochłonięcia promieniowania elektromagnetycznego, opisał już w 1852 r. irlandzki fizyk George Gabriel Stokes.<sup>2</sup> Student, zdobywający wiedzę z zakresu biofizyki, w pierwszej kolejności przywołają również postać wybitnego Polaka, Aleksandra Jabłońskiego, którego słynny diagram analizowali wielokrotnie na wykładach i ćwiczeniach.<sup>3</sup> Przypomnijmy tylko, że diagram Jabłońskiego (rys.1) obrazuje rozmieszczenie poziomów energetycznych cząsteczki oraz przejścia między nimi.

W kontekście niniejszego artykułu najistotniejsze są procesy: absorpcji kwantu promieniowania elektromagnetycznego (wzbudzenia cząsteczki) oraz fluorescencji (powrotu do stanu podstawowego). Warto pamiętać, że wyemitowany foton posiada mniejszą energię niż pochłonięty, a przesunięcie pasma emisji (w stronę większych długości fali) względem pasma absorpcji nazywane jest przesunięciem Stokesa. Jeśli w badanej próbce biologicznej znajdują się odpowiednie barwniki (fluorofory), możliwe jest jej obrazowanie fluorescencyjne. W przypadku tradycyjnego mikroskopu epifluorescencyjnego (rys.2) światło generowane przez źródło trafia poprzez układ filtrów optycznych, lusterek dichroicznych i obiektyw na preparat, w którym wzbudza obecne tam fluorofory. Wyemitowane przez nie światło zbierane jest następnie przez obiektyw i przechodząc przez filtry emisyjne dociera do detektora. Pierwszy tego typu mikroskop zbudowali Otto Heimstaedt and Heinrich Lehmann w latach 1911 – 1913.

Kolejnym przełomem, tym razem na miarę Nagrody Nobla, okazało się odkrycie (w 1962 r.) oraz późniejsze wyizolowanie z organizmu meduzy *Aequorea Victoria* białka GFP (*ang. Green Fluorescent Protein*).<sup>4</sup> Wykazuje ono jaskrawozieloną fluorescencję po ekspozycji na światło z zakresu od niebieskiego do ultrafioletu. Geny kodują-



Rys. 1 Uproszczony diagram Jabłońskiego obrazuje niektóre przejścia pomiędzy stanami energetycznymi cząsteczki. Poszczególne skróty oznaczają:  $S_0$  - singletowy stan podstawowy;  $S_1$  i  $S_2$  - stany wzbudzone singletowe,  $T_1$  i  $T_2$  - stany wzbudzone trypletowe; fluo - fluorescencja; abs - absorpcja; fosf - fosforescencja; ic - konwersja wewnętrzna (przejście bezpromieniste), vr - relaksacja wibracyjna; isc - przejście międzystemowe (interkombinacyjne, bezpromieniste).



Rys. 2 Schemat budowy mikroskopu epifluorescencyjnego i biegu wiązek światła w przypadku wzbudzenia dwóch różnych fluoroforów.

ce GFP (i jego liczne modyfikacje) są obecnie często wykorzystywane jako tzw. geny reporterowe, wprowadzane sztucznie do innych organizmów. Białko fluorescencyjne może być zatem syntetyzowane bezpośrednio w badanych komórkach, stanowiąc swoisty marker optyczny.

Popularną opcję stanowi również ustalanie losów wybranych białek w środowisku biologicznym dzięki ich fuzji z GFP. Wykorzystanie zjawiska fluorescencji pozwala

<sup>2</sup> Więcej o dokonaniach Stokesa przeczytać można w artykule: George R. Ceredig, Gabriel Stokes as a biologist, Phil. Trans. R. Soc. A 378 (2020): 20200105.

<sup>3</sup> Historyczne dzieło Jabłońskiego zostało opublikowane w czasopiśmie Nature (A. Jabłoński, Efficiency of Anti-Stokes Fluorescence in Dyes, Nature 131 (1933), 839-840.

<sup>4</sup> O. Shimomura, M. Chalfie i R. Tsien otrzymali w 2008 r. Nagrodę Nobla z chemii za odkrycie i prace nad rozwojem zielonego białka fluorescencyjnego GFP.



Fot. 1 Nowoczesny, kompaktowy mikroskop fluorescencyjny umożliwia prowadzenie pomiarów nawet w jasno oświetlonych pomieszczeniach.

zatem nie tylko na dokładne obrazowanie wybranych struktur tkankowych, ale również badanie dynamiki poszczególnych organelli a nawet śledzenie ruchu pojedynczych makromolekuł. Określone fluorofory mogą bowiem przyłączać się do kwasów nukleinowych, polipeptydów, lipidów czy polisacharydów. Znakowane są też przeciwciała monoklonalne zdolne do rozpoznawania antygenów na powierzchni szkodliwych komórek oraz łączenia się z nimi z dużą specyficznością.

Z punktu widzenia nauk biomedycznych najważniejszy jest fakt, że współczesna mikroskopia fluorescencyjna umożliwia prowadzenie badań przyżyciowych. Monitorując stężenia rozmaitych jonów obecnych w cytoplazmie czy obrazując procesy migracji lub proliferacji komórek, zgłębia się zatem tajniki funkcjonowania żywych organizmów, co nie byłoby możliwe w przypadku klasycznych metod optycznych i utrwalonych wcześniej preparatów. Co ciekawe, nowoczesne mikroskopy (takie, jak przedstawiony na fot. 1) pozwalają przeprowadzić obrazowanie

fluorescencyjne nawet w jasno oświetlonym laboratorium, gdyż próbka umieszczana jest w specjalnym przedziale wbudowanym w korpus urządzenia. Aby otrzymać wysokiej jakości obrazy fluorescencyjne z doskonałym kontrastem nie trzeba zatem pracować w ciemni.

Podstawę systemu detekcji stanowi często kamera z matrycą CCD (od ang. *charge-coupled device*), złożoną z regularnego układu niezależnych elementów światłoczułych.<sup>5</sup> Ładunek elektryczny zebrany przez każdy z takich pojedynczych fotodetektorów (kondensatorów MOS) jest proporcjonalny do natężenia padającego światła. Sygnały odczytane ze wszystkich komórek pamięci matrycy CCD po wzmocnieniu i przekonwertowaniu do postaci cyfrowej tworzą obraz wynikowy. Problem stanowić może niepożądany szum, rejestrowany nawet wówczas, gdy urządzenie nie zbiera żadnego światła. Wzrasta on, gdy układ elementów światłoczułych się nagrzewa. Aby do tego nie dopuścić, matrycę chłodzi się np. do temp. o 25°C niższej od temp. otoczenia z wykorzystaniem modułów Peltiera.<sup>6</sup>

Pojedynczy moduł złożony jest z dwóch równoległych, cienkich płytek ceramicznych, pomiędzy którymi umieszczone są naprzemiennie elementy półprzewodnikowe typu p i n (połączone szeregowo). Nie wchodząc w szczegóły, można powiedzieć, iż podczas przepływu prądu przez taki układ na jednej z powierzchni ogniwa Peltiera zachodzi pobieranie ciepła (pozwalające na chłodzenie sensora CCD) a na drugiej jego oddawanie do radiatora. Zmniejszone generowanie szumu oraz wysoka czułość nowoczesnych mikroskopów umożliwiają obrazowanie fluorescencyjne nawet przy niewielkiej ilości światła wzbudzającego. Pozwala to ograniczyć tzw. fotowysyblanie (fotochemiczną degradację fluoroforów), ma także znaczenie w przypadku komórek podatnych na fototoksyczność.

W przypadku wrażliwych próbek biologicznych wzbudzenie cząsteczki barwnika fluorescencyjnego można przeprowadzić również w wyniku prawie jednoczesnego pochłonięcia dwóch fotonów promieniowania z zakresu podczerwieni, zamiast tradycyjnej absorpcji pojedynczego kwantu promieniowania ultrafioletowego. Wykorzystując ten efekt mikroskopię dwufotonową opisał w 1990 roku niemiecki fizyk Winfried Denk w słynnym artykule opublikowanym w czasopiśmie *Science*.<sup>7</sup> Technika bazowała na wykorzystaniu ciągu impulsów laserowych o czasie trwania 100 fs i częstotliwości powtarzania 80 MHz, co pozwalało zwiększyć prawdopodobieństwo wspomnianego już jednoczesnego pochłonięcia pary fotonów o dłuższych falach. Warto przypomnieć, iż zastosowanie promieniowania o niższej energii minimalizuje ryzyko wystąpienia uszkodzeń fotochemicznych i fototermicznych w żywych komórkach.

W mikroskopie fluorescencyjnym źródłem światła jest zazwyczaj zestaw diod elektroluminescencyjnych (LED) zdolnych do emisji stosunkowo szerokiego pas-

<sup>5</sup> Informacje o detektorach CCD można znaleźć w pracy J. Parzych i inni „Matryce światłoczułe -właściwości, parametry, zastosowania”, Poznan University of Technology Academic Journals. Electrical Engineering 92 (2017), 189-203.

<sup>6</sup> Moduł do chłodzenia wykorzystuje tzw. efekt Peltiera, czyli zjawisko termoelektryczne zaobserwowane po raz pierwszy w 1834 roku przez francuskiego fizyka Jeana Peltiera.

<sup>7</sup> W. Denk, J. H. Strickler, W.W. Webb, Two-Photon Laser Scanning Fluorescence Microscopy, *Science* 248(4951), (1990), 73-76.

ma fal elektromagnetycznych począwszy od UV poprzez światło widzialne aż do bliskiej podczerwieni.<sup>8</sup> Ten ostatni zakres pozwala obrazować komórki nawet w głębiej położonych tkankach. Światło z lampy przechodzi przez filtr wzbudzający (pasmowy, przepuszczający, jak sama nazwa wskazuje, tylko składowe widmowe w przedziale częstotliwości potrzebny do wzbudzenia wybranych barwników) a następnie przez zwierciadło dichroiczne (ustawione pod kątem  $45^\circ$ ) zostaje skierowane do obiektywu i dalej na obiekt (jak pokazuje rys.2).

Warto zwrócić uwagę, że w przeciwieństwie do klasycznej mikroskopii optycznej tutaj nie rejestruje się promieniowania przechodzącego przez bardzo cienki preparat, ale wykorzystuje układ *epi-*, w którym wzbudzenie i detekcja zachodzą po tej samej stronie próbki. Wspomniane wcześniej zwierciadło dichroiczne odbija krótszą falę wzbudzającą, ale selektywnie przepuszcza w stronę detektora dłuższą falę wyemitowaną przez fluorochromy.

Nietrudno domyślić się, że większe przesunięcie Stokesa, wynikające z właściwości zastosowanego znacznika fluorescencyjnego, będzie w tym wypadku pożądane, gdyż pozwoli łatwiej odseparować od siebie obie fale

światłne. W wymienialnej kostce filtrowej, umieszczonej w korpusie mikroskopu, znajduje się również filtr barierowy, czyli kolejny ważny element, zapobiegający dostawaniu się światła wzbudzającego do detektora.

Warto mieć na uwadze, iż filtry stawiane na drodze wiązki zmniejszają natężenie światła. W szczególności w przypadku słabego światła fluorescencji może to wpływać na jasność obrazu, stąd filtry emisyjne są zazwyczaj długoprzepustowe (przechodzi przez nie całe widmo emisji). W bardziej zaawansowanej sytuacji, gdy w pomiarach śledzimy jednocześnie dwa odmienne znaczniki fluorescencyjne, wyemitowane światło rozdziela się na dwa zakresy długości fal z wykorzystaniem następnego zwierciadła dichroicznego (patrz ponownie rys.2). Każda z odseparowanych wiązek przechodzi potem przez kolejny filtr emisyjny i trafia do osobnej kamery. Jeśli natomiast fluorochromy byłyby więcej lub ich widma nachodziłyby na siebie, istnieje jeszcze opcja przeprowadzenia analizy spektralnej połączonej z zaawansowanymi metodami analizy obrazów.

Podczas pracy z mikroskopem fluorescencyjnym przeznaczonym do zastosowań biomedycznych wykorzystuje

<sup>8</sup> Dawniej w mikroskopach fluorescencyjnych stosowano lampy ksenonowe lub rtęciowe. Tematowi oświetlenia w mikroskopach optycznych poświęcony jest artykuł Xin Yang „The Trend Toward LED Illumination in Microscopy Applications” z 23.02.2017, opublikowany na <https://www.olympus-ims.com/en/insight/led-illumination-in-microscopy-applications/> (dostęp z 5.08.2022).



Fot. 3. Fotografia mikroskopem z zoomem

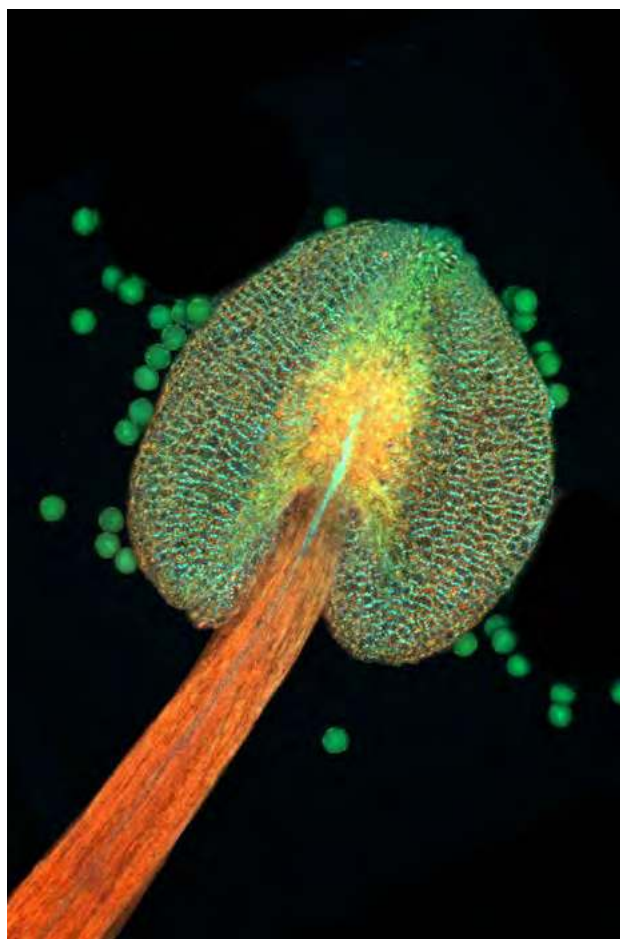


Foto – Dreamstime, Adobe Stock

Fot. 4. Z lewej – pylnik rzodkiewnika pospolitego (*Arabidopsis thaliana*), z prawej – mucha owocówka, pod mikroskopem fluorescencyjnym

się obiektywy o powiększeniu od 2 do 100 x. Przykładowa odległość robocza wynosi wówczas od 8,5 mm (zoom 2x) do 0,13 mm (zoom 100x). Warto wspomnieć, że parametr ten, oznaczony na obudowie symbolem W.D. (od ang. *working distance*), maleje wraz ze wzrostem powiększenia i wskazuje odległość mierzoną od czoła soczewki do próbki w punkcie ostrości obrazu.

Praca z wykorzystaniem dużego powiększenia sprawia, iż zaplanowany do obrazowania obszar często nie mieści się w polu widzenia mikroskopu. Rozwiązaniem jest automatyczna rejestracja wielu zdjęć i połączenie ich w pojedynczy obraz o bardzo dużej rozdzielczości. Dociekliwi czytelnicy zapytają jednak, czy w takim przypadku na styku składowych fotografii nie uwidocznia się ciemniejsze linie, będące rezultatem nierównomiernego oświetlenia poszczególnych kadrów (z winy źródła światła lub aberracji soczewek).

Jak się okazuje producenci mikroskopów znaleźli remedium na ten problem, implementując zaawansowane algorytmy redukcji cienia. Dla zainteresowanych warto również dodać, iż w mikroskopii do oceny jakości obrazu wykorzystuje się tzw. współczynnik Strehla.<sup>9</sup> Wyraża on stosunek rzeczywiście uzyskanej jasności do maksymalnej jasności obrazu źródła punktowego w idealnym układzie optycznym, w którym nie występowałyby aberracje.

<sup>9</sup> Nazwa pochodzi od niemieckiego fizyka Karla Wilhelma Strehla.

Dla przyzwoitego mikroskopu współczynnik ten musi być większy niż 0,8. Dla urządzenia idealnego wynosiłby 1. Stosowane we współczesnej mikroskopii fluorescencyjnej wysokiej klasy obiektywy planapochromatyczne (*ang. plan apochromat*) zapewniają korekcję krzywizny pola oraz aberracji sferycznych i chromatycznych. W praktyce przekłada się to na doskonałej jakości zdjęcia, które cechuje ostrość w całym kadrze aż do brzegów.

Warto dodać, że nastawy mikroskopu takie, jak: powiększenie, czas ekspozycji czy współrzędne położenia oglądanego fragmentu próbki po zapamiętaniu przez system lub zapisaniu w postaci metadanych obrazu mogą być wykorzystane w kolejnych pomiarach, zapewniając powtarzalność badań, nawet jeśli wykonuje je inny operator. Dodatkowo w przypadku wybranych zastosowań cały proces obrazowania przeprowadza się zdalnie, sterując aparaturą na odległość, np. wówczas, gdy częste przebywanie w laboratorium jest niewskazane ze względu na zagrożenie biologiczne.

Nowoczesne mikroskopy mogą też pracować automatycznie wg schematu zapisanego w protokole wykonawczym, jaki obejmuje nie tylko szczegółowe ustawienia, ale również sposób analizy uzyskanych wyników. Algorytmy uczenia maszynowego pozwalają urządzeniu na samodzielne rozpoznawanie i klasyfikowanie określonych

struktur na obrazach. Okazuje się to bardzo przydatne w eksperymentach, w których uzyskuje się kilkaset a nawet kilka tysięcy zdjęć i trzeba przeprowadzić ich szybką ocenę oraz wizualizację danych. Dla zainteresowanych warto dodać, iż systemy wysokoprzepustowej automatycznej mikroskopii fluorescencyjnej określane są angielskimi skrótami HCS/HCA (*High-Content Screening/High-Content Analysis*).

Bardzo ciekawym przykładem ciągłego udoskonalania optycznych technik obserwacji mikroświata jest mikroskopia fluorescencyjna całkowitego wewnętrznego odbicia, oznaczana często skrótem TIRFM (od ang. *Total Internal Reflection Fluorescence Microscopy*). W jej przypadku kąt padania światła wzbudającego jest tak dobrany, aby ulegało ono całkowitemu wewnętrznemu odbiciu w szkiełku nakrywkowym albo w pryzmacie kwarcowym umieszczonym nad próbką.

Czytelnicy pamiętają zapewne z lekcji fizyki, że światło ulega całkowitemu wewnętrznemu odbiciu, gdy rozchodząc się w medium o większym współczynniku załamania pada pod kątem większym od granicznego na ośrodek o mniejszym współczynniku załamania. W rzeczywistości w drugim ośrodku (rzadszym optycznie) też pojawia się oscylujące pole elektromagnetyczne. Ta tzw. fala zanikająca (ewanescentna), posiadająca tę samą długość co fala odbita, penetruje jednak próbkę tylko na bardzo niewielką głębokość (zazwyczaj nieprzekraczającą 100-200 nm), co pozwala wzbudzić znajdujące się tam barwniki fluorescencyjne. Dzięki temu możliwa jest selektywna wizualizacja obiektów (np. znakowanych białek błonowych) czy procesów zachodzących przy powierzchni (np. endocytozy czy egzocytozy).

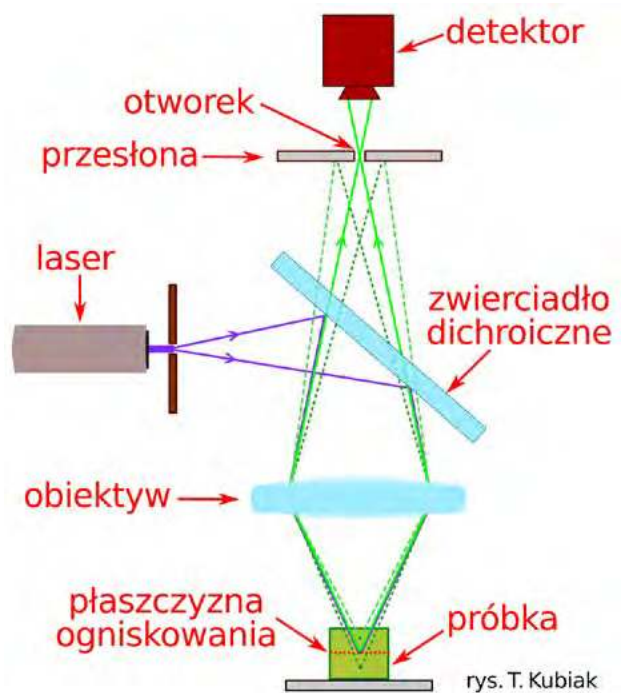
Oczywiście, we współczesnej mikroskopii fluorescencyjnej stosowane jest wiele innych zaawansowanych technik, często oznaczanych różnymi akronimami, np. FRET (ang. *Förster Resonance Energy Transfer*) czy FRAP (ang. *Fluorescence Recovery After Photobleaching*). Zainteresowani czytelnicy szczegóły znajdą w artykułach wyszczególnionych w bibliografii. Warto jednak wspomnieć, że w 2014 roku przyznano kolejną Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii, tym razem za stworzenie metod super-rozdzielczej mikroskopii fluorescencyjnej (otrzymali ją: E. Betzig, S. Hell, W. Moerner). Pozwalają one obrazować obiekty biologiczne z rozdzielczością kilkudziesięciu nanometrów, czyli znacznie lepszą niż ta, która wynikałaby z limitu dyfrakcyjnego. Oczywiście naukowcy cały czas pracują nad rozwojem mikroskopii fluorescencyjnej, a przyszłość na pewno przyniesie w tym zakresie różne nowatorskie rozwiązania.

## Mikroskopia konfokalna

Chociaż badania z wykorzystaniem fluorescencji mogą być prowadzone przy użyciu mikroskopu, w którym oświetlane jest całe pole widzenia, współcześnie w laboratoriach często stosuje się mikroskopy konfokalne (fot.2). Klasyczny mikroskop fluorescencyjny szerokiego pola posiada bowiem podstawową wadę- jego obiektyw zbiera



Fot. 2. Mikroskop konfokalny na Wydziale Biologii UAM.

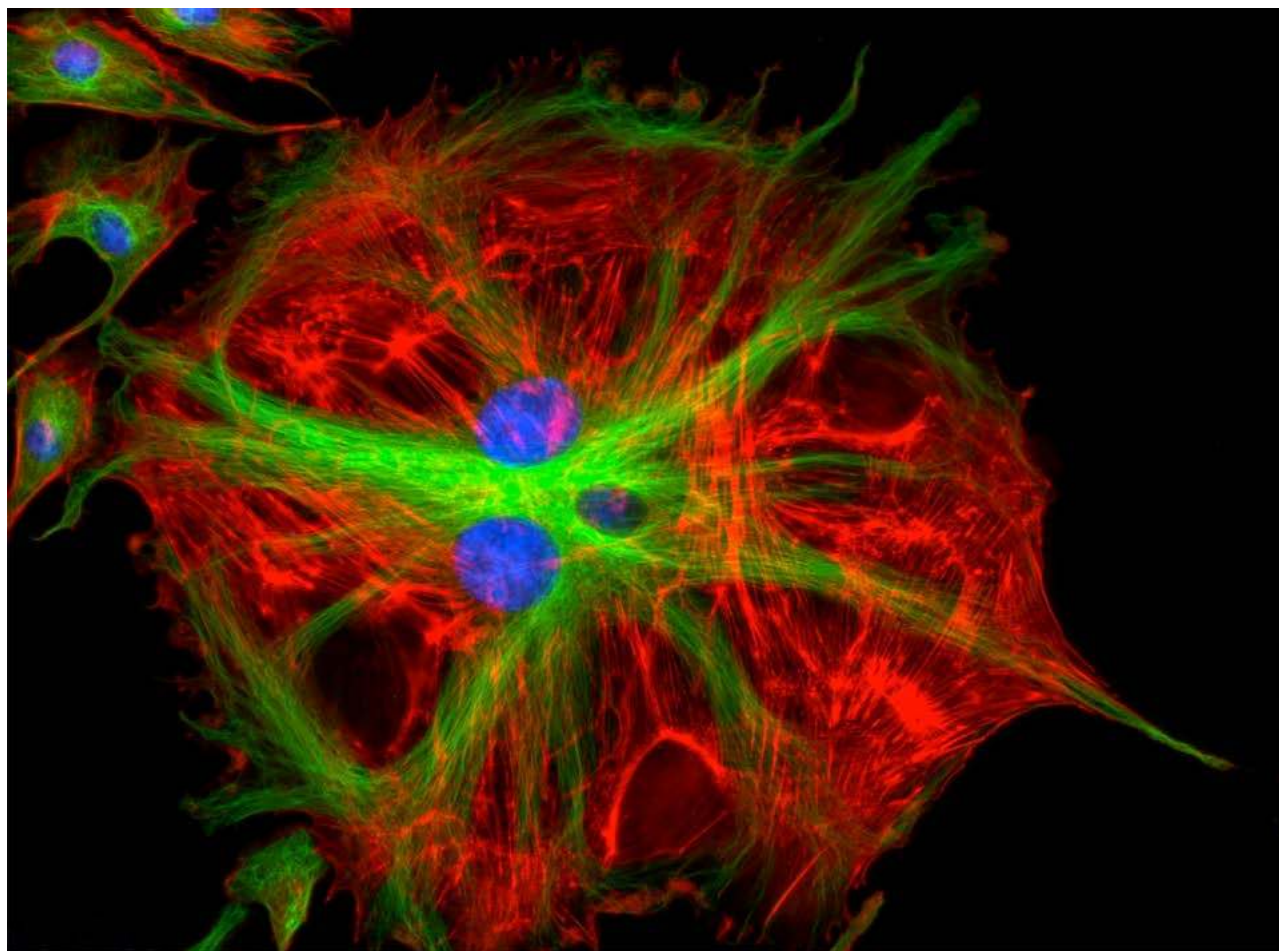


Rys. 3. Zastosowanie w mikroskopie przesłony konfokalnej sprawia, że światło fluorescencji pochodzące spoza płaszczyzny ogniskowania ulega odcięciu.

światło z całej głębokości próbki. Obrazy struktur leżących poza płaszczyzną ogniskowania są zatem nieostre, stanowiąc rozmazane tło, a kontury obiektów nie cechują się pożądaną wyrazistością. Skonstruowanie mikroskopów konfokalnych pozwoliło pozbyć się tych problemów.

Już w 1957 r. Marvin Minsky, słynny amerykański naukowiec związany m.in. z Uniwersytetem Harvarda oraz Massachusetts Institute of Technology, złożył wniosek patentowy na zaprojektowany przez siebie mikroskop konfokalny.<sup>10</sup> Ulepszona aparatura tego typu weszła jednak

<sup>10</sup> Opis patentowy można przeczytać na stronie: <https://patents.google.com/patent/US3013467A/en> (dostęp 6.08.2022).



Fot. 5. Obraz mikroskopowy fluorescencyjny komórek śródbłonna tętnicy płucnej

do seryjnej produkcji dopiero w latach 1982-87. Zastosowano w niej laser, którego wiązka punktowo skanowała badaną próbkę dzięki układowi dwóch ortogonalnych, ruchomych zwierciadeł.

Drugą innowacją stanowiło użycie przesłony konfokalnej, zlokalizowanej pomiędzy obiektywem a detektorem (fotopowielaczem). Zmieniając jej położenie wzdłuż osi optycznej, dokonywało się wyboru płaszczyzny ogniskowej a tym samym obrazowanej warstwy. W przypadku tego typu rozwiązania światło od fluoroforów umiejscowionych płycej lub głębiej ulega odcięciu (pokazuje to rys. 3), co redukuje niepotrzebne tło. Rozmiar otworu jest zatem podstawowym czynnikiem wpływającym na rozdzielczość osiową. Im jest on mniejszy, tym lepsza eliminacja promieniowania spoza powierzchni focalnej. Z drugiej strony zbyt mała średnica spowoduje znaczne ograniczenie liczby fotonów docierających do detektora.

Zwiększenie natężenia światła wzbudzającego barwniki nie rozwiąże powstałego problemu, gdyż będzie wzma-

gać efekt fotowysielania. Aby zatem osiągnąć jak najlepszą rozdzielczość a jednocześnie przyzwoity stosunek sygnału do szumu, trzeba znaleźć rozsądny kompromis. W przypadku skanującego laserowego mikroskopu konfokalnego rejestracja natężenia fluorescencji w kolejnych pozycjach umożliwia sukcesywne konstruowanie obrazu całej próbki piksel po pikselu.

Udoskonaleniem, pozwalającym zdecydowanie przyspieszyć rejestrację obrazów, jest wyposażenie mikroskopu konfokalnego w dodatkowy układ dwóch dysków wirujących z szybkością 1800 rpm. Pierwszy z nich (patrząc od strony źródła światła) posiada 20000 dziurek z wbudowanymi mikrosoczewkami.<sup>11</sup> Przepuszczane przez nie światło jest formowane w wiązki i skupiane a następnie przechodzi przez korespondujące otworki (ang. pinholes) w drugim, przypominającym tzw. tarczę Nipkowa<sup>12</sup> dysku.

Dzięki rozdzieleniu na słabsze wiązki fotony wzbudzają jednocześnie wiele punktów w próbce, co skutkuje znacznym skróceniem czasu obrazowania. Przykładowo, jeśli sygnał z całego przekroju obiektu zbierany jest

<sup>11</sup> Większość światła z poszerzonej wiązki lasera jest zatrzymywana przez dysk. Przez soczewki przechodzi tylko część promieniowania, przy czym w każdej chwili około 1000 spośród otworków obejmuje pole widzenia mikroskopu.

<sup>12</sup> Urodzony w Łęborku fizyk Paul Nipkow w 1884 roku wynalazł wirującą perforowaną tarczę, wykorzystaną wiele lat później w pierwszych odbiornikach telewizyjnych.

podczas 1/12 rotacji dysku a ten obraca się z prędkością 30 rps, uzyskiwane jest 360 klatek na sekundę. Z kolei zmniejszenie intensywności oświetlenia próbki ogranicza dodatkowo ryzyko niekorzystnego fotowysbielenia.

Mikroskopy konfokalne z wirującym dyskiem wspólnie stosowane są przede wszystkim do badania dynamicznych procesów biologicznych oraz wykonywania długotrwałych eksperymentów przyżyciowych na komórkach czy małych organizmach. Szybkość zbierania obrazów zależy głównie od wspomnianej już prędkości rotacji dysków oraz czasu ekspozycji, który może być skrócony dla dobrych detektorów. We współczesnej aparaturze stosuje się kamery EMCCD (od ang. *Electron-Multiplying Charge Coupled Device*) zapewniające wysoką czułość (wydajność kwantowa takich przetworników sięga 95%) w połączeniu z szybkością działania.

Udoskonalanie technik mikroskopowych pozwala na coraz bardziej profesjonalne obserwacje mikroświata, dzięki którym następuje dynamiczny rozwój biofizyki, biochemii, biologii komórki i medycyny. Dla badaczy najważniejsze są oczywiście naukowe aspekty przeprowadzanych eksperymentów, niemniej jednak nie można zapominać o wymiarze estetycznym uzyskiwanych fotografii.

<sup>13</sup> Przykładem jest konkurs Olympus BioScapes Digital Imaging Competition, zwycięskie prace można obejrzeć na stronie: <https://www.olympus-lifescience.com/en/landing/ioty-2019/> (dostęp z 8.08.2022)

Organizowane są nawet prestiżowe konkursy na najlepsze, rejestrowane z wykorzystaniem technik fluorescencyjnych, zdjęcia ukazujące szczegóły organizacji życia.<sup>13</sup>

Niezwykle piękno zakłete w obrazach struktur biologicznych zachwyca nie tylko miłośników nauk przyrodniczych, ale nawet artystów czy humanistów. Sam wymiar wizualny, choć dla fizyków często drugorzędny, może być dodatkową motywacją do szukania lepszych rozwiązań technicznych oraz ciągłego udoskonalania mikroskopii fluorescencyjnej i konfokalnej.

dr Tomasz Kubiak  
Wydział Fizyki UAM w Poznaniu

#### LITERATURA:

- [1] M. J. Sanderson, i inni, *Fluorescence Microscopy*, Cold Spring Harbor Protocols 10, (2014), 1042-1065.
- [2] R. Gräf i inni, *Live Cell Spinning Disk Microscopy*, *Advances in Biochemical Engineering/biotechnology* 95 (2005), 57-75.
- [3] D. B. Murphy, *Fundamentals of light microscopy and electronic imaging*, John Wiley & Sons, New York, 2001.
- [4] W. Brutkowski, *Mikroskopia konfokalna a mikroskopia szerokiego pola - dwa podejścia do badań przyżyciowych*, *Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych* 62(2), (2013), 171-180.
- [5] M. Michałowski, *Wysokoprępastowa automatyczna mikroskopia fluorescencyjna - twórcze rozwinięcie klasyki*, *Laboratorium - Przegląd Ogólnopolski* 3, (2019), 47-52.
- [6] J. Korczyński, *Nowy wymiar mikroskopii - skanujący laserowy mikroskop konfokalny*, *Kosmos. Problemy Nauk Biologicznych* 62(2), (2013), 149-160.
- [7] N. George, *Confocal Microscope Systems - a comparison of technologies*, *Bioscience Technologies* 11, (2003), 12-14.
- [8] M. W. Davidson, M. Abramowitz, *Optical Microscopy [w:] Encyclopedia of Imaging Science and Technology*, pod. red. J.P. Hornak; John Wiley & Sons, Michigan 2002.

## Co w fizyce piszczy

### Zeskanuj skorupę ziemską

Polscy naukowcy pracują nad stworzeniem trójwymiarowego obrazu górnej warstwy skorupy Ziemi, który wskaże koncentrację złóż. Metoda ma dostarczyć dodatkowych informacji przed ostateczną decyzją o dokonaniu odwiertu.

Istota rozwiązania Neutrino Geology polega na tworzeniu przy użyciu mobilnych detektorów, trójwymiarowego obrazu górnej warstwy skorupy Ziemi w oparciu o analizę strumienia geo-neutrino emitowanych podczas rozpadu promieniotwórczego beta zachodzącego w znajdujących się w skorupie ziemskiej izotopach promieniotwórczych.

W skorupie istnieje ok. 20 długo żyjących izotopów promieniotwórczych z rozpadem beta, ale najważniejsze z nich są cztery: <sup>40</sup>K, <sup>235</sup>Uran (U), <sup>238</sup>Uran (U) i <sup>232</sup>Th (Th). Górna skorupa ziemska cechuje się ich zróżnicowaną zawartością i większość struktur geologicznych, z których wydobywane są surowce mineralne, wyróżnia się podwyższoną zawartością U/Th. Przykładowo, wysoki poziom U/Th koreluje z wyższym parametrem TOC (ang. Total Organic Carbon) i dzięki zidentyfikowanej korelacji między poziomem U/Th a TOC można z dużym prawdopodobieństwem oszacować czy w danym miejscu znajdują się złoża ropy naftowej lub gazu ziemnego. Dzięki

metodzie Neutrino Geology zwiększa się istotnie prawdopodobieństwo sukcesu poszukiwań. W związku z tym, że koszt poszukiwań to głównie wiercenia, Neutrino Geology pozwala na dziesięciokrotne zmniejszenie kosztów.

Współtwórcą technologii jest dr A. K. Drukier, który wraz z prof. L. Stodolskim odkryli możliwość opracowania detektorów ze znacznie zwiększonym (o czynnik 10 tys.) przekrojem czynnym na oddziaływanie z neutronami. Jest to możliwe dzięki procesowi kwantowemu – rozproszeniu koherentnemu, którego zastosowanie pozwoli zmniejszyć masę detektorów z ok. 1000 ton do 1 tony, dzięki czemu detektory będą mobilne.

Mobilne detektory neutron gwarantują najmniej inwazyjną metodę prowadzenia geologii poszukiwawczej. Urządzenie jest małe, mobilne i łatwe w montażu. Poszukiwania można prowadzić przy znacznie mniejszym zaangażowaniu ciężkiego sprzętu i ludzi, a dzięki precyzyjnym wynikom pomiarów detektora nawet 10-krotnemu zmniejszeniu ulega również liczba samych odwiertów, które są poważnym zagrożeniem dla wód gruntowych, oraz lokalnej fauny i flory.

<https://www.neutrino-geology.pl/wiecej-o-projekcie>

# Namiocik lub parasol wodny, czyli fizyka w zlewie kuchennym

Stanisław Bednarek

Zgodnie ze znanym powiedzeniem „Nie ma takiego złego, co by na dobre nie wyszło”, trwająca od dwu lat pandemia wirusa Covid-19 przyczyniła się m.in. do przyspieszenia rozwoju metod nauczania zdalnego i poszukiwania prostych doświadczeń, które uczniowie mogliby łatwo wykonać w domu [1, 2].

Autor opublikowanego niedawno na łamach „Fizyki w Szkole” artykułu opisał takie właśnie doświadczenia. Ich tematem jest mechanika płynów i można je przeprowadzić niemal w każdej kuchni. Jeden z opisanych w cytowanym artykule efektów to odskok hydrauliczny strumienia cieczy, skierowanego na twardą powierzchnię. Uderzająca w powierzchnię ciecz, w eksperymentach kuchennych woda, rozplywa się po tej powierzchni radialnie i tworzy warstwę o niewielkiej grubości, otoczoną podwyższonym brzegiem z widocznymi zawirowaniami (zob. rys. 6.b [1] i fot. 1). Należy przy tym też zauważyć pewien szczegół. Polega on na tym, że woda z odskoku, dopływająca do ściany zlewu wznosi się na pewną wysokość i przy górnym brzegu tego wzniesienia tworzy „zgrubienie”, w którym jest widoczna większa ilość zawirowań.

W niniejszym artykule będzie przedstawiony interesujący efekt, który również zachodzi w cieczy. Został on zauważony przypadkowo, także w kuchennym zlewie, podczas ogrzewania butelki z napojem wyjętym z lodówki w strumieniu ciepłej wody. Efekt ten stanowi bardziej złożony przypadek odskoku hydraulicznego, którego opis zawiera cytowany artykuł [1].

## Opisy eksperymentów

Proponowane eksperymenty są bardzo łatwe do przeprowadzenia i praktycznie nie wymagają żadnych przygotowań – wystarczy dostęp do zlewu w kuchni, albo w łazience i kilka plastikowych opakowań. Żeby przeprowadzić pierwsze doświadczenie potrzebna będzie plastikowa butelka, np. od szamponu lub kefiru z płaską zakrętką.

Dla lepszej stabilności butelkę można napełnić wodą, a następnie należy szczelnie zakręcić i ustawić w zlewie, tak żeby środek zakrętki znalazł się pod wylotem rurki odpływowej kranu. W praktyce odległość zakrętki od końca rurki wynosić od kilku do kilkunastu cm.

Powoli odkręcając kran kieruje się strumień wody na zakrętkę. Wypływ wody powinien zachodzić strumieniem laminarnym, tzn. nie wykazującym zaburzeń. Najczęściej na koniec rury odpływowej kranu jest wkręcona tulejka, zawierająca zespół siatek, tzw. perlator, który zapewnia laminarność wypływającego strumienia. Obserwuje się wtedy, że woda padająca na środek zakrętki odbija się od



Fot. 1. Odskok hydrauliczny wody od dna zlewu kuchennego.



Fot. 2. Odskok hydrauliczny i rozplyw wody na zakrętce plastikowej butelki od szamponu.

niej i rozplywa radialnie we wszystkich kierunkach. Warstwa tej wody tworzy tzw. film cieczy i po przekroczeniu brzożki zakrętki porusza się w powietrzu po powierzchni przypominającej powierzchnię paraboloidy lub elipsoidy (fot. 2).

W przeprowadzonym doświadczeniu, oprócz odskoku hydraulicznego obserwuje się rzut poziomy, realizowany za pomocą warstwy wody spływającej z zakrętki. Jeżeli zostaną pominięte opory ruchu i zakrzywienie powierzchni filmu wodnego w dolnej części, to zasięg tego rzutu  $z$  wyraża się wzorem

$$z = v_0 \sqrt{\frac{2h}{g}} \quad (1)$$

We wzorze (1)  $v_0$  oznacza prędkość początkową, zaś  $h$  jest wysokością, z której następuje rzut, natomiast  $g$  to przyspieszenie ziemskie. W rozpatrywanym przypadku  $v_0$  jest prędkością wody spływającej zakrętki, a  $h$  wysokością butelki. Zasięg rzutu  $z$  jest promieniem okręgu, wzdłuż którego powierzchnia paraboloidy utworzonej z wody przecina powierzchnię zlewu. Żeby jakościowo sprawdzić słuszność zastosowania wzoru (1) wystarczy zwiększyć prędkość strumienia wody spływającej na zakrętkę. Dokonuje się tego bardziej odkręcając kran, co powoduje wzrost rozmiarów powierzchni paraboloidy i zasięgu  $z$ .

Do obserwacji opisanego efektu można wykorzystać nie tylko butelkę, ale również inne naczynie z płaską pokrywką, np. pudełko od pasty do czyszczenia naczyń, albo dowolny przedmiot o płaskiej powierzchni górnej, na którą zostanie skierowany strumień wody. Taka wersja doświadczenia została przedstawiona na fot. 3. Ważne jest, żeby pokrywka nie miała obrzeża, wystającego ponad środkową część jej powierzchni. Powierzchnia, na którą pada strumień cieczy nie powinna też być zbyt duża.

Jeżeli te warunki nie będą spełnione, np. do doświadczenia zostanie użyty odwrócony talerz, mający zwykle od spodu wystający brzeg i dość dużą powierzchnię, to strumień wody rozpryskujący się po nim wytraci swoją prędkość. Nastąpi to w wyniku działania sił lepkości i zamiany energii kinetycznej na energię potencjalną ciężkości, potrzebną do pokonania wystającego brzegu. Spływająca z brzegu takiego przedmiotu woda będzie miała prawie zerową prędkość skierowaną poziomo i nie utworzy efektywnej powierzchni paraboloidy obrotowej, tylko będzie opadała pionowymi strużkami (fot. 4).

Efekt formowania przez wodę po odskoku hydraulicznym powierzchni w kształcie paraboloidy obrotowej można zrealizować w dużej skali, porównywalnej ze wzrostem człowieka i wykorzystać do celów rekreacyjnych lub edukacyjnych, np. w ogrodzie doświadczeń lub w aquaparku. Atrakcją będzie umożliwienie zwiedzającym wejścia do pod utworzoną z wody powierzchnię bez konieczności zmoczenia ubrania.

Jednym ze sposobów realizacji takiego pomysłu jest ustawienie kolumny z płaską powierzchnią górną, na którą będzie padał pionowo strumień wody. Na pewnym odcinku przy brzegu tej powierzchni należy umieścić ogranicznik w kształcie wystającego ku górze obrzeża. Dzięki temu w powierzchni paraboloidy utworzonej z opadającej wody pojawi się przerwa, stanowiąca „drzwi”, które umożliwią wejście do takiego namiotu wodnego. Mały model opisanego namiotu wodnego albo, jak kto woli parasola, wykonany w zlewie został pokazany na fot. 5.



Fot. 3. Odskok hydrauliczny i rozprysk wody na pokrywce pudełka od pasty do czyszczenia naczyń.



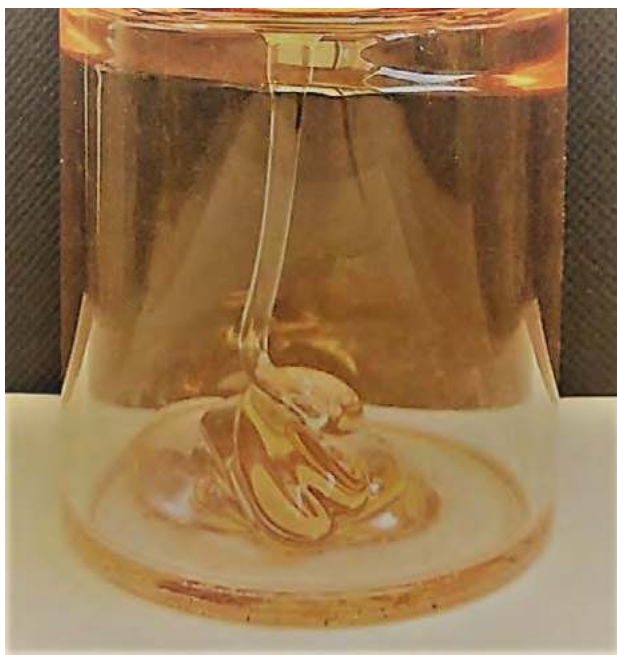
Fot. 4. Skutek użycia do doświadczenia przedmiotu o zbyt dużej powierzchni – plastikowej tacki od produktów spożywczych.

Efekt odbicia hydraulicznego przybiera szczególnie interesującą formę w przypadku opadania strumienia cieczy o bardzo dużej lepkości, która zależy od szybkości przepływu. Ciecze wykazujące taką właściwość są nazywane cieczami nienuwtonowskimi, albo cieczami reologicznymi. Przykładami takich cieczy są: żywice epoksydowe, a także różnego rodzaju zawiesiny, m.in. farby.

W warunkach kuchennych najłatwiej będzie wytworzyć zawiesinę reologiczną w postaci mieszaniny mąki ziemniaczanej i wody, w której udział objętościowy obu



Fot. 5. „Namiocik wodny” spowodowany przez odskok hydrauliczny i rozpliw wody na zakrętce plastikowej butelki od szamponu z ogranicznikiem rozpliwu wykonanym z kawałka drutu (fragment spinacza biurowego), przymocowanym taśmą klejącą do brzegu zakrętki.



Fot. 6 Odskok hydrauliczny i rozpliw cieczy nienewtonowskiej o bardzo dużej lepkości w tzw. klepsydrze żelowej (efekt Fano).

wymienionych składników wynosi ok. 50%. Opadający strumień cieczy reologicznej tworzy swego rodzaju kolumnę, wykonującą ruch obrotowy wokół osi pionowej. Gdy ten strumień dotknie poziomej powierzchni, może być to dno naczynia lub powierzchnia już zebranej w nim cieczy, wówczas ta kolumna układa się jak opuszczana lina i powoli rozplywa w kierunku radialnym, tworząc współśrodkowe okręgi.

Opisane zjawisko jest nazywane efektem Fano [3]. Można je obserwować w kuchni przy użyciu wspomnianej zawiesziny maki ziemniaczanej i wody, ale też podczas

wlewania ciasta do brytfanny. Od czasu do czasu w sklepach zabawkami lub gadżetami można kupić przedmiot nazywany klepsydrą żelową. Jest to przezroczyste, dwukomorowe naczynie w kształcie cylindra, zaopatrzone w przegrodę z otworem, umieszczoną w połowie jego wysokości i wypełnione częściowo zabarwioną cieczą reologiczną. Efekt Fano w takim naczyniu przedstawia fot. 6.

### Podsumowanie

Opisane doświadczenia dobrze nadają się na temat pokazów, pozwalających zainteresować fizyką i zachęcić



Fot. 7. Zakrzywienie dolnej powierzchni „parasola wodnego” w kierunku osiowym w zależności od prędkości wypływu: a) kształt zbliżony do powierzchni paraboloidy, b) kształt bardziej przypominający fragment powierzchni elipsoidy. Efekt uzyskano w wyniku rozpliwu wody po odrzuceniu hydraulicznym na zakrętce plastikowej butelki od kefiru.

do samodzielnych poszukiwań, skutkujących ciekawymi spostrzeżeniami. Bo chociaż, jak wspomniano na wstępie tego artykułu, opisany efekt został zauważony przypadkowo, to jednak przypadek nie sprzyja osobom beczynnym. Co ciekawe, nie udało się znaleźć przy pomocy wyszukiwarki Google fotografii ani opisów tego efektu w materiałach o otwartym dostępie, znajdujących się w Internecie.

Opisany tutaj efekt może też stanowić temat bardziej zaawansowanych prac ilościowych, wykonywanych podczas zajęć koła zainteresowań lub konkursu fizycznego. W tym drugim przypadku przedmiotem uczniowskich badań może być wyodrębnienie i sformułowanie związków między wielkościami fizycznymi, wpływającymi na kształt powierzchni paraboloidy, tworzonej przez opadającą ciecz, w szczególności weryfikacja granic stosowalności wzoru (1).

Film wodny po odrzucie czasem zachowuje się w zaskakujący sposób i wraz ze zmianą prędkości wypływu zmienia kształt z powierzchni paraboloidalnej na silnie zwężoną u dołu powierzchnię zbliżoną do fragmentu powierzchni elipsoidalnej (por. fot. 7.a i 7.b). Prawdopodobną przyczyną tego jest działanie sił między cząsteczkami wody (siły spójności) i napięcie powierzchniowe, które dążą do zachowania ciągłości powierzchni, mimo wzrostu prędkości opadania.

Problem ten wymaga jednak dokładniejszego zbadania. Odskok hydrauliczny ma również istotne znaczenie praktyczne, ponieważ zachodzi podczas przepływu w różnych budowach hydrotechnicznych, np. stopniach wodnych, śluzach, zaporach. Naturalnym miejscem występowania tego efektu są niektóre wodospady. Dlatego to zjawisko stanowi częsty temat ćwiczeń laboratoryjnych dla studentów niektórych kierunków technicznych, np. budownictwa wodnego [4]. W podręcznikach i instrukcja do tych ćwiczeń znajduje się wiele informacji przydanych do dokładniejszego poznania tego zjawiska.

Stanisław Bednarek

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego

Fotografie autora

#### LITERATURA

- [1] M. Lisicki, Kuchenna mechanika płynów, czyli fizycy uwięzieni, „Fizyka w Szkole Czasopismo dla Nauczycieli”, nr 2 (379), s. 16 (2022)
- [2] A. J. T. M. Mathijssen, M. Lisicki, V. N. Prakash i E. J. L. Mossige, Culinary fluid mechanics and other currents in food science, arXiv:2201.12128 [cond-mat, physics:physics], sty. 2022. Dostępne na: <http://arxiv.org/abs/2201.12128>
- [3] S. Bednarek, Podstawowe doświadczenia pokazowe z reologii i magnetoreologii, „Postępy Fizyki, Dwumiesięcznik Polskiego Towarzystwa Fizycznego”, z. 1, t. 53, s. 33 (2002)
- [4] J. Sawicki, W. Szpakowski, K. Weinerowska (red.), E. Wołoszyn, P. Zima, Laboratorium mechaniki płynów, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, s. 149 (2004)

## Max Born – śląski noblista

mgr Rafał Simon, dr Marta Wąsik

Max Born urodził się w 1882 roku we Wrocławiu (dawniej Breslau). Pochodził z rodziny o niemiecko-żydowskich korzeniach. Ojciec jego był profesorem medycyny (anatomii i embriologii) w Uniwersytecie we Wrocławiu. Matka jego, Margarete, umarła we wczesnym dzieciństwie.

Przyszły Noblista studiował matematykę, fizykę i astronomię na uniwersytetach we Wrocławiu, Heildelbergu i Zurychu. Lecz swoją karierę akademicką rozpoczął na Uniwersytecie w Getyndze. W roku 1912 młody naukowiec wyjechał do Chicago, aby pracować jako wykładowca i prowadzić badania z A. A. Michelsonem. Rok później ożenił się z Hedwig Ehrenberg, z którą miał syna i dwie córki.

W roku 1915 otrzymał zaproszenie do Berlina od Maxa Plancka. W czasie wojny Born zaprzyjaźnił się z A. Einsteinem, z którym dzielił nie tylko pasję naukowe, ale także zamiłowanie do muzyki. Po Pierwszej Wojnie Światowej został dyrektorem Instytutu Fizyki Teoretycznej

we Frankfurcie nad Menem a następnie Instytutu Fizyki w Getyndze. Podczas swojej pracy naukowej współpracował także z Heisenbergiem ( autorem zasady nieoznaczoności elektronu).

W roku 1933 z powodu swego żydowskiego pochodzenia musiał opuścić Niemcy. Otrzymał posadę w Cambridge, a następnie w 1936 roku profesora w Edynburgu w Szkocji. Po wojnie w 1953 roku wrócił do Niemiec a rok później otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki.

Jego zasługi i badania dotyczyły głównie fizyki kwantowej i budowy atomu oraz cząstek elementarnych.

Max Born zapisał się na kartach nauki jako interpretator równania falowego. Równanie to dotyczy dualizmu korpuskularno-falowego elektronu oraz jego statystycznego prawdopodobieństwa położenia w danym momencie.

W teorię początkowo wątpił A. Einstein i napisał mu w liście: „Bóg nie gra w kości”. Odkrycie Borna tworzyło zręby fizyki kwantowej, obalało dotychczasowy pogląd na świat. Przeczyło bowiem zasadzie przyczynowości.

Max Born zmarł w 1970 roku w Getyndze.



## Jak uczyć by nas rozumiano?

Przemysław Krakowiak

Nauczanie fizyki bywa często wyzwaniem dla nauczyciela. Uczeń nie dość, że musi posiadać wysokie umiejętności matematyczne, to konieczne jeszcze jest logiczne myślenie, interpretowanie i odwoływanie się do praw fizycznych, a przy tym często rozumienie języka naukowego. Pracując w oddziałach klasowych liczących ponad 20 osób ciężko o indywidualizację nauczania a trafić musimy do każdego i każdy powinien coś z nauki wyciągnąć. Oczywiście najlepiej jak poziom przyswojenia będzie wysoki.

Według badań u młodszych dzieci możliwość opisanie jakiegoś procesu, doświadczenia za pomocą precyzyjnego słownictwa naukowego jest trudne, ale chętnie uczą się nowych terminów. Są one w wieku poznawczym i chętnie wykorzystują nowe słownictwo, nie zawsze jednak potrafią je ponownie zdefiniować. U uczniów szkół średnich występuje problem niezajomości języka naukowego, tylko nieliczni przyswoili go wcześniej. U ponad 50% uczniów, kiedy są proszeni o „szacowanie”, „mierzenie”, „definiowanie”, to mają problem ze zrozumieniem poleceń i właściwym ich użyciem.

Jak zatem uczyć by nas rozumiano? Najprostszym sposobem jest wprowadzanie informacji w języku nienaukowym, nie analizując książkowych procesów i doświadczeń, a używać przykładów czy sformułowań bliższych uczniom. Ten sposób sprawdza się jako pierwsze spotkanie z tematem, pierwszy przykład i pozwala na lepsze zrozumienie zagadnień. Zgodnie z założeniami „uczenia dla zrozumienia” nie zanudzajmy uczniów suchymi faktami, wprowadzajmy nowoczesne metody aktywizujące – bądźmy „pogromcami mitów”.

Gdzie szukać inspiracji, jakich przykładów używać? Jest tylko jedna rzecz, która dotrze do uczniów lepiej niż nauka – popkultura. Dlatego szukajmy przykładów w filmach, muzyce, sprawdzając to, co możliwe lub niemożliwe, ale popularne w Internecie.

Zainspirowany wieloma memami i filmami na Youtube oraz po obejrzeniu kinowego hitu akcji „Drapacz chmur” postanowiłem omówić temat rzutu poziomego w odniesieniu do jednej ze scen w filmie. Założenie jest proste –

przeanalizować czy skok jaki wykonuje bohater filmu – z dźwigu do budynku, w jednej ze scen, jest możliwy. Film ten promowany był plakatem, przedstawiającym tę scenę, dostępnym na stronie producenta i dystrybutora – firmy Universal Pictures (<https://www.universalpictures.com/movies/skyscraper>).

Na potrzeby tego opracowania, posłużymy się schematyczną grafiką (grafika 1). W zależności od zaangażowania klasy, wprowadzanego materiału, można scenę interpretować jako rzut ukośny lub rzut poziomy. Aby dać bohaterowi więcej szans na powodzenie skoku – zajmijmy się tym jako rzutem poziomym (grafika 2).

Odpowiedzmy sobie zatem na pytanie, jaką prędkość musiały mieć bohater grany przez Dwayne’a Johnsona wyskakując z wysięgnika dźwigu, aby skok zakończył się powodzeniem. Pomińmy wszelkie możliwe straty i opory. Rozwiązując ten problem skorzystamy oczywiście ze wzoru na prędkość w rzucie poziomym i będzie to nasze  $v_x$ . Problem stanowi jednak brak informacji o zasięgu rzutu. Sama grafika nam w tym nie pomoże, bo nie dość, że akcja dzieje się w Hong Kongu, co już sprawia olbrzymi kłopot na odnalezienie ewentualnej odległości – tu pomóc mogłyby zdjęcia Google lub Google Earth, to budynek przedstawiony na grafice nie istnieje. Został stworzony tylko jego model na potrzeby filmu. Nie ma zatem żadnego punktu odniesienia dotyczącego wielkości, która mogłaby pomóc w określeniu odległości na grafice. Jest to moment, w którym większość uczniów zaczyna wpadać na dobry pomysł, odnośnie opcji określenia odległości. Jeśli na tym etapie to się nie udaje, musimy nakierować ich na właściwy tor.

Jest jedna stała na grafice – Dwayne Johnson. Wzrost aktora wynosi 1,96 m, możemy więc przyjąć umownie jednostkę 1 Dwayne = 1,96 m. W tym momencie łatwo nam uzyskać wysokość – wynosi ona 4 Dwayne’y i zasięg wynoszący 8 Dwayne’ów (grafika 3). Ze wzoru na zasięg jesteśmy w stanie policzyć prędkość początkową, jaką musiały mieć bohater przy wykonaniu skoku:

$$Z = v_0 \sqrt{\frac{2h_0}{g}}, \quad \text{a zatem } v_0 = \frac{Z}{\sqrt{\frac{2h_0}{g}}}$$

$$Z = 8 \text{ Dwayne'ów} = 8 \cdot 1,96 \text{ m} = 15,68 \text{ m}$$

$$h_0 = 4 \text{ Dwayne'y} = 4 \cdot 1,96 \text{ m} = 7,84 \text{ m}$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$v_0 = \frac{15,68 \text{ m}}{\sqrt{\frac{2 \cdot 7,84 \text{ m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}}} = \frac{15,68 \text{ m}}{\sqrt{1,60 \text{ s}^2}} = 12,40 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Możemy także obliczyć jaki byłby zasięg gdybyśmy użyli średniej prędkości biegu człowieka  $8 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  lub prędkości najszybszego człowieka na świecie Usaina Bolta  $44 \frac{\text{km}}{\text{h}}$  (tutaj kolejne zadanie dla naszych uczniów – przeliczanie jednostek):

$$v_{\text{sr}} = 8 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 2,22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_{\text{UB}} = 44 \frac{\text{km}}{\text{h}} = 12,22 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

W tym momencie widzimy, że nasz bohater byłby szybszy od najszybszego człowieka na świecie, ale policzmy jaki byłby zasięg najszybszego i przeciętnego człowieka:

$$h_0 = 4 \text{ Dwayne'y} = 4 \cdot 1,96 \text{ m} = 7,84 \text{ m}$$

$$g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$Z = ?$$

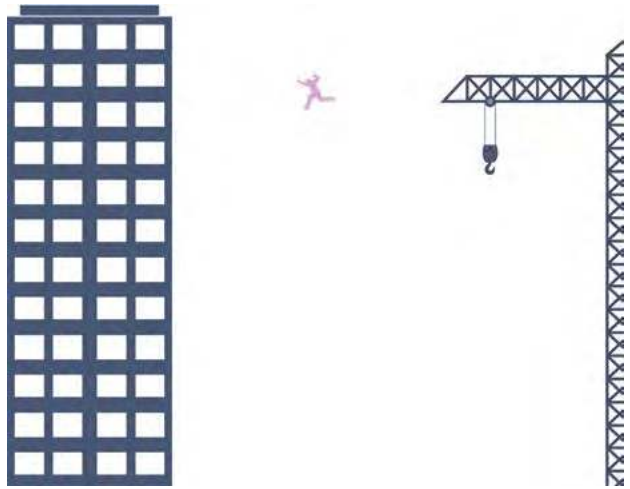
$$Z_{\text{sr}} = v_{\text{sr}} \sqrt{\frac{2h_0}{g}} = 2,22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 7,84 \text{ m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = 2,81 \text{ m}$$

$$Z_{\text{UB}} = v_{\text{UB}} \sqrt{\frac{2h_0}{g}} = 12,22 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 7,84 \text{ m}}{9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}}} = 15,46 \text{ m}$$

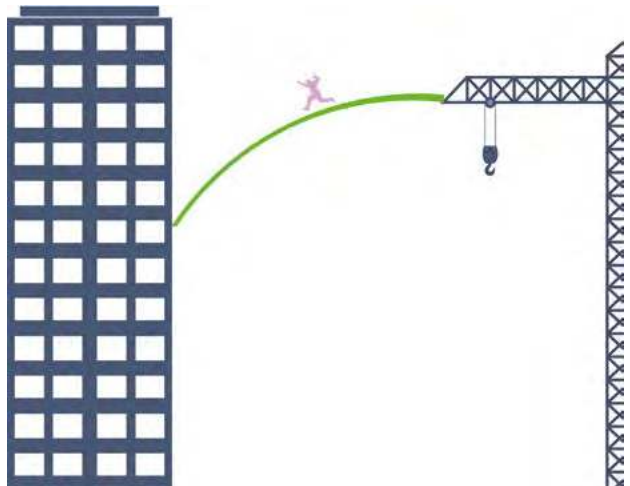
Na szczęście efekty specjalne pozwoliły Dwayne'owi Johnsonowi przeżyć kręcenie tego filmu.

W klasie równoległej przeprowadziłem dla odmiany zwyczajną lekcję wprowadzającą temat rzutu poziomego. Ku mojemu zaskoczeniu poziom sukcesu rozwiązywanych zadań na kolejnej lekcji różnił się w każdej z klas. Uczniowie wykazywali większe zrozumienie i zainteresowanie tematem po lekcji z „Drapaczem chmur”. Wniosek jest prosty – wykorzystujemy popkulturę, zwłaszcza bliską młodzieży, do nauki fizyki oraz innych przedmiotów ścisłych. Kiedy w zadaniu pojawia się ciało kuliste, niech to będzie Pokeball (kula, w którą łapie się Pokemony), kiedy mówimy o odległościach w kosmosie, wspomnijmy, że w Gwiezdnym Wojnach użyto parseka jako jednostki prędkości, a nie odległości.

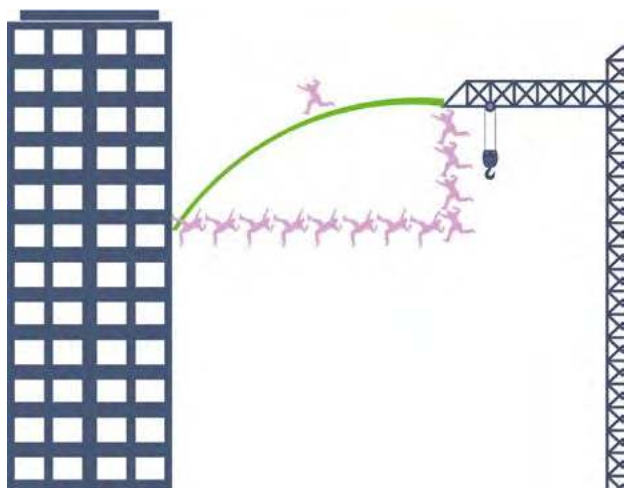
Jak już jesteśmy w kosmosie to omawiając fale dźwiękowe wręcz trzeba się odnieść do faktu, że dźwięk w próżni się nie rozchodzi. Niech inspirują nas filmy superbohaterskie czy zwariowane filmy akcji typu „Szybcy i wściekli”, szalony serial animowany „Rick & Morty” gdzie znajdziemy mnóstwo perełek, aby odnieść się do tematów naszych lekcji. Stosujmy nowoczesne metody aktywizujące – bądźmy filmowymi pogromcami mitów – sukces gwarantowany. Uczniowie nie tylko będą nas słuchali, ale łatwiej przyswoją zagadnienie.



Grafika 1



Grafika 2



Grafika 3

**BIBLIOGRAFIA:**

- [1] 1. „Advanced Learning and Teaching Environments – Innovation, Contents and Methods” – N. Llevot-Calvet (red.), IntechOpen, 2018.
- [2] 2. „Teaching for Understanding” – M. Stone Wiske (red.), Jossey Bass/Wiley, 1997.
- [3] 3. <https://www.universalpictures.com/movies/skyscraper>

# CREDO-Maze:

## promieniowanie kosmiczne a fizyka cząstek elementarnych

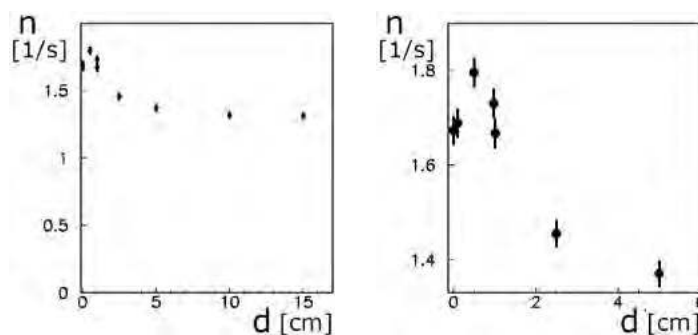
Artykuł ten jest drugim z serii poświęconej projektowi „Kosmos widziany z Łodzi” będącym realizacją pierwszego etapu szerokiej akcji udostępniania młodzieży nowoczesnej aparatury naukowej mającej w końcowym efekcie pokazać, a może i nauczyć młodych, ciekawych świata ludzi metod, jakimi posługuje się współczesna nauka w poszukiwaniu praw rządzących Wszechświatem. Aparatura ta stanie się istotnym rozwinięciem projektu CREDO (Cosmic Ray Extremely Distributed Observatory) i wszyscy, którzy przyłączą się do nas, staną się uczestnikami niezwyklej podróży w nieznane zakamarki Kosmosu.

Tadeusz Wibig,

Poprzedni tekst poświęcony promieniowaniu kosmicznemu zakończyliśmy prezentacją wyników eksperymentu przeprowadzonego przez uczestników naszego projektu CREDO-Maze, w którym zmierzaliśmy strumień pojedynczych cząstek przychodzący do powierzchni ziemi detektorami znajdującymi się pod grubą warstwą betonu (kilka kondygnacji budynku Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego) i ponownie przez te same detektory niczym już nie osłonięte ustawione na trawniku przed budynkiem. Wynikiem tych pomiarów było stwierdzenie, że betonowe stropy, które w sumie miały grubość około metra, zatrzymywały mniej więcej połowę cząstek dochodzących do nas z góry. Aby powiedzieć coś więcej, wykonaliśmy kolejny eksperyment. Zmierzaliśmy ilość cząstek przechodzących przez teleskop złożony z dwóch detektorów ustawionych jeden nad drugim i przykryty warstwą ołowiu o zmiennej grubości.

Wyniki eksperymentu przeprowadzonego przez ekipę z XXIX LO z Łodzi pod kierunkiem profesora Witolda Sowińskiego w składzie: Magdalena Jaworowska, Joanna Pająk, Lidia Piestrzeniewicz, Monika Stangenberg, Natalia Woch i Cyprian Pikor z klasy 3a i Leon Czader, Mikołaj Gawęda, Michał Jateczak, Wiktor Kruczkowski, Mateusz Maciejewski, Robert Puzio i Yaroslav Vozniak z klasy 2a pokazane są na rysunkach.

Drugi wykres pokazuje w powiększeniu, to co dzieje się dla kilkucentymetrowych grubości warstw ołowiu. Jak widać, liczba przypadków jednoczesnych rejestracji



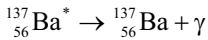
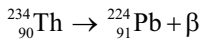
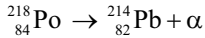
Anihilacja elektronu i pozytonu.

cząstek przez oba detektory teleskopu na jednostkę czasu, a jest ona proporcjonalna do strumienia cząstek kosmicznych przechodzących przez teleskop, początkowo nawet rośnie (co wymaga dodatkowego wyjaśnienia i tym zajmiemy się później). Potem, jeśli ołowiu jest więcej niż 1-2 cm, zaczyna maleć, ale nie tak do końca, bo od grubości około 10 cm w zasadzie pozostaje stała. Zależność ta jest trochę dziwna i na pierwszy rzut oka niezrozumiała, a wyjaśnienie jej, jak się okaże za chwilę, mówi nam sporo o fizyce, o fizyce cząstek elementarnych.

Wyjaśnienie to zaczniemy od historii.

W dawnych czasach, kiedy nauka o promieniotwórczości rodziła się dopiero (z istotnym udziałem Marii Skłodowskiej-Curie oczywiście) wyodrębniano dwa rodzaje promieniowania: jeden z nich pochłaniany był nawet przez kartkę i składał się z cząstek naładowanych dodatnio zidentyfikowanych później jako jądra atomów helu. Rutherford nazwał je **promieniowaniem alfa**. Drugi odpowiadający za zaczernianie klisz Becquerela składał się

z cząstek naładowanych ujemnie, jak się później okazało elektronów i nazwany został, znów przez Rutherforda **promieniowaniem beta**. Niedługo potem odkryto i trzeci rodzaj promieniowania jądrowego, który nie odchyłał się w ogóle w polach magnetycznych, a więc składał się z cząstek elektrycznie obojętnych, z fotonów. Rutherford nazwał go oczywiście **promieniowaniem gamma**.

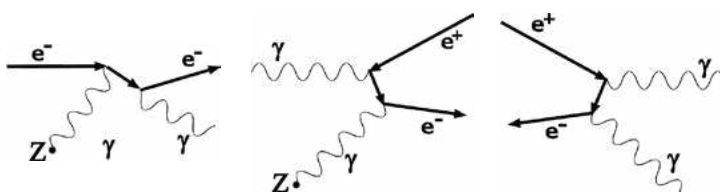


Tyle mówi nam fizyka radioaktywności, a wynika z tego, że po pierwsze promieniowanie przychodzące do powierzchni ziemi z kosmosu to na pewno nie jest promieniowanie alfa. Nasze liczniki scyntylacyjne reagują jedynie na cząstki naładowane, a więc nie jest to także elektrycznie neutralne promieniowanie gamma. Z wymienionych wyżej promieniowań pozostają tylko elektrony.

Elektrony z rozpadów  $\beta$  mają energie tak małe, że w powietrzu są w stanie przejść zaledwie kilkadziesiąt centymetrów. Tracą energię bardzo szybko głównie na jonizację mijanych atomów i zatrzymują się w materii. Ale, gdy ich energia była zdecydowanie większa, pojawiają się inne, nowe procesy energetycznych strat. Elektrony zderzając się z jądrami doznają gwałtownych przyspieszeń, zasadniczo hamują. Jak wiadomo ładunki elektryczne poruszające się ruchem przyspieszonym muszą emitować promieniowanie elektromagnetyczne. Im gwałtowniejsze jest to hamowanie, tym energie emitowanych kwantów są wyższe. Promieniowanie to nazywa się **promieniowaniem hamowania**.

W końcu osiągają energie na tyle duże, że i one z kolei mogą w oddziaływaniach z jądrami kreować z niczego ( $E = mc^2$ ) **pary elektron-pozyton**. Proces ten jest czymś dokładnie odwrotnym do znanej głównie chyba z filmów science-fiction reakcji **anihilacji**. W niej antymateria spotykając się z materią znika i produkuje olbrzymie ilości energii ( $E = mc^2$ ).

Procesy anihilacji i kreacji materii wykrył studiując oczywiście promieniowanie kosmiczne Patrick Maynard Stuart Blackett, za co dostał Nobla w roku 1948.

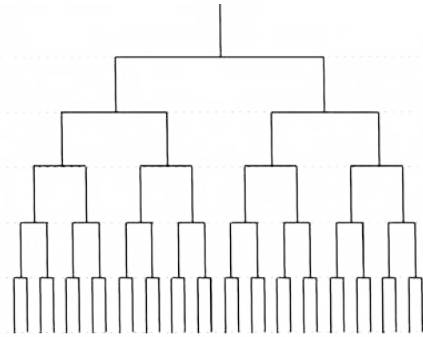


Promieniowanie hamowania. Kreacja pary w pobliżu jądra Anihilacja elektronu i pozytonu.

W dalszej kolejności każda cząsteczka z tej wykreowanej pary emitowałaby kolejny foton hamowania, który z kolei produkowałby kolejną parę, a każdy...

Musimy przypomnieć rysunek pokazany w poprzednim tekście ukazujący (schematycznie) rozwój kaskady elektromagnetycznej.

Teorię takich kaskad opisali w 1934 roku Bethe i Heitler i tak to właśnie działa. Tym, co nas w tym momencie interesuje najbardziej jest średnia droga, po jakiej z jednej



cząstki robią się dwie, czy to elektron emituje dodatkowy wysokoenergetyczny foton hamowania, czy też foton znika, a zamiast niego pojawia się para elektron-pozyton. Od długości tej drogi zależy, jak głęboko w materię wnikać będą kaskady. Wielkość ta nazywa się z dość oczywistych powodów **jednostką kaskadową**. Nie jest to jej ścisła definicja, a do naszych celów taka wystarczy. Ponieważ lecący elektron (dla fotonów sprawa wygląda podobnie) oddziałuje z jądrami atomów ośrodka, jednostka kaskadowa dla różnych materiałów jest oczywiście różna. Istnieje teoria, która pozwala ją przy jakichś założeniach policzyć, ale na pewno możemy powiedzieć bez liczenia, że w ołowiu będzie ona krótsza niż w betonie stropu. Po pierwsze ołów jest bardzo ciężki, precyzyjniej: ma dużą gęstość (ponad  $11 \text{ g/cm}^3$ , a beton zaledwie nieco ponad  $2 \text{ g/cm}^3$ ), ale to nie jest najważniejsze. Jądra atomów ołowiu mają bardzo duży ładunek elektryczny, to znaczy dużą liczbę atomową ( $Z = 82$ ), a beton to jakby piasek, czyli z grubsza krzem i trochę tlenu, czyli  $Z$  coś około 10. Spodziewamy się, że naładowane cząstki promieniowania kosmicznego, które mierzymy naszymi detektorami oddziałują elektromagnetycznie (prawo Culomba!) czyli na pewno silniej będą oddziaływać z jądrami atomów ołowiu niż z lekkimi jądrami tlenu czy krzemu.

Teoria oddziaływań elektromagnetycznych jest nam znana od prawie dwustu lat, od czasu Maxwella i kolegów. Z równań Maxwella wynika, że pole elektryczne wokół jądra o ładunku  $Z$  jest proporcjonalne do tego ładunku (prawo Coulomba!). Energia skumulowana w polu elektrycznym jest z kolei proporcjonalna do wartości pola elektrycznego w kwadracie. Przypomnijmy sobie szkolny wzór na energię kondensatora o pojemności  $C$  naładowanym ładunkiem  $Q$ :  $E_C = Q^2/2C$ . Energia w polu jądra jest proporcjonalna do  $Z^2$  i energia ta pola rozmięta się na liczbę wirtualnych fotonów otaczających chmurą ładunek jądra. A zatem ich ilość jest także proporcjonalna do  $Z^2$ . Z punktu widzenia lecącej cząstki wpadającej w materię złożoną z jader o ładunku  $Z$  to właśnie ta chmura (wirtualnych) fotonów staje jej na drodze i to z nimi ona się tak naprawdę zderza. Prosty rachunek pokazuje, że w ołowiu cząstki naładowane oddziałują prawie sto razy częściej niż w betonie (piasku). No i dlatego i my w naszym doświadczeniu, i Anderson w swoim, wybraliśmy ołów. Centymetr ołowiu to dla lecącej cząstki naładowanej niemal tyle, co metr betonu.

Aby uzyskać dane ilościowe, musimy odwołać się już do bezpośrednich pomiarów, które wykonano już dawno temu. Od tego czasu wiemy, że jednostka kaskadowa dla

ołowiu jest równa  $\sim 0.56$  cm, dla krzemu  $\sim 9.4$  cm a dla wody 36 cm i powietrza  $\sim 300$  m.

Po przejściu jednej jednostki kaskadowej z jednej cząstki robią się średnio dwie. W zasadzie wszystko jedno, czy tą cząstką na początku był foton, czy naładowany dodatni, czy ujemnie elektron. Przy okazji znajdujemy tu wyjaśnienie obserwowanego w naszym eksperymencie początkowego wzrostu tempa zliczeń naszego detektora, gdy okrywała go niewielka ilość ołowiu. Popatrzmy na wykres. Właśnie pół centymetra ołowiu wystarczy, aby z grubsza co drugi foton zamienił się w parę elektron-pozyton. Foton sam z siebie w scyntylatorze jako cząstka nienaładowana nie produkuje światła, jest niewidoczny, ale para elektron-pozyton jest już w naszych detektorach doskonale widoczna. Elektronów oczywiście też po przejściu jednej jednostki kaskadowej troszkę ubędzie. Każdy straci nieco więcej niż połowę swojej energii i niektóre zatrzymają się. Już jeden centymetr ołowiu sprawia, że naładowanych cząstek powstałych z fotonów wysokich energii przybywa tyle, ile ich zatrzymuje się.

W pewnym sensie nasze detektory mogą być używane jako liczniki wysokoenergetycznych fotonów, jeśli tylko przykryć je odpowiednio.

Wracając do modelowej kaskady, jak już powiedzieliśmy, po przejściu jednej jednostki kaskadowej z jednej cząstki początkowej robią się średnio dwie, po dwóch jednostkach mamy już umowne cztery cząstki, po trzech – osiem. Energia każdej z tych ośmiu cząstek jest (średnio) osiem razy mniejsza niż energia cząstki początkowej. Po dziesięciu jednostkach kaskadowych cząstek jest już około tysiąca ( $2^{10} = 1024$ ) i każda ma energię tysiąc razy mniejszą. Na głębokości 10 cm w ołowiu cząstek byłby milion i każda miałaby energię milion razy mniejszą. Miałyby, gdyby jeszcze ciągle była zdolne budować kaskadę, a to byłoby możliwe, gdyby energia pierwotna była bardzo, bardzo duża, no a takich elektronów na powierzchni ziemi raczej się nie spodziewamy.

Całe to rozumowanie przeprowadziliśmy po to, aby pokazać, że w naszym detektorze pod warstwą 10 cm ołowiu żaden elektron nie byłby w stanie wytworzyć mierzalnego sygnału. A jednak widzimy, że detektory nawet pod jeszcze grubszą warstwą ołowiu coś ciągle rejestrują. Widać to na wykresie. A dodatkowo, żeby było ciekawiej, liczba rejestrowanych cząstek kosmicznych właściwie nie zależy już od grubości ołowiu, przynajmniej w zakresie, w jakim to badaliśmy. Dwadzieścia czy trzydzieści jednostek kaskadowych nie ma znaczenia! I tu dochodzimy do niezwykle ważnego wniosku: cząstki, które mierzymy pod ołowiem (albo metrową warstwą betonu), to nie mogą być elektrony! To zupełnie nowy rodzaj promieniowania. Analizując to bliżej i bardziej szczegółowo możemy stwierdzić, że niewątpliwie mamy do czynienia z cząstkami o zupełnie innych własnościach niż te, jakie mają cząstki znane nam z naszego otoczenia, a nawet te z pracowni fizyki jądrowej Marii Skłodowskiej-Curie. W promieniowaniu kosmicznym jest coś, czego nie ma nigdzie na świecie. Odkryliśmy **miony!**

Tak naprawdę, to nie my je odkryliśmy. Zrobili to dwaj fizycy: Carl David Anderson i jego student Seth Neddermeyer w roku 1932.



Słynna fotografia pozytonu wykonana przez Andersona.

Anderson już wcześniej zapisał się na stałe w historii fizyki odkrywając inną elementarną cząstkę: pozyton (antyelektron), o którym już trochę mówiliśmy. Zauważył go na fotografii z komory Wilsona wyniesionej na balonie przeznaczonym oczywiście do badania promieniowania kosmicznego.

Pomysłem Andersona, wartym nagrody Nobla, którą otrzymał już w 1936 roku, było umieszczenie w komorze przegrody ołowianej, która miała za zadanie zmniejszyć energię cząstek przez nią przechodzących. Wiemy już, dlaczego postanowił użyć ołowiu. Dodanie do takiej komory pola magnetycznego pozwalało określić pędy cząstek mierząc promień ich zakrzywionego toru przed i po przejściu przez ołów, a także oczywiście określić patrząc, w którą stronę ten tor się zakrzywia, jaki był jej ładunek: dodatni czy ujemny. Anderson znalazł ślad cząstki, która traciła energię dokładnie tak, jak zwyczajny elektron, ale zakrzywiała się w drugą stronę.

Pozyton był pierwszą cząstką elementarną odkrytą w promieniowaniu kosmicznym. Mion był drugą. O ile antyelektronu fizycy spodziewali się, został on przewidziany teoretycznie przez P.A.M. Diraca w roku 1928 i na odkrycie czekał cierpliwie prawie 10 lat, o tyle mion zaskoczył wszystkich. Mionu nie spodziewał się nikt. Ilustruje to historyjka o innym nobliście I. I. Rabim (urodzonym w Rymanowie na Podkarpaciu!). Fizycy w tamtym czasie liczyli na to, że mion jest być może oczekiwanym bardzo nośnikiem oddziaływań silnych, mezonem Yukawy. Zbadano bliżej jego własności i okazało się mion oddziałującą bardzo niechętnie, o czym i my przekonaliśmy się dokładając kolejne warstwy ołowiu. Oczekiwania teoretyków nie spełniły się. Mion zupełnie nie pasował do obowiązującego wtedy obrazu mikroświata. Rabi podczas kolacji, którą spożywał wraz z kolegami fizykami w chińskiej restauracji zapytał: „Kto to zamawiał?”. Myślał najpewniej o mionie.

Faktycznie mion był nikomu (wtedy) do niczego niepotrzebny. Cały świat, w którym żyliśmy i żyjemy i dziś

składa się z protonów i neutronów w jadrach atomowych i elektronów na orbitach. No możemy zgodzić się na pozytony, bo wynikały one elegancko z równania Diraca. Ostatecznie moglibyśmy też zaakceptować i antyprotony, i antyneutrony, w myśl ogólnej zasady, że każda cząstka ma swoją antycząstkę. Bliższe poznawanie rozpadów promieniotwórczych, a w szczególności rozpadów  $\beta$  pokazało, że powinna w przyrodzie istnieć jeszcze inna cząstka, najpewniej pozbawiona masy i nienaładowana, więc praktycznie niemożliwa do zauważenia, która jednak zabiera część energii w tych rozpadach i część tę możemy zmierzyć. Jej istnienie jako pierwszy zaproponował Wolfgang Pauli (ten od zakazu). Nazwano ją neutrino i zobaczono dopiero w roku 1956. Oczywiście były jeszcze fotony, kwanty światła i to wszystko. W obrazie tym nie ma miejsca dla mionu. Ma on wszelkie cechy elektronu, a różnica polega jedynie na tym, że jest z grubsza 200 razy od elektronu cięższy. Komu i do czego coś takiego było potrzebne? Kto to zamawiał?

Okazuje się jednak, że miony mają swój sens. Nic w przyrodzie nie jest bez sensu (chyba).

Promieniowanie kosmiczne bywa nazywane akceleratorem dla ubogich i coś w tym jest. Zupełnie za darmo dostarczane są nam cząstki o energiach większych nawet niż te, jakie sami jesteśmy w stanie wytworzyć dziś w największych akceleratorach, a warto pamiętać, że w na początku lat trzydziestych akceleratorów nie było w ogóle i promieniowanie kosmiczne było jedynym źródłem danych o cząstkach elementarnych i ich oddziaływaniach. Wiadomo było, że przychodziło on do nas z góry, nic więc dziwnego, że aparaturę naukową umieszczano na balonach, w samolotach, czy na szczytach wysokich gór, czyli tam, gdzie była większa szansa, że trafi się na cząstkę o wielkiej energii. Tak właśnie Anderson odkrył dodatni elektron i z kolegą mion. Cała fizyka cząstek elementarnych narodziła się kilka kilometrów nad poziomem morza, a przy narodzinach asystowało wielu. Wymyślono nowe techniki i nowe narzędzia, aby te narodziny były szybkie i bezbolesne. Poza komorami Wilsona zastosowano technikę klisz jądrowych. Cecil Powell, uczeń Wilsona pracując na Uniwersytecie w Bristolu usłyszał w 1937 roku od przebywającego też tam akurat Waltera Heitlera o dwóch paniach Marietcie Blau i Hercie Wambacherer pracujących na Uniwersytecie Wiedeńskim. Używały one do rejestrowania cząstek naładowanych klisz fotograficznych i to używały z sukcesami. W 1937 wspólnie odkryły „gwiazdy”, efekty oddziaływań jądrowych na płytach fotograficznych wystawionych na działanie promieniowania kosmicznego na wysokości 2300 m nad poziomem morza. Technologia kliszowa była tania, szybka i obiecująca. Powell zwiększając zawartość bromku srebra w emulsji znacznie zwiększył czułość klisz i mógł już poszukiwać śladów nie tylko powolnych protonów i cząstek alfa.

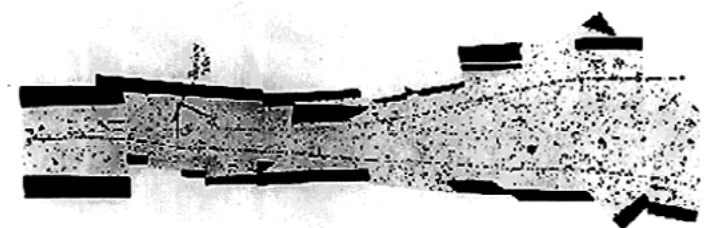
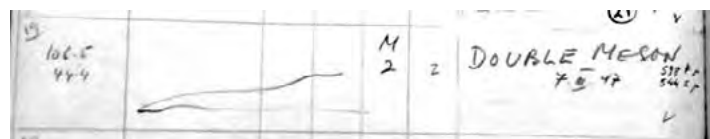
I właśnie wtedy zaczęła się wojna. Wszyscy nagle mieli inne ważniejsze sprawy i dalsze prace w interesującym nas temacie musiały ulec spowolnieniu.

Powell dysponował jeszcze kliszami jądrowymi i rozwijał powoli tę technikę w Bristolu. Jednocześnie Blackett pracował nad tym samym w Laboratorium Cavendisha.

Gdy wojna zbliżała się do końca, do Bristolu przyjechał z Brazylii znany włoski fizyk Giuseppe Occhialini, do którego niebawem dołączył jego student Cesare Lattes i to głównie ich zasługą było to, że znany producent sprzętu fotograficznego Ilford, a potem i Kodak wkrótce byli w stanie wyprodukować specjalne „emulsje do badań jądrowych”. Po wojennej przerwie prace ruszyły z kopyta. Jesienią 1946 roku Donald Perkins, pracujący wówczas w Imperial College w Londynie, naświetlił trochę klisz na wysokości 9100 m w samolocie RAF-u, a Occhialini zabrał kilkadziesiąt na Pic du Midi we francuskich Pirenejach na wysokość 2867 m.

Badanie emulsji w Bristolu i w Londynie ukazało, jak napisał później Powell, „zupełnie nowy świat. Było to tak, jakbyśmy nagle weszli do otoczonego murem sadu, w którym kwitły chronione drzewa i dojrzewały w wielkiej obfitości wszelkiego rodzaju egzotyczne owoce”. Ten nowy świat stał się przedmiotem intensywnych badań.

Na kliszach jądrowych widać było czasem ślad nalatującej bardzo szybkiej cząstki, która zderzała się z jądrem atomu wchodzącego w skład emulsji jądrowej, a ono rozpadało się tworząc „gwiazdę”, o jakiej wspominały wspomniane wyżej Austriaczki. Były to na pewno fascynujące obrazki, ale tym najważniejszym był zupełnie niepozorny ślad przybywającej z góry cząstki, który kończył się wewnątrz emulsji, zupełnie tak, jakby cząstka miała zbyt małą energię, by biec dalej. Najciekawsze jednak było to, że z miejsca chwilowego jej przystanku wylatywał ślad innej cząstki, która biegła z dużym pędem w swoją stronę. Trzeba było mieć wiele szczęścia, aby takie ślady zobaczyć i szczęście takie miała 7 marca 1947 roku Marietta Kurz, jedna z pań przeglądających klisze z Pic du Midi w Bristolu. Zdjęcie i fragment jej dziennika prezentujemy obok



Następne dni przyniosły taki sam „dwumezonowy” przypadek zaobserwowany przez Irenę Roberts. Przyjrzał się im Powell i jego student Muirhead i obaj stwierdzili zgodnie, że oto mamy dowód tego, że istnieją dwa rodzaje mezonów. Jeden jest cięższy i bardzo nietrwały i rozpada się na ten drugi właśnie. Pierwszy nazwali „p” (pionem) a drugi mezonem „m” (mionem).

Aby bliżej poznać nowe cząstki potrzeba było kolejnych obserwacji. Postanowiono przenieść klisze na większą wysokość. Lattes zaproponował udanie się na górę

Chacaltaya w boliwijskich Andach, niedaleko La Paz, gdzie na wysokości 5600 m znajdowała się już stacja meteorologiczna. Lattes, Muirhead, Occhialini i Powell w Nature w numerze z 24 maja 1947 roku opublikowali wartości mas obu cząstek na 260 i 205 mas elektronu i czas życia tej cięższej, pionu, około  $10^{-8}$  sekundy.

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

I tak odkryto pion, cząstkę oczekiwaną, przewidzianą teoretycznie przez Yukawę, nośnik oddziaływań między składnikami jąder atomowych zapewniających ich stabilność, a przy okazji wyjaśniono skąd w promieniowaniu kosmicznym biorą się miony. Powstają one głównie z rozpadających się pionów naładowanych (w 0.999877% przypadków, reszta to głównie rozpady na elektron i neutrino). Warto wspomnieć, że piony neutralne rozpadają się niemal natychmiast (ich czas życia to  $8,4 \times 10^{-17}$  sekundy) w 98,8% na dwa kwanty  $\gamma$  dodając dodatkowe kaskady do elektromagnetycznej składowej wielkich pęków atmosferycznych promieniowania kosmicznego.

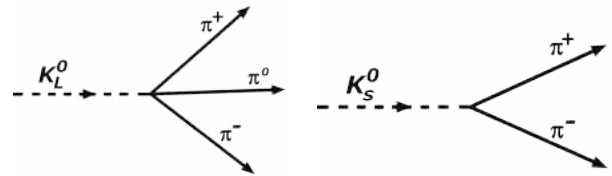
$$\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

I mogłoby się wydawać, że wystarczy, że nic nam już więcej nie potrzeba, ale nie. Natura pełna jest niespodzianek, a my po prostu o nich nie wiemy.

Rok 1947 był obfity w odkrycia w fizyce cząstek elementarnych. Na pionie się nie skończyło. Clifford Butler i George Rochester odkryli **kaon**, cząstkę bardzo dziwną. Przez 1500 godzin fotografowali oni na Uniwersytecie w Manchesterze komorę Wilsona z ołowianą poprzeczką (jak u Andersona). Zrobili ponad 5000 stereoskopowych fotografii i wśród nich znaleźli dwie fotografie zawierające rozwidlone ślady o dziwnym charakterze. Na jednej z nich było widać rozpad jakiejś nienaładowanej cząstki na dwa naładowane mezony, a na drugiej rozpad cząstki naładowanej na dwie lekkie cząstki, z których jedna była

naładowana, a druga nienaładowana. Oszacowali oni masę tej nowej cząstki na około połowę masy protony (~1000 razy większą niż masa elektronu). Nazwali ją cząstką „V” ze względu na kształt śladów na zdjęciu w komorze, co widać na fotografii i ogłosili swe odkrycie w Nature.

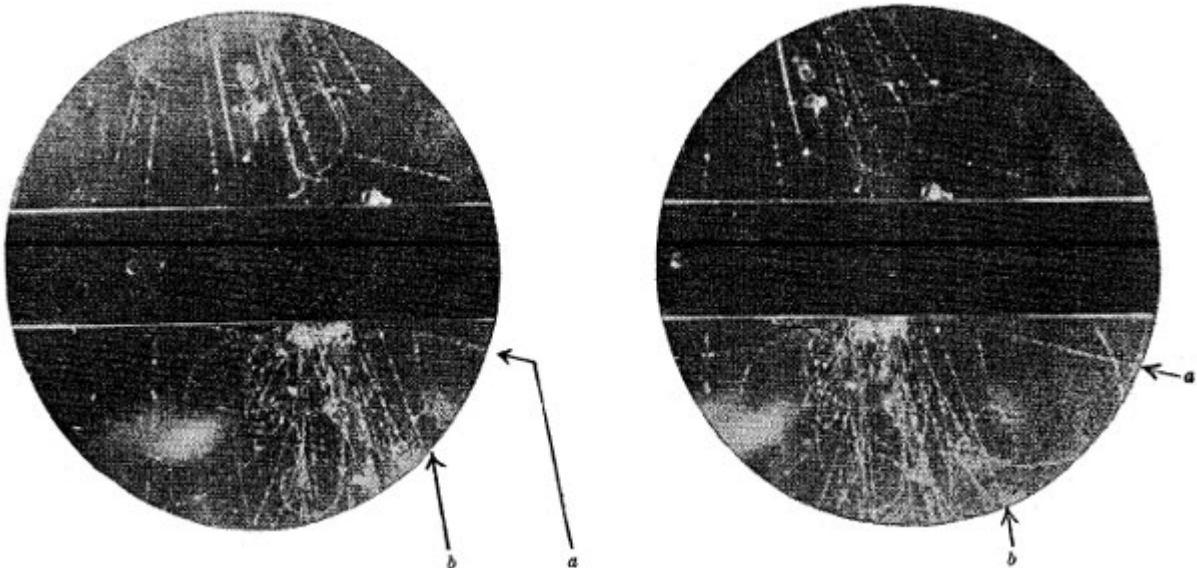
Cząstki V (kaony) zachowywały się dziwnie. W 1947 pani Rosemary Brown studentka Powella w Biristolu zauważyła rozpad kaonu na trzy cząstki.



Niby nic w tym dziwnego, ale reguły fizyki obowiązujące w świecie mikrocząstek nie dopuszczały, aby jakaś cząstka rozpadała się raz na dwa piony, a raz na trzy. W mikroświecie istnieje zasada zachowania parzystości. Nie ma to nic wspólnego z parzystością liczb naturalnych, a wiąże się z symetrią na odbicia zwierciadlane. Świat po tej stronie lustra i po tamtej powinien być identyczny. To dość skomplikowane i kaony okazały się także dość skomplikowanymi tworam natury. Na dodatek okazało się, że żyją one bardzo długo. Aby to jednak stwierdzić, potrzebne były nowe narzędzia i nowe dane.

Pierwsze akceleratory budowano już w latach 20, ale energie w nich uzyskiwane były zdecydowanie zbyt małe, by mogły otworzyć szerzej furtkę dla fizyki cząstek elementarnych. W latach 30 budowano pierwsze małe cyklotrony, w 40 zrealizowano koncepcję betatronu, ale dopiero w latach 50 pojawiły się Cosmotron w Brookhaven, Bevatron w Berkeley i SPS w CERNie i od tego czasu promieniowanie kosmiczne przestało być jedynym źródłem informacji o fizyce mikroświata, a przynajmniej mikroświata średnich i niedużych energii.

Uzyskano nowe dane o rozpadach kaonów i ponad wszelką wątpliwość udało się stwierdzić, że żyją one za



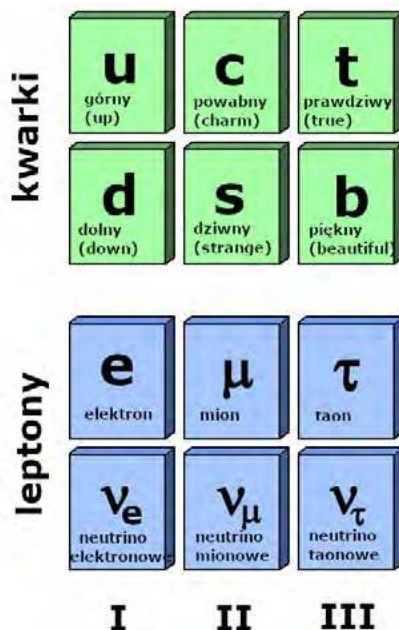
Stereoskopowa fotografia pokazująca dwuciałowy rozpad neutralnego kaonu, jaki zobaczyli Rochester i Butler. Literki a i b pokazują ślady naładowanych pionów.

długo. Czas ich życia mierzony w spoczynku (od czasów Einsteina wiadomo było, że jeśli poruszamy się szybko, żyjemy dłużej, dotyczy to także kaonów, jeszcze do tego wrócimy) to jakieś  $10^{-10}$  sekundy, a wszelkie teoretyczne przewidywania wskazywały na to, że nie powinny żyć dłużej niż  $10^{-23}$  sekundy. Różnica to ponad bilion razy – dużo!

Na tyle dużo, że kaony oficjalnie nazwano cząstkami **dziwnymi**.

Niebawem okazało się, że świat cząstek elementarnych jest znacznie bogatszy niż się komukolwiek wydawało. Dziś ilość cząstek elementarnych podobnych do pionów, kaonów, czy protonów, określanych ogólnie hadronami, liczy się w tysiącach. Pozornie zapanował w tym świecie nieopisany bałagan, ale Natura jest na tyle łaskawa, że w każdym (no, prawie każdym) bałaganie można odnaleźć jakiś porządek. I porządek taki znaleźli, a właściwie zaproponowali Murray Gell-Mann i niezależnie od niego George Zweig na początku lat 60. Gell-Mann dostał (za całokształt) Nobla w 1969 roku, a Zweig jakoś nie. Teoria ta jest obecnie częścią tak zwanego Modelu Standardowego. Elementarnymi składnikami materii są **kwarki** i **leptony**. Jednych i drugich jest sześć. Poza nimi mamy oczywiście odpowiadające im antycząstki, które na mocy symetrii ładunkowej mają dokładnie takie same własności i zachowują się dokładnie tak samo (poza tym, że są anty-). Kwarki i leptony dzielą się na trzy dwuskładnikowe rodziny. Pokazuje to obrazek. Kwarki z pierwszych rodzin są najlżejsze w swojej klasie, a zatem te z klas drugiej i trzeciej w końcu się na nie rozpadają i pozostają tylko elektrony, neutrina z nimi stowarzyszone (tu sprawa nie jest jeszcze do końca rozstrzygnięta, bo neutrino wymykają się nieco spod opisu Modelu Standardowego) i kwarki **u** i **d**, które oczywiście nie występują samodzielnie, a łączą się w pary i trójki (może nawet piątki).

Proton zbudowany jest z trzech kwarków: dwóch kwarków **u** i jednego **d**, neutron odwrotnie z dwóch kwarków **d** i jednego **u**. A jak wiemy jądra wszystkich atomów skła-



dają się z protonów i neutronów, a dookoła jąder krążą elektrony. Nic więcej nie jest nam potrzebne.

Inne hadrony składają się z trzech kwarków (albo z trzech anty-kwarków i mamy wtedy do czynienia z anty-cząstką). Są generalnie cięższe i nazywa się je barionami od greckiego słowa βαρύς co oznacza ciężki. Mogą też być złożone z kwarka i anty-kwarka i mówimy o nich mezony, od greckiego μέσος, średni. Pion dodatni to para (**anty-d**), pion ujemny (**d** i **anty-u**). Pion neutralny jest kombinacją „po połowie” stanów (**u** i **anty-u**) i (**d** i **anty-d**). Pytanie Docieklivego Czytelnika: jak to mogą się „składać” razem dwa różne stany, jest bardzo głębokie, ale odpowiedź na nie wymaga niestety znajomości fizyki kwantowej. Na razie, powiedzmy tyle, że tak samo składa się Kot Schrödingera. Nic to nie wyjaśnia, ale jest jakąś odpowiedzią.

Kaon dodatni to (**u** i **anty-s**), ujemny (**anty-u** i **s**), a kaon neutralny to (**d** i **anty-s**). A gdyby ktoś docieklivy spytał, czym jest (**anty-d** i **s**), to odpowiedź jest prosta anty-kaonem, który też jest neutralny.

Docieklivy Czytelnik mógłby zapytać też, jak z tych sześciu elementów można złożyć tysiące układów, cząstek, o jakich wspomnieliśmy. I tu odpowiedź jest prosta. Każdy z takich układów można wzbudzić, można dostarczyć mu nieco energii, nie na tyle dużo, aby go rozbić zupełnie, ale tyle, aby mógł zająć wyższy poziom energetyczny, osiągnąć stan o większej masie, stan rezonansowy. Trochę to przypomina wzbudzanie atomów. Atom z elektronami przeniesionymi na wyższe poziomy jest zasadniczo inny od atomu w stanie podstawowym. Można by go nawet nazwać jakoś inaczej. Nie robimy jednak tego, bo wzbudzone atomy żyją tak krótko, że nie warto wymyślać dla nich specjalnych nazw, choć fizyce zajmujący się zawodowo badaniem stanów wzbudzonych mają dla nich specjalne złożone określenia.

Gdzie możemy zobaczyć to całe zoo?

Są dwa takie miejsca. Pierwsze to laboratoria fizyków, fizyków wysokich energii. Laboratoria wyposażone w akceleratory, gdzie najtęższe głowy pracowały nad tym, jak rozpedzić protony, czy cięższe atomowe jądra do wielkich energii, aby je potem zderzyć z innymi protonami, innymi jądrami. W takich zderzeniach rodzą się nowe cząstki, każde, wedle życzenia. Jednych rodzi się więcej, innych mniej. Jeśli się ma dostatecznie dużo cierpliwości, w końcu każdą się zobaczy. Prawie wszystkie rozpadają się niemal natychmiast. Rozpadają się na inne, lżejsze cząstki, które też najczęściej mogą się rozpaść i tylko te najdłużej żyjące dają się zobaczyć w niezwykle wyrafinowanych dziś detektorach, współczesnych komorach Wilsona.

I jest jeszcze drugie takie miejsce. To oczywiście aparaty mierzące promieniowanie kosmiczne. Cząstki o wielkich energiach same wpadają w ziemską atmosferę i tam rozminiają swoją energię na mnóstwo nowych cząstek, których większość rozpada się natychmiast na inne, lżejsze cząstki...i tak dalej. Do detektorów na powierzchni ziemi dochodzą elektrony (i pozytony), które jako najlżejsze leptony nie mają się już na nic rozpaść. Mogą najwyżej zatrzymać się gdzieś nad nami, jeśli braknie im energii na dalszą podróż.

Poza nimi dochodzą do ziemi miony. Powstają one wysoko w atmosferze najczęściej w rozpadach pionów i, jako

że oddziałują niechętnie i tracą energię bardzo powoli, mają duże szanse trafić w nasze detektory. Piony (i kaony) też z rzadka docierają do powierzchni ziemi. Po drodze najczęściej oddziałują z jądrami atmosfery produkując nowe pokolenia pionów (i kaonów), ale jeśli startowały z dużymi energiami i miały trochę szczęścia, czasem w którymś kolejnym pokoleniu uda się im dotrzeć aż do poziomu morza, do nas. Kaskadzie hadronowej towarzyszy oczywiście zawsze kaskada elektromagnetyczna złożona, jak już wiemy z elektronów (pozytonów) i fotonów, których jest dużo, dużo więcej. Aby zobaczyć hadron, czyli tak naprawdę wyłowić go z morza elektronów (i mionów) trzeba budować bardzo szczególne i bardzo skomplikowane detektory. Detektory takie jak nasze nie są w stanie odróżnić jednych od drugich i po prostu zobaczą hadron jako kolejną naładowaną cząstkę przychodzącą z góry.

Załóżmy, że miony są wytwarzane na typowej wysokości około 15 km nad ziemią. Jeśli poruszają się one z prędkością światła, to czas potrzebny na przebycie 15 km wynosi

$$t = \frac{x}{c} = \frac{15000}{3 \times 10^8} = 5 \times 10^{-5} \text{ s}$$

Jeśli średni czas życia cząstek wynosi  $\tau_0 = 2.2 \times 10^{-6}$  s, to ułamek mionów powstałych na wysokości 15 km, które dotrą do powierzchni ziemi dany jest funkcją wykładniczą i powinien wynosić:

$$N = N_0 \times \exp\left(-\frac{t}{\tau_0}\right)$$

a zatem

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\frac{5 \times 10^{-5}}{2.2 \times 10^{-6}}\right) = 1.3 \times 10^{-10}$$

To oznacza, że prawie żadne miony do poziomu gruntu nie dotrą!

Ale zgodnie z teorią względności, cząstka poruszająca się z jakąś prędkością powinna mieć średni czas życia dłuższy niż czas życia cząstki w spoczynku  $\tau_0$ , a dokładnie równy ( $\gamma \times \tau_0$ ). Współczynnik  $\gamma$  jest nazywany współczynnikiem Lorentza i ma postać

$$\gamma = 1 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

gdzie  $v$  jest prędkością cząstki, a  $c$  to oczywiście prędkość światła.

Fizycy cząstek elementarnych częściej pracują w kategoriach energii cząstek niż ich prędkości. Jeśli mamy

Doświadczalne potwierdzenie realności dylatacji czasu poprzez porównanie liczby mionów promieniowania kosmicznego wykrytych na szczycie góry (na wysokości 1097 m n.p.m.) z liczbą mionów docierających do Uniwersytetu w Edynburgu (76 m n.p.m.) nad poziomem morza wykonały dwie studentki z Edynburga w roku 2006. Artykuł na ten temat opublikowano w CERN Courierze. Przedsięwzięcie nie było wcale łatwe, bo dla odciążenia się od mionów o małych energiach, by mieć znacząco duże czynniki

Detektory projektu CREDO-Maze mogą za to odróżnić składową mionową (zwaną twardą) wielkich pęków atmosferycznych od składowej elektronowej (zwaną dla odmiany miękką). Doświadczenie, od którego zaczęliśmy ten tekst pokazało, jak to zrobić. Wystarczy przykryć liczniki kilkoma centymetrami ołowiu, kilkudziesięcioma centymetrami betonu, albo czymś innym w tym rodzaju (pamiętajmy, że im większe  $Z$ , tym lepiej) i mamy już licznik wyłącznie mionów.

Przy okazji, mając detektor mionów możemy w prosty sposób udowodnić niedowiarkom, że teoria względności Einsteina jest prawdziwa i że w poruszającym się układzie odniesienia czas biegnie wolniej.

Poniższy przykład efektu dylatacji (rozciągnięcia) czasu w przypadku mionów jest oparty na opisie zamieszczonym na stronie 14 książki Arnolda W. Wolfendale'a „Cosmic Rays” (wyd. George Newnes Limited, 1963.

do czynienia z cząstką, która ma masę (spoczynkową, to znaczy taką, jaką by miała spoczywając na wadze, czyli mając prędkość  $v = 0$ )  $m_0$ , którą rozpędzono do prędkości  $v$ , to  $m$  a ona oczywiście energię  $E = mc^2$ , a występujące w tym wzorze  $m$  to masa cząstki poruszającej się właśnie z prędkością  $v$ . Masa cząstki poruszającej się dana jest prostym równaniem  $m = \gamma m_0$ , czyli  $E = m = \gamma m_0 c^2$ , a stąd

$$\gamma = \frac{E}{m_0 c^2}$$

Jeśli weźmiemy teraz bardzo energetyczny mion o energii powiedzmy 20 GeV, to wiedząc, że masa spoczynkowa mionu to jakieś 200 mas elektronu, czyli 106 MeV, jego czynnik Lorentza wynosi

$$\gamma = 20 \text{ GeV} / 106 \text{ MeV} = 20 \times 10^9 / 106 \times 10^6 = 189$$

Średni czas życia takiego poruszającego się mionu jest 189 większy od czasu życia mionu w spoczynku

$$\tau = 189 \times 2.2 \times 10^{-6}$$

Ułamek 20 GeVowych mionów powstałych na 15 kilometrach zdolnych do dotarcia do poziomu gruntu staje się teraz większy:

$$\frac{N}{N_0} = \exp\left(-\frac{5 \times 10^{-5}}{189 \times 2.2 \times 10^{-6}}\right) = 0.89$$

co oznacza, że mion taki ma wielką szansę do powierzchni ziemi dolecieć. Oczywiście obliczenia te zgadzają się wynikami eksperymentów.

Lorentza, aparaturę postanowiły przykryć prawie półmetrową warstwą ołowiu i na szczyt należało wnieść go 400 kg, ale udało się. Teoria względności została potwierdzona.

A przy okazji warto wspomnieć, że aparatura CREDO-Maze z niewielką przeróbką może być użyta do wyznaczenia czasu życia mionów, ale o tym już może przy innej okazji.

Tadeusz Wibig,

Katedra Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Łódzkiego

# Albert Einstein (1879-1955) – ruchy Browna

Tadeusz Wibig

W cudownym roku 1905 Einstein opublikował nie tylko pracę przedstawiającą światu szczególną teorię względności, o czym wszyscy wiedzą doskonale i inną opisującą kwantową naturę światła, o czym pisaliśmy ostatnio, ale poświęcił też nieco swej genialnej uwagi teorii ruchów Browna. Zacznijmy od przypomnienia, kto to był Brown i co mu się tam ruszało.

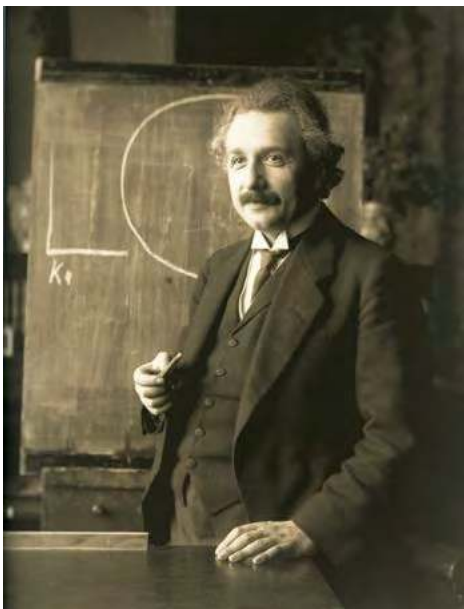
Robert Brown był wybitnym botanikiem, biologiem i Szkotem żyjącym w końcu XVII i na początku XIX wieku. Zasłynął z wyprawy badawczej na okręcie „Investigator” do Australii, której florę z zapałem badał i katalogował przez trzy lata opisując 3400 gatunków, z czego 2000 było dotąd w ogóle nauce nieznanymi. Opracowywanie całej kolekcji po powrocie do Anglii zajęło mu kolejne lata i zapewniło znamienitą pozycję w Londyńskim Towarzystwie Linneuszowskim, którego w końcu został prezesem.

Zanim do tej godności doszedł popatrzył na swoje rośliny przez mikroskop, czego konsekwencją było jego wystąpienie w roku 1831 przed Towarzystwem, w którym ogłosił, że w komórkach występują komórkowe jądra. Może nie we wszystkich, bo wszystkich komórek jeszcze wtedy nie przebadał, ale wśród organizmów jednoliściennych to na pewno. Inni przed nim też pewnie je widzieli i nawet coś rysowali, ale we wnioskach ze swych obserwacji nie poszli tak daleko, a pewno nie nazwali tych tworów jądrami. Te nazwę wymyślił Brown i jak wiemy przyjęła się ona już na stałe.

Z rzeczy, które Brown zobaczył pod mikroskopem, interesuje nas jednak coś innego. Jako biologa interesował go proces rozmnażania, rozmnażania roślin, a szczególnie kwiatka *Clarkia pulchella* z rodziny wiesiołkowatych znanemu u nas jako dzierotka nadobna, klarkia piękna, czy marszawa nadobna. Kwiatek ten, jak i inne kwiatki ma męskie organy płciowe zwane pręcikami, a one wytwarzają pyłek. Ziarna pyłku zawierają jeszcze mniejsze struktury, takie jak amyloplasty czy sferosomy i to one skupiły na sobie uwagę Browna. Mają one rozmiary kilku mikronów i obserwowane pod trzystukrotnie powiększającym mikroskopem wykonywały chaotyczne ruchy, przemieszczały się w nieprzewidywalnych kierunkach.

Początkowo Brown przypuszczał, że są to procesy życiowe związane z biologiczną naturą tych drobin, ale udało mu się jednak stwierdzić, że ponad stuletnie, a więc już raczej nieżywe od dawna pyłki też wykazują taką samą dziwną ruchliwość. Później zaobserwowano to samo zjawisko u cząsteczek zupełnie nieorganicznych, takich jak okruchy szkła czy kamienia (w szczególności okruchów Wielkiego Sfinksa z Gizy).

Brown nie próbował podać żadnego wyjaśnienia odkrytych przez siebie ruchów. Dopiero około roku 1880 po zauważeniu, że wyższe temperatury powodują ruchy szybsze, zasugerowano, że ich przyczyna leży w termicznym ruchu cząsteczek cieczy. Koncepcja, że cząsteczki cieczy lub gazu są w ciągłym ruchu, zderzają się ze sobą i odbijają od siebie, to podstawa kinetycznej teorii gazów zaproponowanej w tamtym czasie i rozwijanej przez Ja-



Albert Einstein rok 1921 w Wiedniu – foto wikimediacommons



Marian Smoluchowski – foto wikimediacommons



William Sutherland – foto [https://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Sutherland\\_%28physicist%29](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Sutherland_%28physicist%29)

mesa Clerka Maxwella, Ludwiga Boltzmanna, Rudolfa Clausiusa i wielu innych.

Koncepcje te na początku XX wieku przebijały się dopiero do świadomości ludzkości. Dziś nie widzimy nic niezwykłego w tłumaczeniu ruchów Browna jako efektu bombardowania cząsteczki pyłku z różnych stron przez małe cząsteczki cieczy, w której jest on zawieszony. W roku 1905 matematyczne opisanie tego procesu było wielkim osiągnięciem fizyki statystycznej i niepodważalnym dowodem na atomową budowę materii. I tym zagadnieniem zajął się Einstein.

W pracy „Über die von der molekularkinetischen Theorie der Wärme geforderte Bewegung von in ruhenden Flüssigkeiten suspendierten Teilchen” (O ruchu małych cząsteczek zawieszonych w cieczach w molekularnej kinetycznej teorii ciepła) Einstein napisał równanie dyfuzji dla cząsteczki pyłku:

$$\frac{dp}{dt} = D \frac{d^2 p}{dx^2}$$

gdzie  $D$  nazywa się współczynnikiem dyfuzji, a  $p$  to interesująca nas funkcja określająca prawdopodobieństwo znalezienia dyfundującej cząsteczki w chwili  $t$  w miejscu  $x$ . Równanie to ma proste rozwiązanie

$$p(x, t) \sim \exp\left(-\frac{x^2}{4Dt}\right)$$

z którego wynika, że średnie przesunięcie cząsteczki pyłku po czasie  $t$  jest równe

$$\sqrt{x^2} = \sqrt{2Dt}$$

czyli że średnie przesunięcie cząsteczki pyłku rośnie jak pierwiastek z czasu obserwacji.

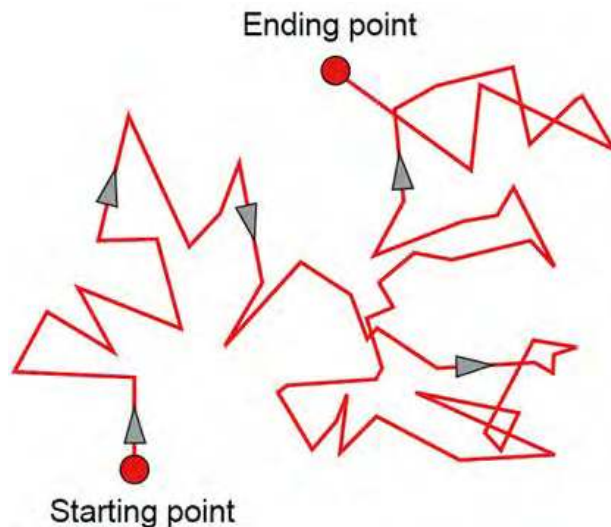
Ale Einstein na tym nie poprzestał, wyprowadził jeszcze zależność wiążącą lepkość płynu  $\gamma$ , temperaturę  $T$  i występujący wyżej współczynnik dyfuzji.

$$\gamma D = k_B T$$

( $k_B$  to stała Boltzmanna). Zależności te pozwalały na empiryczne zweryfikowanie kinetycznej teorii materii, a przy okazji wyznaczenie stałej Boltzmanna, a tym samym liczby Avogadro, czyli ustalenie, ile jest cząsteczek w konkretnym kawałku materii.

Wielkie osiągnięcie myśli teoretycznej i fizyki w ogóle.

W tym samym czasie, a tak naprawdę to już wcześniej pracował nad tym samym problemem jeden z największych polskich fizyków, Marian Wilhelm Teofil Ritter von Smolan Smoluchowski, czyli po prostu Marian Smoluchowski, człowiek wielu zdolności i pasji. Gdyby nie to, że zmarł przedwcześnie w roku 1917 podczas szalejącej w Krakowie wojennej epidemii czerwonki, byłby niemal pewnym kandydatem do nagrody Nobla. Za prace nad atomistyczną budową materii nagrodę tę (acz z chemii) w roku 1925 przyznano Richardowi Adolfowi Zsigmondy'emu i w 1926 roku Theodorowi H.E. Svedbergowi badaczom między innymi ruchów Browna, a Jean Baptiste Perrin w 1926 dostał Nobla z fizyki za prace nad nieciągłą strukturą materii.



Schemat ruchu cząsteczek – foto wikimediacommons

Smoluchowski opracował po swojemu teorię ruchów Browna wcześniej niż Einstein, ale nie zdecydował się na jej opublikowanie przed jej potwierdzeniem eksperymentalnym przez Franza Serafina Exnera. Po zapoznaniu się z pracą Einsteina postanowił jednak przedstawić światu swoje rozważania. Gdyby nie zwlekał, zasługa i sława z tytułu wyjaśnienia teorii ruchu Browna należałyby do naszego rodaka. Wyprowadził on to samo równanie na średni kwadrat przesunięcia cząsteczki pyłku, jednak nieco inną postać miała jego zależności współczynnika dyfuzji od lepkości i temperatury. Średnie przesunięcie cząsteczki Browna u Smoluchowskiego było o  $\sqrt{64/27}$  razy większe niż Einsteina i to był błąd – błąd Smoluchowskiego.

Einstein i Smoluchowski to jednak nie jedyni fizycy zaangażowani w tamtych latach w problemy ruchów Browna. Był jeszcze ktoś trzeci, Najmniej znany, a kto wie, czy nie ten, któremu należy się palma pierwszeństwa – William Sutherland. Szkot, który w wieku 5 lat wyemigrował do Australii. W 1902 opublikował on swoje rozważania pod tytułem „Ionization, Ionic Velocities, and Atomic Sizes” (Jonizacja, prędkości jonów i rozmiary atomów) w „Philosophical Magazine”. Nawiasem mówiąc Einstein znał tę pracę i dyskutował o niej ze swoim przyjacielem Michele Angelo Besso.

Sutherland zaś dalej robił swoje i w styczniu 1904 roku przedstawił na Australasia Association for the Advancement of Science pracę „The measurement of large molecular masses” (Pomiar mas dużych cząsteczek). Przesłał ją w marcu 1905 roku do „Philosophical Magazine” i ukazała się ona tam w czerwcu tegoż roku pod tytułem „A dynamical theory of diffusion for non-electrolytes and the molecular mass of albumin” (Dynamiczna teoria dyfuzji dla nieelektrolitów i masa cząsteczkowa albuminy).

Słynna praca Einsteina o ruchach Browna „Über die von der molekularkinetischen Theorie...” ukazała się w maju 1905. Sutherland opisywał w swojej pracy własne podejście do teorii dyfuzji. Teoria ta była dokładnie taka sama, jak Einsteina i prowadziła do tych samych końcowych wyników.

Dlaczego więc to Einstein jest uznawany za twórcę teorii ruchów Browna, a o Sutherlandzie prawie nikt nie słyszał, poza może Australią?

Powody są chyba dwa. Pierwszy jest natury „epistemologiczno-medialnej”: Einstein w swojej pracy zajmował się świadomością i z premedytacją jednym z podstawowych problemów fizyki tamtych czasów, problemem istnienia atomów, a przy okazji niejako wyznaczył liczbę Avogadro, zaś Sutherland prowadził swoje rachunki, zakładając, że atomy po prostu istnieją i nie dyskutując wcale problemu ich fizycznej rzeczywistości próbował rozwiązać konkretny problem znajdowania mas dużych cząstek. I mimo iż rachunki obu były takie same, to ich odbiór społeczny był, jaki był.

Drugim powodem było to, że na początku XX wieku fizyka teoretyczna była w dużej mierze sprawą niemiecką. O ile zajmowano się relacją dyfuzja-lepkosć, a początkowo nie zajmowano się tym w ogóle, to robili to wyłącznie badacze z kontynentu, którzy przeczytali pracę Einsteina z „Annalen der Physik”, ale nie zauważyli, że zależność ta pojawiła się również w pracy Sutherlanda w „Philosophical Magazine”.

No a był jeszcze Smoluchowski, który opublikował swoją pracę początkowo po polsku „Zarys teorii kinetycznej ruchów Browna i roztworów mętnych” i dopiero potem po niemiecku w „Annalen”. Zostawmy już jednak sprawę pierwszeństwa i wróćmy do fizyki.

Wynalezienie ultramikroskopu przez Zsigmondy’ego w roku 1903 znacznie ułatwiło badania ilościowe. Pozwoliło na oglądanie bardzo małych cząstek zawieszonych w roztworach. W następnych latach przeprowadzono kilka ważnych ilościowych eksperymentów. Pierwszym był Exner w Wiedniu, potem w 1906 roku Svedberg z Uppsali opublikował swoje wyniki, Francuzi Perrin, Joseph Ulysses Chaudesaigues i Victor Henri w roku kolejnym, no i w końcu udało się zweryfikować doświadczalnie teorię Einsteina. Położyło to definitywny kres sceptycyzmowi, co do istnienia atomów i cząstek jako rzeczywistych bytów fizycznych, a przy okazji, jak zauważył sam Einstein w roku 1917 „Dzięki zrozumieniu istoty ruchów Browna, wszystkie wątpliwości co do poprawności boltzmannowskiej interpretacji praw termodynamiki nagle zniknęły”.

## Doświadczenie domowe

### Dyfuzja – równanie Einsteina

#### A. Potrzebne materiały

1. 5 szklanek, ostatecznie mogą być 3,
2. woda zimna,
3. woda ciepła,
4. atrament.

#### B. Narzędzia – mazak lub coś innego do zaznaczania poziomu wody w szklance

#### C. Kolejność czynności

1. Na każdej ze szklanej zaznaczyć kreską poziom „pełnej szklanki”.
2. Ustawić szklanki w szeregu.
3. Na środkowej szklance zaznaczyć „połowę” (połowę „pełnej szklanki”).
4. Jeśli mamy 5 szklanek, to na kolejnych odpowiednio 3/4 i 1/4 „pełnej szklanki”.
5. Po kolei do szklanek wlać zimnej wody do zaznaczonego na nich poziomów.
6. Uzupelnąć szklanki do pełna gorącą wodą.
7. Odczekać jakiś czas, aż woda w szklankach się uspokoi i temperatura się wyrówna.
8. Do szklanek wpuścić w miarę jednocześnie po kropli atramentu.
9. I obserwować.

Powinniśmy zobaczyć efekt równania Einsteina  $D = k_B T / \gamma$ .

Im wyższa temperatura tym szybciej zachodzi dyfuzja i tym szybciej atrament rozchodzi się w wodzie.



# Interaktywne eksperymenty

## badające zmianę długości i prędkości fali świetlnej

Foto – Dreamstime

Andrzej Sokolowski

Jakkolwiek zjawisko załamania światła może być przeprowadzone w klasopracowni fizycznej, pewne jego elementy, jak na przykład obrazowe przedstawienie zmiany długości fali świetlnej nie jest możliwe. Poniżej proponuję krótkie eksperymenty podparte fizycznymi symulacjami pozwalające na obrazowe, jak również i numeryczne badanie tych zależności. Symulacje te dostępne są na internecie [https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light\\_pl.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_pl.html) (1) a ich niewątpliwą zaletą jest, że przetłumaczone są na język polski.

Eksperymenty mogą być przeprowadzone w klasie razem z uczniami a dane pobrane korzystając ze szkolnego projektora, albo mogą być zadane jako samodzielna praca ucznia. Jako środek poznawczy eksperymenty te stanowią atrakcyjną formę zobrazowania podstawowych zjawisk dotyczących właściwości fal elektromagnetycznych. Mogą one być zrealizowane w klasie 8 albo służyć jako powtórzenie materiału w szkole średniej.

Badania wykazują, że uczniowie zapamiętują lepiej nową wiedzę, jeśli mają okazję przewidywania i weryfikacji tej wiedzy (2), (3). Dydaktyka tych eksperymentów jest więc tak zaprojektowana, aby uczeń miał możliwość weryfikacji swoich przewidywań korzystając z tych symulacji. Artykuł napisany jest w formie gotowej karty pracy ucznia, którą nauczyciel może wydrukować i zadać uczniom do pracy.

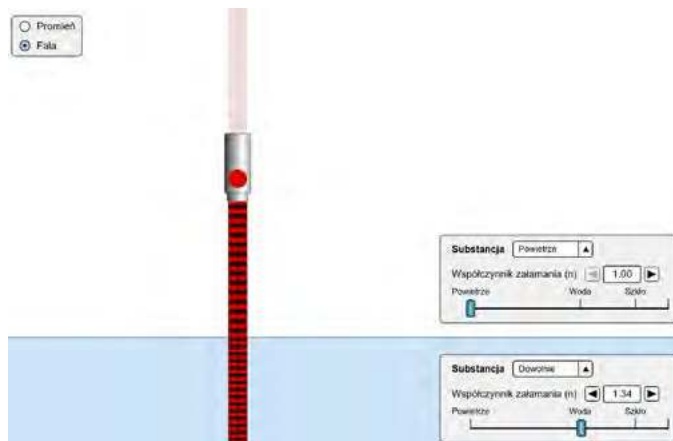
### Eksperyment 1: Analiza równania falowego

Korzystając z poprzednio poznanej wiedzy, które z podanych niżej parametrów światła zmieniają się, gdy światło przechodzi z jednego ośrodka do drugiego?

- Kolor \_\_\_\_\_
- Częstotliwość fali \_\_\_\_\_
- Długość fali \_\_\_\_\_
- Prędkość fali \_\_\_\_\_

Otwórz [https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light\\_pl.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_pl.html)

Lasery wysyła czerwoną wiązkę światła. Długość fali tej wiązki jest zobrazowana jako odległość pomiędzy dwoma



Ryc. 1 Zmiana długości fali. Źródło <https://phet.colorado.edu>

czerwonymi lub czarnymi poziomymi kreskami, które to ilustrują maksymalne lub minimalne natężenie tej fali (zobacz Ryc.1).

- Jako ośrodek a którego promień jest wysyłany ustaw powietrze, a ośrodek załamania światła jako wodę.
- Skieruj źródło światła prostopadle do granicy ośrodków ( $0^\circ$  od linii normalnej) tak by można lepiej zaobserwować jak zmienia się długość fali.
- Włącz źródło fali i kliknij przycisk *odtwórz*

Podstawową wielkością fizyczną używaną do numerycznego określenia koloru światła jest jego częstotliwość.

- Czy kolor wiązki światła się zmienił przy przejściu do wody?
- Czy więc zachodzi zmiana częstotliwości światła gdy przechodzi ono do innego ośrodka?
- Woda jest gęstym optycznie ośrodkiem (woda posiada wyższy tzw. współczynnik załamania). Jak zmieniła się długość fali światła czerwonego, gdy światło przeszło z powietrza do wody?

Długość fali,  $\lambda$  i częstotliwość  $f$  służą do obliczenia prędkości fali w danym ośrodku. Nie jest możliwe obserwowanie prędkości tej fali w ośrodku „gołym okiem”, ale jest możliwe oszacowanie jej zmiany biorąc pod uwagę zmianę długości i częstotliwości, korzystając z równania falowego, które ma następującą postać:

$$v = f\lambda \quad (1)$$

- Korzystając z równania falowego odpowiedz, czy prędkość tej wiązki zmieniła się w wodzie? Uzasadnij swoją odpowiedź.
- Zweryfikuj teraz swoje odpowiedzi do pytań postawionych na początku eksperymentu korzystając z symulacji.

Jeśli Twoje przypuszczenia nie były poprawne, wyjaśnij istotę błędów.

## **Eksperyment 2: Badanie efektów współczynnika załamania światła**

Woda, szkło i inne przezroczyste substancje charakteryzują się tzw. *współczynnikiem załamania* oznaczonym  $n$ . Współczynnik ten służy do obliczania (lub dalszego uzasadniania) prędkości, długości i częstotliwości wiązki światła w danym ośrodku. Zmiany długości fali można uzasadnić, odwołując się do odległości między dwoma kolejnymi czerwonymi lub czarnymi obszarami na fali, co wcześniej praktykowaliśmy. Ośrodek, do którego fala przechodzi, jest nazywany ośrodkiem załamującym.

- Jak zmienia się długość fali światła, jeśli współczynnik ośrodka załamującego się zwiększy? \_\_\_\_\_
- Jak zmienia się prędkość fali? \_\_\_\_\_
- Czy kolor wiązki padającej, czyli jej częstotliwość się zmieni?

Przesuń teraz suwak współczynnika załamania maksymalnie w prawa stronę skali (zobacz Ryc.1)

- Czy Twoje przewidywania odnośnie zmiany częstotliwości i długości fali były poprawne?

## **Podsumowanie dotychczasowych badań:**

*Prędkość światła ulega zmniejszeniu, jeśli wiązka światła biegnie do ośrodka o większym współczynniku załamania; skróceniu też ulega długość fali. Częstotliwość fali, a więc jej kolor, nie ulegają zmianie.*

Fizycy starają się przedstawić zjawiska fizyczne w postaci matematycznej. W dalszej części razem będziemy starć się wyprowadzić więcej zależności, które ułatwią zrozumienie tych zjawisk.

**Sformułowanie matematycznej zależności pomiędzy współczynnikiem załamania światła, długością i częstotliwością fali.**

Współczynnik załamania jest wielkością bezwymiarową i określa on iloraz lub stosunek prędkości światła pomiędzy dwoma ośrodkami oznaczonymi jako  $v_1$  i  $v_2$  w którym światło się przemieszcza.

$$n = \frac{v_1}{v_2} \quad (2)$$

Wartość tego współczynnika jest matematycznie przedstawiona jako  $n \geq 1$ .

Każda przezroczysta substancja określona jest współczynnikiem załamania, który jest obliczany względem próżni, ośrodka, z którego to światło jest wysyłane. Współczynnik ten ma wartość większą lub równą niż 1, ponieważ *prędkość światła* w jakimkolwiek innym ośrodku niż próżnia się zmniejsza (długość fali ulega zmniejszeniu!),

$$n = \frac{c}{v_1} \quad (3)$$

Na przykład, dla wody ten współczynnik ma wartość 1.33, a dla szkła wartość ta jest 1.5.

Korzystając z równania (3) spróbujmy teraz wyprowadzić związek na zmianę długości fali przy zmianie ośrodków. W tym celu skorzystamy z równania falowego (1);

$$v = f\lambda$$

Sprecyzujmy oznaczenia tych parametrów tak by korelowały one z ośrodkami, w których fala się przemieszcza; w próżni wzór falowy będzie miał więc następującą formę;  $c = f_o\lambda_o$ . W każdym innym ośrodku forma ta jest

$$v_1 = f_1\lambda_1. \text{ Podstawmy te równania do wzoru (3) } n = \frac{c}{v_1}, \text{ otrzymujemy więc } n = \frac{f_o\lambda_o}{f_1\lambda_1}. \text{ Spróbujmy dalej uprościć}$$

ten wzór. Udowodniliśmy wcześniej, że częstotliwość fali nie ulega zmianie przy zmianie ośrodków, tak więc możemy oznaczyć  $f_1 = f_o$  co pozwala na usunięcie tego parametru z równania i otrzymujemy:

$$n = \frac{\lambda_o}{\lambda_1} \quad (4)$$

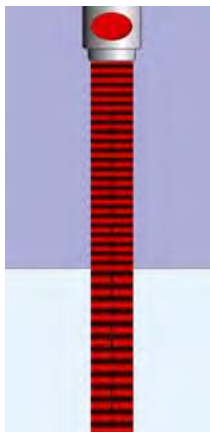
Równanie (4) pozwala na policzenie długości światła w jakimkolwiek ośrodku, jeśli znana jest jego długość w próżni i znany jest tego ośrodka współczynnik załamania.

Jesteś teraz gotowy by rozwiązać typowe zadania, które wykorzystują poznaną w tych eksperymentach wiedzę i matematyczne zależności.

### Zadania sprawdzające

Do wykonania obliczeń skorzystaj z współczynników załamania podanych w symulacji albo znajdź je w podręczniku do fizyki.

1. Policz długość czerwonej wiązki fali w: (a) wodzie, (b) szkle.
2. Wiązka światła przechodzi z próżni do szkła i później dalej przemieszcza się w wodzie. Policz:
  - a) Prędkość światła w szkle.
  - b) Częstotliwość światła w wodzie.
  - c) Długość fali w szkle.



Ryc. 2 Zmiana długości fali.  
Źródło <https://phet.colorado.edu>

3. Rycina poniższa przedstawia przejście światła przez dwa różne ośrodki. Oznaczmy górny przez współczynnik załamania  $n_G$  i dolny przez  $n_D$ .
  - a) W którym ośrodku światło:
    - Posiada większą prędkość?
    - Posiada mniejszy współczynnik załamania?
    - Szybciej przebiegnie dystans 1 m?
  - b) Załóżmy, że współczynnik załamania w górnym ośrodku jest 1.6 a częstotliwość wiązki czerwonej jest  $10^{15}$  Hz. Policz:
    - Prędkość światła w górnym ośrodku.
    - Długość światła w górnym ośrodku.
  - c) Załóżmy, że prędkość tej wiązki w dolnym ośrodku jest  $2,5 \cdot 10^8$  m/s. Policz:

- Współczynnik załamania dla dolnego ośrodka.
- Długość fali w tym ośrodku.

- d) Porównaj długości tej fali w górnym i dolnym ośrodku. Czy ich relacja pokrywa się z relacją przedstawioną na rysunku?

### Podsumowanie

Podczas wykorzystania tych doświadczeń, ważne jest by nauczyciel uważnie skorelował przerabiany materiał tak by uczeń był zapoznany z wykorzystanymi w tych eksperymentach pojęciami. Jeśli lekcja ta jest przewidziana jako samodzielna praca ucznia, sugerowane jest by nauczyciel zweryfikował wnioski uczniów po zakończeniu części eksperymentalnej, tak by mogli oni poprawnie stosować wzory (1), (2) i (3) podczas samodzielnej pracy. Jest również sugerowane, by z uczniami omówić te wzory z punktu widzenia ich matematycznych związków i ich fizycznej interpretacji.

Dr. Andrzej Sokolowski  
Lone Star College, Houston, TX

### LITERATURA

- [1] Physics Simulations [https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light\\_pl.html](https://phet.colorado.edu/sims/html/bending-light/latest/bending-light_pl.html). Plik pobrany 15 kwietnia, 2022.
- [2] Angell, at all C., Kind, P. M., Henriksen, E. K., & Guttersrud, Ø. (2008). An empirical-mathematical modeling approach to upper secondary physics. *Physics Education*, 43(3), 256.
- [3] Sokolowski A. (2021) Understanding Physics Using Mathematical Reasoning. Springer, New York.

## Co w fizyce piszczy

### Elektrony mogą płynąć jak woda

Od dawna przewidywano, ale nigdy nie zaobserwowano płynnego zachowania elektronów, które może zostać wykorzystane w elektronice nowej generacji o niskim poborze mocy.

Cząsteczki wody przepływają zbiorowo jako ciecz, wytwarzając strumienie, fale, wiry i inne klasyczne zjawiska płynów. Ale tak nie jest z elektrycznością. Prąd elektryczny jest również konstrukcją odrębnych cząstek – w tym przypadku elektronów – ale cząstki są tak małe, że wszelkie zbiorowe zachowanie między nimi jest zagłuszone przez większe wpływy, gdy elektrony przechodzą przez zwykłe metale. Jednak w niektórych materiałach i w określonych warunkach takie efekty zanikają, a elektrony mogą bezpośrednio na siebie wpływać. W takich przypadkach elektrony mogą płynąć zbiorowo jak płyn.

Kiedy prąd przepływa przez większość zwykłych metali i półprzewodników, pędy i trajektorie elektronów w prądzie są uzależnione od zanieczyszczeń w materiale

i wibracji pomiędzy atomami materiału. Procesy te dominują w zachowaniu elektronów w zwykłych materiałach.

Ale teoretycy przewidzieli, że przy braku takich zwykłych, klasycznych procesów, efekty kwantowe powinny przejąć kontrolę. Mianowicie, elektrony powinny wychwytywać nawzajem swoje delikatne zachowania kwantowe i poruszać się jako lepki, podobny do miodu płyn elektronowy. Takie zachowanie przypominające ciecz powinno pojawić się w ultraczystych materiałach i w temperaturach bliskich zeru.

Zaobserwowali to po raz pierwszy fizycy z MIT i Instytutu Nauki Weizmanna a wyniki opublikowali w czasopiśmie Nature.

Co w praktyce to oznacza? Kiedy elektrony przechodzą w stan płynny, rozpraszanie energii spada i jest to interesujące przy próbie zaprojektowania elektroniki o małej mocy – podkreślają autorzy artykułu.

# Wahadło nie takie proste

Foto - Dreamsstime

Jan Kurzyk

Wykonując z uczniami lub studentami ćwiczenie, którego celem jest wyznaczenie wartości przyspieszenia ziemskiego za pomocą wahadła korzystamy zwykle ze wzoru na okres drgań harmonicznego wahadła prostego zwanego też wahadłem matematycznym. Tym samym godzimy się na to, że popełniamy szereg błędów systematycznych będących konsekwencją zastosowanych przybliżeń.

Jednocześnie milcząco zakładamy, że wpływ tych błędów na wynik naszego pomiaru jest znacznie mniejszy od wpływu błędów pomiarowych związanych z pomiarem długości wahadła i okresu jego drgań. Jednak dobrze jest przeprowadzić ilościową analizę wszystkich pomijanych aspektów naszego eksperymentu, aby sprawdzić do jakiego stopnia nasze założenie jest poprawne.

Warto zrobić to z jeszcze jednego powodu. Dzięki takiej analizie możemy zweryfikować nasze intuicyjne wyobrażenia na temat tego, które z pomijanych czynników są istotniejsze, a które mniej ważne. Jestem przekonany, że dla czytelników, którzy nie przeprowadzali nigdy takiej analizy niektóre ze spostrzeżeń, jakie przedstawię w tym artykule będą bardzo zaskakujące.

## Przyspieszenie ziemskie

Zanim przejdę do analizy, o której wspomniałem powyżej, zatrzymajmy się chwilę nad wielkością fizyczną, którą chcemy zmierzyć w eksperymencie z wahadłem. Przyspieszeniem ziemskim nazywamy przyspieszenie, z jakim poruszają się w pobliżu powierzchni Ziemi obiekty wykonujące ruch swobodny, czyli ruch odbywający się wyłącznie pod wpływem siły grawitacji. Mamy tu na

myśli zwykle grawitację, której źródłem jest Ziemia, ale w rzeczywistości powinniśmy myśleć o wypadkowej sile grawitacyjnej pochodzącej od wszystkich obiektów kosmicznych, gdyż w żadnym eksperymencie nie jesteśmy w stanie wyeliminować tych innych sił.

Aktualnie potrafimy ultraczułymi grawimetrami zmierzyć wartość przyspieszenia ziemskiego z niepewnością względną rzędu  $10^{-9}$ , co sprawia, że wynik pomiaru zależy od aktualnego położenia Słońca i Księżyca, a nawet aktualnego poziomu wód gruntowych w miejscu pomiaru. Tak duża dokładność wartości przyspieszenia ziemskiego jest wymagana np. podczas pomiarów masy lub stałej Plancka wagą Kibble'a [1][2][3].

Decydujący wpływ na wartość przyspieszenia ziemskiego ma oczywiście grawitacja Ziemi, gdyż wiemy, że siła grawitacyjna maleje z kwadratem odległości między ciałami przez co siły, których źródłem są inne ciała niebieskie dają bardzo małe przyczynki do przyspieszenia z jakim w pobliżu Ziemi spadają swobodnie ciała. Przyczynek pochodzący od grawitacji Słońca wynosi  $6 \cdot 10^{-4} g$  (mała litera  $g$  jest tradycyjnym oznaczeniem wartości przyspieszenia ziemskiego). Księżyc jest około 400 razy bliżej od Ziemi niż Słońce ( $400^2 = 160$  tys.), ale za to jego masa jest 27 milionów razy mniejsza od masy Słońca dlatego przyczynek do przyspieszenia ziemskiego pochodzący od grawitacji Księżyca jest o dwa rzędy wielkości mniejszy od słonecznego i wynosi  $3 \cdot 10^{-6} g$ .

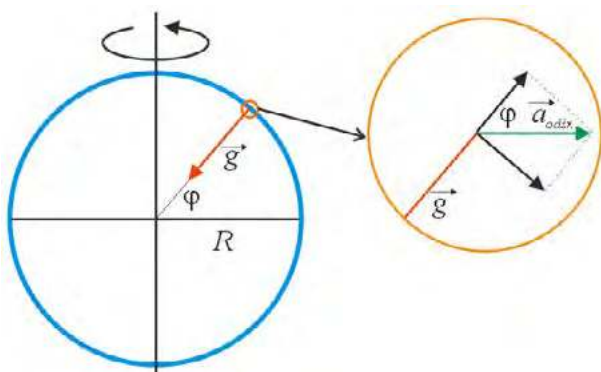
Musimy również pamiętać o tym, że układ odniesienia sztywno związany z Ziemią jest układem nieinercyjnym co w ujęciu einsteinowskim wiąże się zakrzywieniem czasoprzestrzeni odczuwanym jako grawitacja. Najważniejszym czynnikiem, którego konsekwencją jest nieinercjalność tego układu jest ruch obrotowy Ziemi wokół własnej

osi. W ujęciu newtonowskim wiążemy z tym ruchem siłę odśrodkową prowadzącą do efektów nazywanych czasem „sztuczną grawitacją” [4][5]. Ten efekt jest najsilniejszy na równiku. Tam siła odśrodkowa działa w tym samym kierunku co siła grawitacji lecz ma przeciwny do niej zwrot. Prowadzi to do zmniejszenia wartości przyspieszenia ziemskiego o  $\omega^2 R$ , gdzie  $\omega$  jest wartością prędkości kątowej Ziemi, a  $R$  promieniem Ziemi na równiku. Pochodzący stąd przyczynek do wartości przyspieszenia ziemskiego wynosi około  $0,034 \text{ m/s}^2$  ( $0,0034 \text{ g}$ ).

Siła odśrodkowa maleje wraz z szerokością geograficzną i znika na biegunach. Dodatkowo na szerokościach geograficznych większych od  $0^\circ$  kierunek siły odśrodkowej nie przechodzi przez środek masy Ziemi, gdyż siła odśrodkowa skierowana jest w kierunku prostopadłym do osi obrotu Ziemi. Tym samym siła odśrodkowa zmienia nieznacznie kierunek wypadkowego przyspieszenia ziemskiego. Mimo tego kierunek wypadkowej siły – grawitacyjnej i odśrodkowej – wyznacza lokalny pion, gdyż jest prostopadły do powierzchni geoidy. Do takiej sytuacji doprowadził udział obu sił (grawitacyjnej i odśrodkowej) w procesie kształtowania się Ziemi przez miliardy lat jej istnienia.

Ciekawe jest również inne związane z kształtem Ziemi zjawisko. Otóż punkty znajdujące się na różnych szerokościach geograficznych mają inne prędkości liniowe i dlatego na każdej szerokości geograficznej występuje inna wartość dylatacji czasu opisana przez szczególną teorię względności. Z kolei z ogólnej teorii względności wiemy, że czas biegnie szybciej w punktach o wyższym potencjale grawitacyjnym. Mamy zatem dwa konkurencyjne efekty. W miarę zbliżania się do równika rośnie prędkość liniowa, więc rośnie spowolnienie czasu, a z drugiej strony rośnie potencjał grawitacyjny (zwiększa się odległość od środka Ziemi) co powoduje wzrost przyspieszenia czasu. Okazuje się jednak, że kształt Ziemi jest taki, że oba efekty wzajemnie się kompensują, więc czas na całej powierzchni Ziemi biegnie mniej więcej tak samo. Opisywałem to już w artykule [6].

Na szerokości geograficznej  $\varphi$  odległość od osi obrotu Ziemi wynosi  $R \cos(\varphi)$ . Dodatkowo rzut przyspieszenia odśrodkowego na kierunek przyspieszenia pochodzącego tylko od „naturalnej” grawitacji wynosi  $a_{odśr.} \cos(\varphi)$  (patrz rysunek 1). Ostatecznie wartość przyspieszenia ziem-



Rysunek 1. Kierunek siły odśrodkowej na szerokości geograficznej  $\varphi$  i jej składowe.

skiego maleje mniej więcej o  $\omega^2 R \cos^2(\varphi)$ . Na szerokości geograficznej Krakowa ( $\varphi \approx 50^\circ$ ) wartość przyspieszenia ziemskiego maleje wskutek występowania siły odśrodkowej mniej więcej o  $0,0139 \text{ m/s}^2$  ( $0,0014 \text{ g}$ ), czyli ponad 2 razy mniej niż na równiku.

Jak widzimy z powyższej analizy źródłem przyspieszenia ziemskiego z dobrym przybliżeniem jest grawitacja Ziemi. Pozostałe czynniki są co najmniej o 2 rzędy wielkości mniejsze.

Przejdźmy teraz do analizy błędów systematycznych wynikających z przybliżeń, o których pisałem we wstępie.

## Ruch wahadła nie jest ruchem harmonicznym

Równanie ruchu wahadła fizycznego o masie  $m$ , momencie bezwładności względem osi wahań  $I$  i długości wahadła  $l$  rozumianej jako odległość między środkiem masy a osią wahań ma postać

$$I \frac{d^2 \theta}{dt^2} = -mgl \sin \theta,$$

gdzie  $\theta$  jest kątem wychylenia wahadła od pionu. Wyraz po prawej stronie równania opisuje moment siły ciężkości względem punktu zawieszenia wahadła odpowiedzialny za jego ruch. Jest on proporcjonalny do sinusa kąta wychylenia. Gdyby wyraz po prawej stronie równania był proporcjonalny do kąta  $\theta$  zamiast do jego sinusa mielibyśmy do czynienia z jednorodnym, liniowym równaniem różniczkowym drugiego stopnia, którego rozwiązaniem byłaby funkcja sinusoidalna

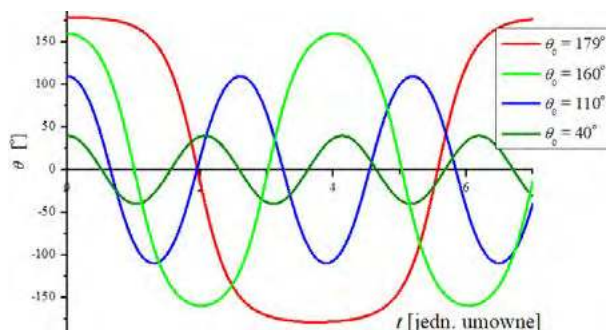
$$\theta(t) = \theta_0 \sin\left(\frac{2\pi}{T_0} t + \varphi\right).$$

Funkcja ta opisuje ruch okresowy nazywany ruchem harmonicznym. Amplituda  $\theta_0$  tego ruchu oraz przesunięcie fazowe  $\varphi$  zależą od warunków początkowych, zaś okres  $T_0$  tych drgań wynosi

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{I}{mgl}}.$$

Jak widzimy okres drgań harmonicznymi nie zależy od amplitudy drgań. Tę wyjątkową cechę ruchu harmonicznego nazywamy izochronizmem.

Obecność sinusa kąta  $\theta$  w naszym równaniu ruchu komplikuje sytuację. Rozwiązanie równania nie jest pro-



Rysunek 2. Wychylenie wahadła w funkcji czasu dla wybranych amplitud.

stą funkcją sinus, co widać wyraźnie w przypadku ruchu o dużych amplitudach bliskich  $180^\circ$  (patrz rysunek 2). Ale w miarę jak zmniejszamy amplitudę kształt funkcji coraz bardziej przypomina funkcję sinusoidalną.

Rzeczywisty ruch wahadła nie jest ruchem izochronicznym, co również widzimy na rysunku 2. Okres wahań zależy od amplitudy i wyraża się wzorem [7]

$$T = T_0 \left( 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \right)^2 \sin^{2n} \left( \frac{\theta_0}{2} \right) \right).$$

Jeżeli wypiszemy dwa pierwsze wyrazy szeregu występującego w powyższym wyrażeniu, to otrzymamy

$$T \approx T_0 \left( 1 + \frac{1}{4} \sin^2 \left( \frac{\theta_0}{2} \right) + \frac{9}{64} \sin^4 \left( \frac{\theta_0}{2} \right) \right)$$

lub (po rozwinięciu w szereg Maclaurina do wyrazów rzędu  $\theta_0^4$ )

$$T \approx T_0 \left( 1 + \frac{1}{16} \theta_0^2 + \frac{11}{3072} \theta_0^4 \right).$$

Na rysunku 3 pokazano jak zmienia się okres drgań wahadła w funkcji amplitudy.

Oba przedstawione rysunki sugerują, że dla tzw. małych drgań ruch wahadła będzie zbliżony do ruchu harmonicznego. Faktycznie, dla odpowiednio małych wychyleń sinus kąta wychylenia występujący w równaniu ruchu będzie można z dobrą dokładnością zastąpić samym kątem (patrz rysunek 4). Wówczas równanie ruchu przyjmie postać charakterystyczną dla ruchu harmonicznego. Okres drgań będzie miał wartość  $T_0$ , zgodną z podanym wyżej wzorem, niezależną od amplitudy.

Przybliżenie będzie tym lepsze im mniejsza będzie amplituda, ale zawsze będzie to tylko przybliżenie. Niektóre źródła podają wartości kątów poniżej których „możemy stosować” to przybliżenie (zwykle podaje się kąt  $5^\circ$ ), ale oczywistym jest, że nie ma żadnego „magicznego” kąta. To, jaką amplitudę możemy uważać za wystarczająco małą zależy tylko i wyłącznie od wartości błędu, który jesteśmy w stanie zaakceptować.

Wyliczając wartość przyspieszenia ziemskiego ze wzoru na okres wahań uwzględniającego anharmoniczność ruchu dostajemy

$$g = 4\pi^2 \frac{l}{mT^2} \left( 1 + \sum_{n=0}^{\infty} \left( \frac{(2n-1)!!}{(2n)!!} \right)^2 \sin^{2n} \left( \frac{\theta_0}{2} \right) \right)^2$$

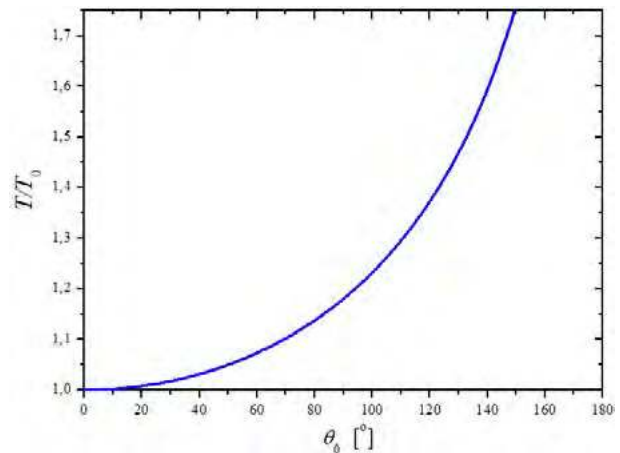
lub w przybliżeniu (dla odpowiednio małej amplitudy)

$$g \approx g_0 \left( 1 + \frac{1}{8} \theta_0^2 + \frac{17}{1536} \theta_0^4 \right),$$

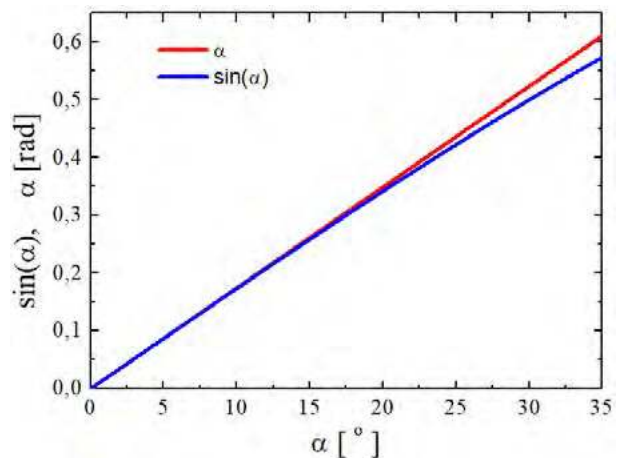
gdzie  $g_0$  jest wartością przyspieszenia ziemskiego wyliczonego ze wzoru nieuwzględniającego anharmoniczności, czyli

$$g_0 \equiv 4\pi^2 \frac{l}{mT^2}.$$

A zatem bezwzględny błąd systematyczny jaki popełniamy godząc się na użycie przybliżonego wzoru wynosi



Rysunek 3. Zależność okresu drgań wahadła od amplitudy. Gdy amplituda dąży do  $180^\circ$ , to okres dąży do nieskończoności. W przypadku amplitud większych od  $90^\circ$  wahadło musi być obiektem sztywnym.



Rysunek 4. Porównanie wykresów funkcji liniowej i sinusoidalnej w zakresie kątów od  $0^\circ$  do  $35^\circ$ .

$$\Delta g \equiv g_0 - g \approx g_0 \left( \frac{1}{8} \theta_0^2 + \frac{17}{1536} \theta_0^4 \right).$$

Dla amplitudy  $\theta_0 = 5^\circ$  błąd bezwzględny wynosi około  $-0,0093 \text{ m/s}^2$ . Daje to błąd względny równy  $0,10\%$ . Może dlatego w wielu źródłach kąt  $5^\circ$  jest podawany jako kąt „magiczny”. Błędy względne i bezwzględne dla kilku amplitud zebrano w tabeli 1.

Tabela 1.

$\theta_0 [^\circ]$	$\Delta g/g [\%]$	$\Delta g [\text{m/s}^2]$
2,5	-0,02%	$-2,3 \cdot 10^{-3}$
5,0	-0,10%	$-9,4 \cdot 10^{-3}$
7,5	-0,21%	$-2,1 \cdot 10^{-2}$
10,0	-0,38%	$-3,8 \cdot 10^{-2}$

### Błędy zaniedbania fizyczności wahadła

Wahadłem w naszym ćwiczeniu jest stalowa kulka zawieszona na wytrzymałej nici, jednak do wyliczenia wartości przyspieszenia ziemskiego korzystamy z wzoru na

okres małych drgań wahadła prostego. Małe drgania, czyli drgania o małej amplitudzie pozwalają nam traktować wahania jak drgania harmoniczne. Ten aspekt i związany z nim błąd systematyczny opisałem w poprzednim punkcie. Teraz zajmijmy się błędami wynikającymi z traktowania wahadła jak wahadła prostego.

Wahadło proste, zwane też wahadłem matematycznym, jest pojęciem abstrakcyjnym. Definiujemy je jako punkt materialny zawieszony na nieważkiej i nierozciągliwej nici, której drugi koniec jest unieruchomiony i stanowi punkt zawieszenia wahadła. W przypadku wahań o amplitudzie większej niż  $90^\circ$  zamiast o nieważkiej i nierozciągliwej nici należy mówić o nieważkim, nierozciągliwym i nieściśliwym pręcie, gdyż powyżej kąta  $90^\circ$  ten element wahadła jest ściskany, co nie jest możliwe w przypadku nici [8]. Przeanalizujemy kolejne cechy fizyczności naszego wahadła różniące je od wahadła matematycznego i oszacujemy związane z tymi przybliżeniami błędy w wyznaczaniu wartości przyspieszenia ziemskiego.

### Kulka nie jest punktem materialnym

W przypadku wahadła matematycznego cała jego masa skupiona jest w punkcie materialnym przyczepionym do końca nieważkiej nici. Moment bezwładności  $I$  takiego obiektu, liczony względem osi przechodzącej przez punkt zawieszenia wahadła wynosi  $I = ml^2$ , gdzie  $m$  jest masą punktu materialnego, a  $l$  długością nici będącej jednocześnie długością wahadła. W takim przypadku dostajemy następujący wzór na okres małych drgań wahadła (po zaniechaniu anharmoniczności)

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}}$$

Jeśli uwzględnimy fakt, że mamy do czynienia z kulką o masie  $m_k$  i promieniu  $R$ , a nie z punktem materialnym, a masę nici nadal będziemy pomijać, to zgodnie z twierdzeniem Steinera, moment bezwładności wahadła liczony względem osi oddalonej od środka kulki o  $l$  wynosi

$$I = \frac{2}{5} m_k R^2 + m_k l^2.$$

W powyższym wzorze zaniechałem fakt, że mamy do czynienia z niepełną kulką. Aby kulkę można było zaczepić na nici przewierca się ją wzdłuż osi. Ale otwór ma średnicę, dużo mniejszą od średnicy kulki, więc obecność tego otworu w niewielkim stopniu zmienia moment bezwładności kulki.

Przyjmując taki moment bezwładności wahadła okres jego drgań będzie się wyrażać następującym wzorem

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\frac{2}{5} m_k R^2 + m_k l^2}{m_k l^2}}$$

lub

$$T = T_0 \sqrt{1 + \frac{1}{10} \left(\frac{d}{l}\right)^2},$$

gdzie  $d$  jest średnicą kulki.

Stąd dostajemy wzór, z którego wyznaczamy wartość przyspieszenia ziemskiego

$$g = g_0 \left(1 + \frac{1}{10} \left(\frac{d}{l}\right)^2\right),$$

gdzie

$$g_0 = 4\pi^2 \frac{l}{T^2}.$$

Ostatecznie błąd bezwzględny jaki popełniamy zaniedbując rozmiary kulki wynosi

$$\Delta g = -\frac{1}{10} g_0 \left(\frac{d}{l}\right)^2.$$

W przypadku wahadła o długości 1 m z kulką o średnicy 2 cm błąd ma wartość około  $-0,00039 \text{ m/s}^2$ . Wartość tego błędu jest 24 razy mniejsza od błędu zaniechania anharmoniczności przy amplitudzie  $5^\circ$ . Aby zrównać się z tym samym błędem wahadło o metrowej długości musiałoby być zakończone kulką o średnicy 9,76 cm! Jak widzimy traktowanie w tym eksperymencie kulki jak punktu materialny jest bardzo dobrym przybliżeniem.

### Niść nie jest nieważka

Jeśli zaniedbujemy masę nici środek ciężkości wahadła znajduje się w środku kulki. Pomińmy problem otworu wykonanego w kulce. Będziemy zakładać, że mamy pełną kulkę o średnicy  $d$ , a nić o długości  $h$  jest punktowo przytworzona do kulki. Wówczas długość wahadła wynosi

$$l = h + \frac{1}{2} d.$$

Aby uwzględnić fakt, że nić ma niezerową masę równą  $m_n$  musimy zmodyfikować wzór na moment bezwładności wahadła, a także wzór na długość wahadła, gdyż środek masy układu nieco się przesunie. Na razie pomińmy ten drugi problem. Uwzględnijmy jedynie niezerowy moment bezwładności nici względem osi obrotu wahadła. Będzie on wynosił

$$I_n = \frac{1}{3} m_n h^2$$

lub (gdy długość wahadła liczymy od środka kulki, a nie od faktycznego środka masy)

$$I_n = \frac{1}{3} m_n \left(l - \frac{d}{2}\right)^2$$

Aby oszacować błąd pochodzący jedynie od zaniechania momentu bezwładności nici potraktujmy kulkę na powrót jak punkt materialny. Moment bezwładności wahadła będzie wówczas równy

$$I = m_k l^2 + \frac{1}{3} m_n \left(l - \frac{d}{2}\right)^2$$

Wobec tego otrzymamy następujący wzór na okres drgań wahadła

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m_k l^2 + \frac{1}{3} m_n \left( l - \frac{d}{2} \right)^2}{(m_k + m_n) g l}}$$

Zaniedbując masę nici w mianowniku dostajemy

$$T = T_0 \sqrt{1 + \frac{1}{3} \frac{m_n}{m_k} \left( 1 - \frac{d}{2l} \right)^2}$$

Stąd wartość przyspieszenia ziemskiego wynosi

$$g = g_0 \left( 1 + \frac{1}{3} \frac{m_n}{m_k} \left( 1 - \frac{d}{2l} \right)^2 \right)$$

A zatem błąd, którego źródłem jest zaniedbanie momentu bezwładności nici będzie równy

$$\Delta g = -g_0 \frac{1}{3} \frac{m_n}{m_k} \left( 1 - \frac{d}{2l} \right)^2$$

Aby oszacować wartość tego błędu przyjmijmy, tak już zrobiliśmy to wcześniej, że długość wahadła jest równa 1 m, średnica kulki 2 cm. Kulka wykonana jest ze stali o gęstości 7,8 g/cm<sup>3</sup>, a nicią jest kordonek o gęstości liniowej 0,10 g/m. Wówczas masa kulki wynosi  $m_k \approx 32,7$  g, a masa nici  $m_n \approx 0,10$  g. Po podstawieniu tych danych do powyższego wzoru wyliczymy, że błąd zaniedbania momentu bezwładności nici jest równy aż -0,0098 m/s<sup>2</sup>. Tak, to nie jest pomyłka. Błąd polegający na zaniedbaniu momentu bezwładności nici jest ponad 25 razy większy od błędu jaki popełniamy traktując kulkę jak punkt materialny! Proszę sprawdzić, że dla rozważanego tu wahadła moment bezwładności nici jest 25 razy większy od momentu bezwładności kulki względem osi przechodzącej przez jej środek!

Wróćmy teraz do problemu, który na razie pominęliśmy. Masa nici zmienia środek ciężkości układu, a tym samym długość wahadła. Dotąd długość wahadła liczyliśmy od środka kulki do punktu zawieszenia. Po uwzględnieniu masy nici środek masy układu przesunie się w kierunku nici. Długość wahadła będzie równa

$$l = \frac{m_k \left( h + \frac{d}{2} \right) + m_n \frac{h}{2}}{m_k + m_n} \approx l_0 \left( 1 - \frac{h+d}{2l_0} \frac{m_n}{m_k} \right),$$

gdzie  $l_0$  jest długością liczoną od środka kulki. Oznacza to, że długość wahadła nie będzie wynosiła 1 m lecz 0,9985 m czyli około 1,5 mm mniej. Dla uproszczenia przyjmijmy wartość momentu bezwładności wahadła wyliczony tak jak dla wahadła matematycznego. Wówczas okres drgań wahadła wyrazimy wzorem

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l_0^2}{g l}}$$

lub

$$T = \frac{T_0}{\sqrt{1 - \frac{h+d}{2l_0} \frac{m_n}{m_k}}}$$

Stąd wzór, z którego wyliczymy wartość przyspieszenia ziemskiego przyjmie postać (po rozwinięciu w szereg Maclaurina do wyrazów rzędu  $m_n/m_k$ )

$$g \approx g_0 \left( 1 + \frac{h+d}{2l_0} \frac{m_n}{m_k} \right)$$

Ostatecznie błąd jaki popełniamy umieszczając środek masy wahadła w środku kulki możemy wyrazić wzorem

$$\Delta g \approx -g_0 \frac{h+d}{2l_0} \frac{m_n}{m_k}$$

Wyliczając wartość tego błędu dla wahadła o przyjętych wyżej parametrach spotka nas kolejne zaskoczenie. Wartość tego błędu wynosi aż -0,015 m/s<sup>2</sup>. Jest to największy z wyliczonych błędów, większy 1,5 raza od błędu nieuwzględnienia anharmoniczności drgań przy amplitudzie 5° lub błędu związanego z zaniedbaniem momentu bezwładności nici i blisko 40 razy większy od błędu zaniedbania rozmiarów kulki.

### Nić nie jest nierozciągliwa

W definicji wahadła matematycznego jest mowa o nierozciągliwości nici. Żadna nić nie spełnia tego kryterium. Ważne tu jest aby długość wahadła podczas jego ruchu zmieniała się jak najmniej w stosunku do długości w momencie pomiaru tej długości. Gdy dokonujemy pomiaru długości nici wahadło zwisa pionowo i nie porusza się. Pomiar przeprowadzamy tak, aby nie dotykać kulki i tym samym nie zmieniać siły naciągu nici. W tej sytuacji siła naciągu jest równa ciężarowi kulki. Podczas ruchu wahadła siła naciągu zmienia się. Zależy ona od kąta wychylenia oraz amplitudy wahań i wynosi [8]

$$N = m_k g (3 \cos \theta - 2 \cos \theta_0).$$

Najmniejsza wartość naprężenia ma miejsce w skrajnych położeniach i jest równa

$$N = m_k g \cos \theta_0.$$

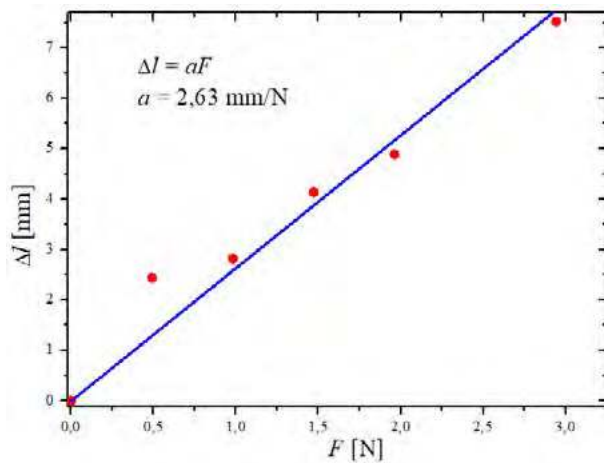
Wartość ta jest mniejsza od naprężenia podczas pomiaru, czyli w skrajnych położeniach wahadło jest nieco krótsze niż podczas pomiaru.

Największa wartość naprężenia występuje podczas przechodzenia wahadła przez punkt równowagi (tam kulka ma największą prędkość) i wynosi

$$N = m_k g (3 - 2 \cos \theta_0).$$

Aby móc oszacować jak zmienia się długość wahadła podczas ruchu, wykonałem najpierw pomiary wydłużeń nici w funkcji siły rozciągającej i znalazłem współczynnik kierunkowy prostej dopasowanej do punktów pomiarowych (patrz rysunek 5). W tym celu wahadło obciążałem odważnikami podczepianymi pod kulką i katetometrem mierzyłem wydłużenia. Zakładam, że znalezione współczynniki będzie taki sam lub bardzo podobny dla naciągów mniejszych niż ciężar kulki (czyli w sytuacjach, gdy wychylenie wahadła zbliża się do maksymalnego).

Oszacowanie błędu popełnianego wskutek nieuwzględnienia rozciągliwości nici jest trudniejsze niż w poprzed-



Rysunek 5. Wydłużenia wahadła w funkcji siły rozciągającej.

nich przypadkach, gdyż nie mamy wzoru na okres drgań elastycznego wahadła zmieniającego swoją długość podczas ruchu. Zamiast tego oszacujemy błędy wyznaczenia wartości przyspieszenia ziemskiego w skrajnych przypadkach. Pierwszy z nich odpowiada najmniejszemu naciągowi i towarzyszącej mu najmniejszej długości nici, krótszej niż długość w momencie pomiaru. Drugi przypadek odpowiada największemu naciągowi jaki ma miejsce podczas przechodzenia przez punkt równowagi. Wówczas długość wahadła jest największa.

Przyrost długości w porównaniu z długością spoczynkową otrzymaną podczas pomiaru długości wyznaczmy z wzoru

$$\Delta l = a(N - m_k g),$$

gdzie  $a$  jest współczynnikiem kierunkowym prostej dopasowanej do punktów pomiarowych z rysunku 5. Dla tak wyliczonego przyrostu długości błąd pomiaru wartości przyspieszenia ziemskiego jaki popełniamy nie uwzględniając go (przy założeniu, że byłby on taki sam w każdym momencie ruchu) wynosi

$$\Delta g = g_0 \frac{\Delta l}{l}.$$

W tabeli 2 zebrano wyniki tej analizy dla kilku wybranych amplitud w przypadku gdyby długość wahadła w każdym

Tabela 2

$\theta_0$	$N_{\min}/(m_k g)$	$N_{\min} - m_k g$ [N]	$\Delta l$ [mm]	$\Delta g$ [ $m/s^2$ ]
2,5°	0,999	-0,00031	-0,00080	$-7,9 \cdot 10^{-6}$
5,0°	0,996	-0,00122	-0,00321	$-3,1 \cdot 10^{-5}$
7,5°	0,991	-0,00274	-0,00721	$-7,1 \cdot 10^{-5}$
10,0°	0,985	-0,00487	-0,01281	$-1,3 \cdot 10^{-4}$

Tabela 3

$\theta_0$	$N_{\min}/(m_k g)$	$N_{\min} - m_k g$ [N]	$\Delta l$ [mm]	$\Delta g$ [ $m/s^2$ ]
2,5°	1,002	0,00061	0,00160	$1,6 \cdot 10^{-5}$
5,0°	1,008	0,00244	0,00642	$6,3 \cdot 10^{-5}$
7,5°	1,017	0,00548	0,01442	$1,4 \cdot 10^{-4}$
10,0°	1,030	0,00974	0,02561	$2,5 \cdot 10^{-4}$

momencie ruchu miała długość taką, jaką ma w skrajnych położeniach.

W tabeli 3 zebrano wyniki tej analizy dla kilku wybranych amplitud w przypadku gdyby długość wahadła w każdym momencie ruchu miała długość taką, jaką ma podczas przechodzenia przez punkt równowagi.

Jak widzimy skrajne wartości błędów są bardzo małe, najmniejsze z przedstawionych dotąd. A rzeczywiste błędy związane z rozciągliwością nici są jeszcze mniejsze, gdyż wahadło podczas swojego ruchu przez pewien czas ma długość mniejszą od długości spoczynkowej (wtedy błąd jest ujemny), a przez resztę większą (wtedy błąd jest dodatni). A zatem oba błędy do pewnego stopnia kompensują się. Wartości skrajnych błędów pokazują, że traktowanie nici jak nierozciągliwej jest bardzo dobrym przybliżeniem, dużo lepszym niż inne omawiane wyżej przybliżenia.

### Opory ruchu

We wszystkich wcześniejszych analizach nie uwzględnialiśmy oporów ruchu wahadła, które również mają wpływ na wynik pomiaru. Zaczniemy od oporu jaki powietrze stawia poruszającej się kulce. W przypadku wahań o amplitudzie 5° wahadła o rozważanych tu parametrach, prędkość kulki w najniższym punkcie wynosi 0,27 m/s. W przypadku takiej prędkości w powietrzu dla analizowanej wcześniej kulki liczba Reynoldsa jest równa około 700. Nie możemy zatem stosować prawa Stokesa. Siłę oporu musimy w tym przypadku liczyć ze wzoru [9]

$$F_{op} = C_D \frac{\rho v^2}{2} S_D,$$

gdzie  $C_D$  jest współczynnikiem oporu hydrodynamicznego [10], który dla kuli przyjmuje wartość 0,47,  $\rho$  jest gęstością powietrza,  $v$  jest szybkością kulki, a  $S_D$  polem powierzchni rzutu kuli na kierunek prostopadły do prędkości kulki. Wartość tej siły w przypadku kulki o średnicy 2 cm poruszającej się w powietrzu z prędkością 0,27 m/s jest równa  $6,6 \cdot 10^{-6}$  N (siła wyliczona z prawa Stokesa byłaby o rząd wielkości mniejsza –  $9,5 \cdot 10^{-7}$  N). Siła ta jest zdecydowanie za mała aby wyjaśnić faktyczną szybkość strat energii i towarzyszącej jej szybkości spadku amplitudy wahań w czasie.

Spróbujmy oszacować wartość średniej siły, która powodowałaby spadek energii zgodnej z rzeczywistym oporem jakiego doznaje wahadło. W tym celu wykonałem eksperyment, podczas którego badałem drgania wahadła za pomocą urządzenia opisanego w artykule [11]. Wykres na rysunku 6 pokazuje jak zmieniła się w czasie amplituda drgań. Wahadło miało długość 68,4 cm i w czasie około 683 s wykonało 411 wahań. Amplituda wahań z początkowej wynoszącej 0,14 rad (7,7°) spadła do 0,025 rad (1,4°). Energia kulki o masie 32,2 g zmalała w tym czasie o 0,0019 J. Podczas eksperymentu kulka pokonała drogę o długości ponad 53 m. Średnia wartość siły oporu, która spowodowałaby spadek energii o 0,0019 J na tej drodze musiałaby wynosić  $3,6 \cdot 10^{-5}$  N (w przypadku metrowego wahadła byłoby to  $5,2 \cdot 10^{-5}$  N). Oszacowana wartość średniej siły jest ponad pięciokrotnie większa od maksymal-

nej siły oporu powietrza jakiego doznaje kulka podczas pierwszych przejść przez położenie równowagi.

Opór powietrza działa również na nitkę, na której zawieszona jest kulka. Gdyby każdy fragment nitki miał tę samą prędkość to siłę oporu można by policzyć z podobnego wzoru jak dla kulki lecz ze współczynnikiem  $C_D$  o wartości między 1 do 1,3 [10] (lub większym zważywszy na to, że powierzchnia nici nie jest gładka) i polem powierzchni  $S_D$  równym iloczynowi długości nici i jej średnicy. Jednak każdy fragment nici ma inną prędkość liniową. Możemy pokusić się o wyprowadzenie przybliżonego wzoru na siłę oporu przez scałkowanie siły działającej na nieskończenie krótki fragment nici. Ostatecznie dostajemy

$$\begin{aligned} F_{op.nici} &= \frac{1}{2} C_D \rho d_{nici} h \int_0^{l-d/2} \omega^2 x^2 dx \\ &= \frac{1}{6} \rho C_D d_{nici} h \omega^2 (l-d/2)^2. \end{aligned}$$

Największa wartość tej siły ma miejsce podczas przechodzenia wahadła przez punkt równowagi. Nić badanego wahadła była wykonana z kordonka o średnicy około 0,5 mm. W przypadku wahadła o długości 1 m i początkowej amplitudzie  $5^\circ$  podczas pierwszego przechodzenia przez punkt równowagi siła oporu powietrza stawianego nici ma wartość  $9,7 \cdot 10^{-6}$  N, czyli jest porównywalna, a nawet nieco większa od siły oporu stawianego kulce! To kolejny zaskakujący wynik. Sumując obie siły oporu dostajemy  $1,6 \cdot 10^{-5}$  N. Tym samym osiągamy rząd wielkości średniej siły oporu oszacowanej powyżej. Ale w dalszym ciągu wartość ta jest mniejsza od oczekiwanej. Inne mechanizmy dyssypacji energii są związane z tarcieniem wewnętrznym występującym w nici wskutek jej cyklicznego, choć jak pokazałem wcześniej bardzo małego, rozciągania i kurczenia, a także straty energii związane ze zjawiskami występującymi w pobliżu punktu zawieszenia towarzyszącymi zaginaniu nici.

Wróćmy teraz do naszego zasadniczego problemu, czyli próby oszacowaniu błędu pomiaru wartości przyspie-

żenia ziemskiego jaki popełniamy przez nieuwzględnienie wpływu oporów ruchu na okres drgań wahadła. Jak pokazałem problem oporu ruchu wahadła jest bardzo złożony. Wobec tego nie jesteśmy w stanie prosto oszacować tego błędu. Ale jak pokazuje rysunek 6(a) do przebiegu eksperymentalnego można z bardzo dobrym przybliżeniem dopasować funkcję wykładniczą taką, jaką znamy z teorii oscylatora harmonicznego z tarcieniem wiskotycznym, chociaż sam opór powietrza nie jest proporcjonalny do prędkości kulki.

Aby upewnić się, że ma to sens wykonałem dodatkowo symulację komputerową nieharmonicznego ruchu wahadła z tarcieniem wiskotycznym o wartości współczynnika oporu takim, jaki dostałem metodą najmniejszych kwadratów na rysunku 6 (a). Nałożenie krzywej otrzymanej na drodze symulacji komputerowej na eksperymentalnie zebrane punkty pomiarowe pokazuje rysunek 6 (b) i potwierdza, że przybliżenie przebiegu funkcją  $\theta_0(t) = \theta_0(0)e^{-\beta t}$  jest jakościowo bardzo dobre. Załóżmy zatem, że wzór na okres drgań wahadła będzie miał postać taką jak w przypadku oscylatora harmonicznego z tarcieniem wiskotycznym, ale ze współczynnikiem tarcia nie wynikającym z prawa Stokesa, lecz z efektywnym współczynnikiem tarcia wyznaczonym eksperymentalnie. Wzór ten przyjmuje postać

$$T = \frac{2\pi}{\sqrt{\left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 - \beta^2}} = \frac{2\pi}{\sqrt{\frac{g}{l} - \beta^2}}.$$

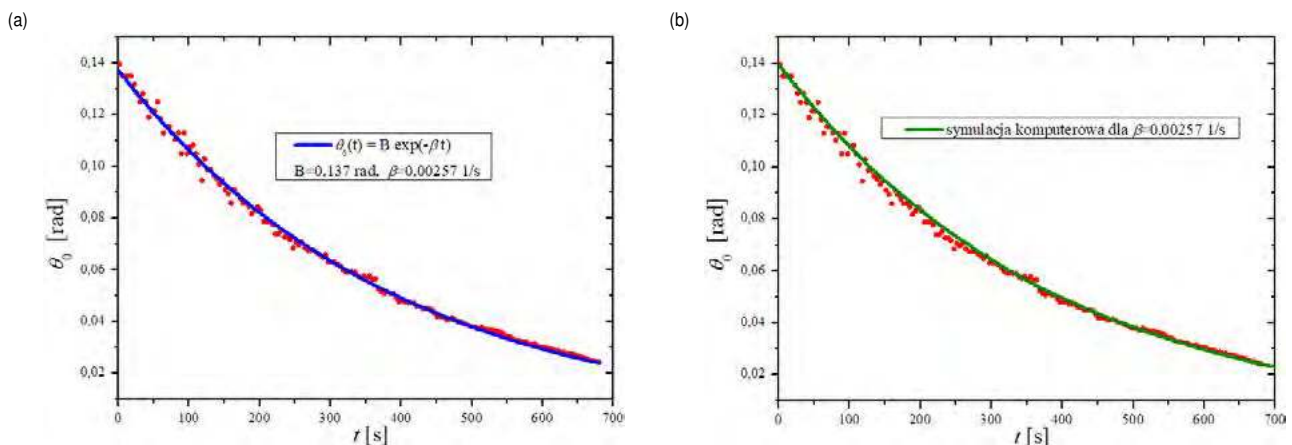
Stąd

$$g = g_0 + \beta^2 l.$$

A zatem błąd jaki popełniamy wynosi

$$\Delta g = -\beta^2 l.$$

W przypadku wahadła, dla którego przeprowadzałem eksperyment wartość tego błędu wynosi  $-4,5 \cdot 10^{-6}$  m/s<sup>2</sup>. Jest to najmniejszy z przedstawianych tu błędów.



Rysunek 6. Zależność maksymalnego wychylenia wahadła od czasu. Długość wahadła wynosiła 68,4 cm. (a) do punktów pomiarowych dopasowano funkcję wykładniczą. (b) na punkty pomiarowe nałożono krzywą otrzymaną przez symulację komputerową ruchu wahadła ze współczynnikiem tarcia wiskotycznego  $\beta=0,00257$  1/s.

## Porównanie błędów wynikających z zastosowanych przybliżeń z błędami pomiarowymi

Okres drgań wahadła mierzymy zwykle wykonując pomiary czasu trwania dziesięciu wahań. W przypadku starannych „ręcznych” pomiarów wykonywanych stoperem elektronicznym czas ten możemy zmierzyć z dokładnością do kilku setnych sekundy (choć studenci popełniają zwykle większe błędy). Prowadzi to do błędu wyznaczenia okresu wahadła rzędu kilku tysięcznych sekundy. Związany z tym błąd wyznaczenia wartości przyspieszenia ziemskiego możemy wyliczyć z wzoru

$$\Delta g = g \frac{2\Delta T}{T}$$

W przypadku wahadła o długości równej około 1 m i błędzie  $\Delta T$  rzędu kilku tysięcznych sekundy dostajemy błąd  $\Delta g$  rzędu kilku setnych  $m/s^2$ .

Staranny pomiar długości wahadła jesteśmy w stanie wykonać z dokładnością do dwóch, trzech milimetrów (choć w przypadku pomiarów wykonywanych przez studentów zdarzają się większe błędy). Błąd w pomiarze długości wahadła przekłada się na błąd wyznaczenia wartości  $g$  liczonego ze wzoru

$$\Delta g = g \frac{\Delta l}{l}$$

Błąd  $\Delta l$  rzędu milimetra w przypadku wahadła o długości równej około 1 m prowadzi do błędzie  $\Delta g$  rzędu 0,01  $m/s^2$ . Ostatecznie błąd wyznaczenia wartości przyspieszenia ziemskiego, którego źródłem są błędy pomiaru okresu i długości wahadła jest rzędu kilku setnych  $m/s^2$ . Pomiary wykonywane samodzielnie przez studentów obciążone są zwykle większymi błędami sięgającymi nawet dziesiątych części  $m/s^2$ .

Największe błędy systematyczne wynikające z zastosowanych przybliżeń to: zaskakująco duży błąd wynikający z zaniedbania masy nici oraz błąd zaniedbania anharmoniczności drgań. Pozostałe błędy są co najmniej o rząd wielkości mniejsze. Nie uwzględnienie masy nici powoduje zawyżenie długości wahadła co daje przyczynek

do błędzie  $\Delta g$  rzędu 0,015  $m/s^2$ , ale także zaniża moment bezwładności wahadła, co daje dodatkowy przyczynek do błędzie rzędu 0,0098  $m/s^2$ . Błąd nieuwzględnienia anharmoniczności ruchu wahadła w przypadku amplitudy  $5^\circ$  ma wartość około 0,0093  $m/s^2$ .

Jak widzimy sumaryczny błąd wynikający z zastosowanych przybliżeń nie jest wcale tak mały jak się powszechnie sądzi. W przypadku starannych pomiarów jest on zaledwie dwu-, trzykrotnie mniejszy od błędów pomiarowych. Znacznie łatwiej było uzasadnić zastosowane przybliżenia w czasach, gdy do pomiaru okresu drgań wahadła używano się stoperów mechanicznych o dokładności 0,1 s. Wówczas przewaga błędów związanych z błędami pomiarowymi była zdecydowanie większa od błędów wynikających z przybliżeń.

Zauważmy na koniec, że wszystkie błędy związane z opisanymi tu przybliżeniami (błąd nieuwzględniana rozciągłości nici zapewne również) mają wartości ujemne, co oznacza, że przybliżenia jakich dokonujemy zaniżają nieco wartość przyspieszenia ziemskiego. Warto również przyjrzeć się oszacowanym tu wartościom poszczególnych błędów i uporządkować je we właściwej kolejności, która wcale nie jest taka jaką podpowiada nam nasza intuicja.

dr Jan Kurzyk

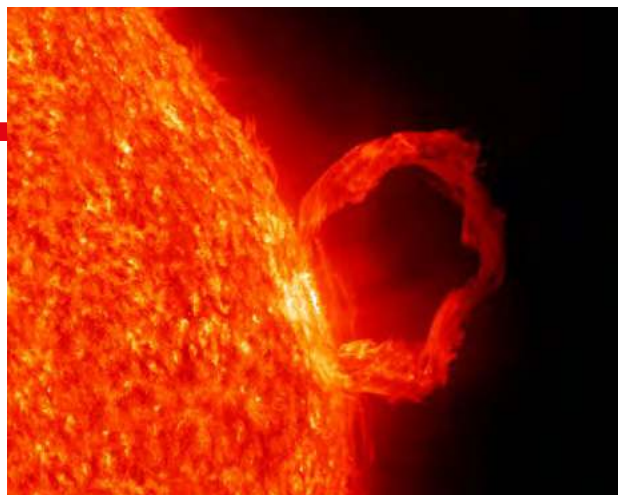
Katedra Fizyki Politechniki Krakowskiej

### LITERATURA

- [1] J. Gluza, A. Grzanka, A. Pleban, *Ku nowej definicji kilograma*. Postępy fizyki t. 58, z. 3, 2007. Wersja elektroniczna <http://uranos.cto.us.edu.pl/~gluza/kg.pdf> [Dostęp 17.02.2022].
- [2] <https://youtu.be/Oo0jm1PPRuo> [Dostęp 10.03.2022].
- [3] J. Kurzyk, *Redefinicja SI*, Fizyka w Szkole nr 5, 2019.
- [4] J. Kurzyk, *Sztuczna grawitacja w układzie obracającym się. Część I – spadek swobodny bez prędkości początkowej*, Fizyka w Szkole nr 3, 2020.
- [5] J. Kurzyk, *Sztuczna grawitacja w układzie obracającym się. Część II – rzut pionowy w górę i rzut ukośny*, Fizyka w Szkole nr 4, 2020.
- [6] J. Kurzyk, *Dlaczego działa GPS*, Fizyka w Szkole nr 2, 2017.
- [7] C. Kittel, W.D. Knight, M.A. Ruderman, *Mechanika*. PWN 1975.
- [8] J. Kurzyk, *Siły w wahadle prostym*, Fizyka w Szkole nr 1, 2018.
- [9] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Op%C3%aB3r\\_aero\(hydro\)dynamiczny](https://pl.wikipedia.org/wiki/Op%C3%aB3r_aero(hydro)dynamiczny) [Dostęp 21.02.2022].
- [10] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Wsp%C3%B3C5%82czynnik\\_oporu\\_aerodynamicznego](https://pl.wikipedia.org/wiki/Wsp%C3%B3C5%82czynnik_oporu_aerodynamicznego) [Dostęp 21.02.2022].
- [11] J. Kurzyk, *Wykorzystanie „fotodżojstika” do badania zjawisk okresowych*, Fizyka w Szkole nr 1, 2021.

### W następnym wydaniu polecamy m.in.

- Promieniowanie kosmiczne, czyli właściwie co?
- Technika Feynmana w edukacji fizycznej, czyli od wyjaśnienia do zrozumienia
- Żywoty fizyków – William Sturgeon (1783 – 1850)
- Przekaz medialny w nauczaniu i popularyzacji fizyki



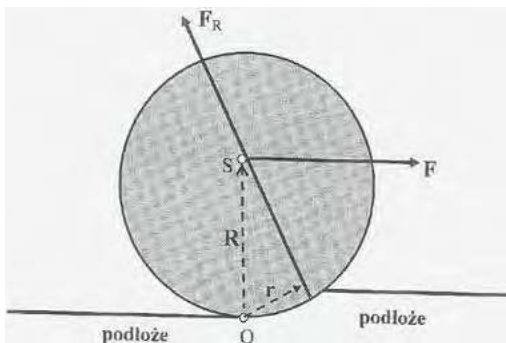
## Tarcie toczne czy raczej opór toczny? (Miniatura dydaktyczna)

Waldemar Reñda

Zadaniem dydaktyki powinno być między innymi porządkowanie i precyzyjne definiowanie pojęć fizycznych. Przyjrzyjmy się pojęciu tarcia.

Podręczniki wymieniają tu następujące jego rodzaje: tarcie ślizgowe statyczne i kinetyczne oraz tarcie toczne. Czy rzeczywiście to, co nazywamy tarciem tocznym, powinno tak się nazywać?

Poniższy rysunek przedstawia podstawowe siły, które działają na toczące się ciało po miękkim podłożu. (Na rysunku pominąłem siłę ciężkości jako oczywistą.) Podobnie jest w przypadku odkształcającego się koła – np. opony samochodu, ale wówczas nieco trudniej jest umiejscowić punkty przyłożenia sił oraz ustalić położenie chwilowej osi obrotu.



$F$  – siła wywołująca toczenie.

$F_R$  – wypadkowa siła reakcji podłoża w przybliżeniu równa co do wartości działającej na ciało sile ciężkości  $F_C$ .

$R$  – promień toczącego się ciała (ramię wektora siły  $F$  względem chwilowej osi obrotu).

$O$  – chwilowa oś obrotu ciała w czasie toczenia.

$r$  – ramię siły reakcji  $F_R$  względem chwilowej osi obrotu ciała.

$S$  – środek (oś) toczącego się ciała.

Warunkiem toczenia ciała ruchem jednostajnym jest równowaga sił momentów  $F$  i  $F_R$  względem chwilowej osi obrotu.

Zatem:  $\mathbf{R} \times \mathbf{F} = -\mathbf{r} \times \mathbf{F}_R$  (iloczyn wektorowy)

Stąd skalarnie:  $F = r(F_R/R) = r(F_C/R)$

Jak widać siła potrzebna do toczenia jest wprost proporcjonalna do siły ciężkości (ciężaru ciała), a odwrotnie do promienia toczącego się ciała. Siłę równą sile  $F$ , ale o przeciwnym zwrocie nazywamy **siłą oporu tocznego**  $F_{op}$ .

Zatem:  $F_{op} = -F$ , i jest ona równa składowej poziomej siły  $F_R$ .

Jeżeli wartość wektora  $\mathbf{r}$  potraktujemy jako współczynnik proporcjonalności, to ma on wymiar długości.<sup>1</sup> Jeżeli zaś owym współczynnikiem będzie stosunek:  $r/R$ , to otrzymamy wielkość bezwymiarową podobną do współczynnika występującego we wzorze na siłę oporu ślizgowego.

Niektóre podręczniki porównują wartości obu współczynników, a nawet podają konkretne wartości współczynnika oporu tocznego.<sup>2</sup> Czy jednak jest to słuszne, wszak ów współczynnik nie zależy jedynie od rodzaju oddziałujących powierzchni, ale także od promienia toczącego ciała, a nawet jego kształtu. Inne bowiem odkształcenie podłoża wystąpi, gdy toczyć się będzie np. kula, a inne, gdy obręcz.

A zatem ów współczynnik można określać wyłącznie dla konkretnych ciał, np. kół pociągu toczących się po stalowych szynach. Dla tego przypadku tablice matematyczno-fizyczne podają jego wartość zawierającą się w granicach od 0,005 do 0,009.<sup>3</sup> Natomiast wartość występującego tu współczynnika tarcia ślizgowego dla stali po stali jest równa 0,15. Nie można jednak tych współczynników porównywać, gdyż mają zupełnie inny sens fizyczny i dotyczą diametralnie różniących się zjawisk.<sup>4</sup>

Dodam, że tu też można mówić zarówno o oporze statycznym jak i kinetycznym, przy czym wartości obu oporów powinny być sobie równe. Jeżeli jednak obserwuje się potrzebę użycia większej siły w chwili ruszania, to dotyczy konieczności „pokonania” siły bezwładności ciała.

Czy w owym zjawisku występuje tarcie? Odpowiem: – nie, bo słowo **tarcie** w języku polskim ma ściśle określone znaczenie<sup>5</sup> i nie powinniśmy go używać do oporu tocznego.

Ktoś jednak może powiedzieć, że tarcie ślizgowe też jest oporem. To prawda, ale jest ono zupełnie innym zjawiskiem. Zauważmy bowiem, że w wyniku tarcia ślizgowego siła przesuująca ciało wykonuje pracę. Jeżeli przemieszczenie ciała jest poziome i odbywa się ze stałą wartością prędkości, to owa praca w całości zamienia się w taką formę energii wewnętrznej ciał, która ujawnia się wzrostem ich temperatury.

W przypadku toczenia, gdy odkształcenia ciał są idealnie sprężyste, to owa zamiana nie powinna zachodzić.<sup>6</sup> Natomiast, gdy przy toczeniu następuje **trwale** odkształcenie podłoża, to wykonana praca siły  $F$  zamienia się w wyżej

dokończenie na str. 45

<sup>1</sup> Musi być wyrażony w tych samych jednostkach co promień ciała toczącego się lub toczonego.

<sup>2</sup> Nazywają go współczynnikiem tarcia tocznego.

<sup>3</sup> Niestety, tablice nie informują, czy jest to wielkość mianowana związana z wartością owego wektora  $r$ , czy też niemianowana, będąca stosunkiem  $r/R$ . Prawdopodobnie dotyczy to współczynnika mianowanego. Dodam, że wartość obu współczynników wyznacza się wyłącznie doświadczalnie.

<sup>4</sup> Warto tu zauważyć, że lokomotywa wykorzystuje tarcie statyczne, by „pokonać” opór toczny swój i wagonów, dzięki czemu może ona wprawiać w ruch pociąg o znacznie większym ciężarze niż jej.

<sup>5</sup> Pokrewne słowa to: trzeć, pocierać, ścierać itp.

<sup>6</sup> Zauważmy, że wielokrotne ściskanie sprężyny nie powoduje wzrostu jej temperatury.

# Kilka uwag o nauczaniu fizyki w oparciu o raport Johna Hattiego

Kazimierz Mikulski

W 2008 r. John Hattie<sup>1</sup> opublikował wyniki badania dotyczącego skali wpływu rozmaitych praktyk nauczycielskich na osiągnięcia edukacyjne uczniów. W 2009 r. wydał książkę *Visible Learning*, zaś w 2012 r. kolejną – *Visible Learning for Teachers*. To pozycje zawierające propozycje rozwoju zawodowego dla nauczycieli zgodne z wynikami wcześniejszych badań<sup>2</sup>.

Badanie trwające 15 lat objęło 200 mln chłopców i dziewcząt oraz 6 mln nauczycieli z ponad 100 tys. szkół. W tym czasie przestudiował również ponad 50 tys. raportów z zakresu edukacji i syntetyzując ponad 800 metaanaliz<sup>3</sup> na temat czynników wpływających na osiągnięcia uczniów w wieku szkolnym. Dane pozwalają budować wiedzę o dzia-

łaniach nauczycieli, umożliwiają tworzenie opinii i budowanie modeli o uczeniu się. Obszary badań obejmowały zagadnienia wpływu na ucznia tego, co się dzieje w domu, w szkole, a także program nauczania, nauczycieli i nauczania.

Główną treścią opracowania jest to, że co jest najlepsze dla studentów jest bardzo podobne do tego, co jest najlepsze dla nauczycieli: „... *zwracanie uwagi na ustawienie ambitnych zamierzeń edukacyjnych, jest jasne, co oznacza sukces, a uwagę na strategię uczenia się do opracowania koncepcyjnego zrozumienie tego, co nauczyciele i uczniowie wiedzą i rozumieją*”<sup>4</sup>. Raport jest o użyciu testów jako dowodów do budowania i bronięcia modelu nauczania i uczenia się. Wkładem jest treść, jako fascynujący wzorzec do dalszych badań mających na celu porównywanie wielu innowacji w nauczaniu i szkoł<sup>5</sup>.

## Jakie czynniki wpływają na uczenie się uczniów i skąd to wiemy?

Jednym z wielu pytań dotyczy metod uczenia, tak by uczniowie przyswajali wiadomości i tworzyli wiedzę jak najefektywniej. To Hattie stwierdza, że najlepsze efekty w nauczaniu osiągniemy wtedy, gdy spojrzymy na uczenie się oczami uczniów<sup>6</sup>. Badał osiągnięcia w uczeniu poprzez porównanie wyników testów uczniów biorących udział w tzw. interwencji – strategii i działań podejmowanych w nauczaniu, z wynikami grup uczniów rozwiązujących te same testy, ale nie będących pod wpływem interwencji. **Rozmiarem efektu** nazwał stosunek wyników pierwszej z powyższych grupy do wyników uczniów należących do drugiej grupy. Wyniki ułożył na jednej skali i w ten sposób zbadał, co tak naprawdę ma wpływ na osiąg-

<sup>1</sup> John Hattie jest profesorem Edukacji i Dyrektorem Learning Labs Uniwersytet w Auckland, Nowa Zelandia.

<sup>2</sup> Lipiec M., Praktyka oparta na dowodach, <http://magdalipiec.pl/praktyka-oparta-na-dowodach-2/>

<sup>3</sup> Metaanaliza – pojęcie z zakresu analizy danych, określające wtórne odkrywanie wiedzy metodą uogólniania informacji zawartych w publikacjach czy źródłach pierwotnych. Uważa się, że metaanaliza jest samodzielnym i pełnoprawnym rodzajem badania naukowego <http://pl.wikipedia.org/wiki/Metaanaliza>

<sup>4</sup> Źródło: <http://www.amazon.com/Visible-Learning-Synthesis-Meta-Analyses-Achievement/dp/0415476186>

<sup>5</sup> <http://www.amazon.com/Visible-Learning-Synthesis-Meta-Analyses-Achievement/dp/0415476186>

<sup>6</sup> <http://www.ceo.org.pl/pl/ok/news/co-ma-najwiekszy-wplyw-na-osiagniecie-uczniow>

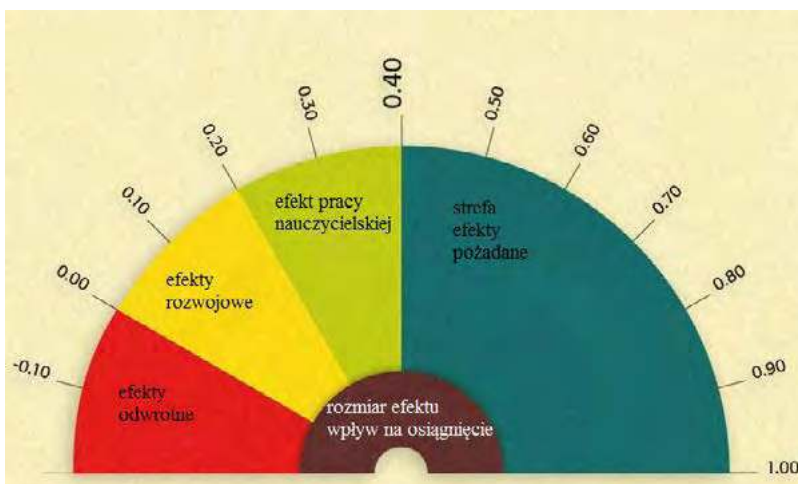


Fotografia 1. Profesor John Hattie

Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/John\\_Hattie](https://pl.wikipedia.org/wiki/John_Hattie)

Rysunek 1. Obszary efektów wszystkich badanych interwencji („barometr”)

Źródło: Opracowano na podstawie treści zawartych w informacji pod adresem internetowym <http://visible-learning.org/wp-content/uploads/2013/02/visible-learning-infographic.jpg>



nięcia edukacyjne. Umieszczony na skali wynik 0,4, to średni rozmiar efektu wszystkich badanych interwencji (działań i strategii – postępowania), a 1,0 bardzo duży wzrost. Skoro średni rozmiar efektu interwencji wynosi 0,4, to powinniśmy porównywać daną interwencję z pozostałymi, pamiętając by jej efekty odnieść właśnie do poziomu 0,4<sup>7</sup>. W literaturze „barometrem” nazwano graficzne zinterpretowanie wartości liczbowych powstałych na bazie otrzymanych z meta-meta-analiz dokonanych przez Hattiego.

Poszczególne obszary na rys. 1, pozwalają interpretować następujące efekty:

- **Efekty odwrotne**, to wpływ negatywny na osiągnięcia edukacyjne, a jest nim między innymi powtarzanie klasy, wakacje, mobilność uczniów (zmiana szkoły, zmiana klasy).
- **Efekty rozwojowe**, to stan, w którym uczeń osiągnąłby ten sam wynik bez udziału szkoły w jego rozwoju. Wśród tych czynników wymienia się: szkoły społeczne (na granicy – 0,2), dodatkowe programy nauczania, podział na grupy według zdolności, edukacja (szkolenie) nauczycieli, wiedza merytoryczna nauczycieli, uczenie się przy wykorzystaniu narzędzi on-line.
- **Efekty pracy nauczycieli**, to typowy wpływ nauczyciela, osiągniany w ciągu typowego roku szkolnego, czyli między innymi praca domowa, indywidualizacja nauczania, liczebność oddziału szkolnego, nauczanie wykorzystujące technologie komputerowe (0,37 – prawie na granicy przedziału)<sup>8</sup>.
- **Efekty (cała strefa) pożądane**. Poniżej, w tabeli 1 i tabeli 2, podano te o największym wskaźniku interwencji.

Zapisy zaprezentowanego rankingu pozwalają dostrzec samoocenę

uczniowską jako efekt o największym wpływie na proces osiągania najlepszych efektów kształcenia. Drugą pozycję zajmuje metoda nauczania oparta na teorii J. Piaget’a. Zdaniem Piageta rozwój opiera się na ciągłym tworzeniu nowych struktur poznawczych, które warunkują przystosowanie się do otoczenia. Piaget ujął je w okresy i stadia.<sup>9</sup>

Stosowane coraz częściej w polskiej szkole <ocenie kształtujące> ma bardzo wysoki wskaźnik, oczywiście uśrednionego efektu. Bardzo ważnym działaniem o wartości

wskaźnika 0.88 jest, nazwane przez Hartiego <acceleration>, jako przyspieszenie, konkretnie „przeskoczenie roku” – przejście do etapu programowo wyższego. Grupę interwencji, mieszczących się w przedziale 0.75-0.72, są <jasność przekazu nauczyciela; informacja zwrotna (od nauczyciela, łącząca się z odpowiednim ocenianiem); dobra relacja nauczyciel-uczeń>. Rozmiar efektu większości podejmowanych w szkołach interwencji jest **większy od 0, ale mniejszy od 0,4**.

**Tabela 1. Elementy rankingu strategii/działania na podstawie raportu Johna Hattiego**

Ranking	Strategia/działanie	Uśredniony efekt
1	Samoocena uczniowska	1,44
2	Metody nauczania bazujące na teorii J. Piaget’a	1,28
3	Ocenianie kształtujące	0,90
5	Przyspieszenie (przeskoczenie roku)	0,88
8	Jasność przekazu nauczyciela	0,75
10	Informacja zwrotna	0,73
	Dobra relacje nauczyciel - uczeń	0,72
	Nauczanie oparte o rozwiązywanie problemów	0,62

Źródło: Magdalena Bogusławska, Motywacja i zaangażowanie uczniów. Skuteczne strategie i metody edukacyjne. <http://www.orke.edu.pl/motywacja-zaangazowanie-uczniow-skuteczne-strategie-metody-edukacyjne/>

**Tabela 2. Interwencje (działania) przekraczające średni efekt interwencji**

Interwencja	Badania	Efekty	Średni efekt interwencji	Źródło interwencji/wplywu
Samoocena	209	305	1,44	Uczeń
Informacja zwrotna	1287	2050	0,73	Nauczyciel
Relacje nauczyciel - uczeń	229	1450	0,72	
Nauczanie w oparciu o rozwiązywanie problemów	221	719	0,61	Nauczyciel
Strategie nauczania	5 667	13572	0,60	Nauczyciel
Wymagające cele	604	820	0,56	Nauczyciel
Wpływ rówieśników	12	122	0,53	Nauczyciel
Zaangażowanie rodziców	716	1783	0,51	
Uczenie się w małych grupach	78	155	0,49	Nauczyciel
Motywacja	327	979	0,48	Uczeń
Zadawanie pytań	211	271	0,46	Nauczyciel
Jakość nauczania	141	195	0,44	Nauczyciel
Oczekiwanie	647	784	0,43	Nauczyciel

Źródło: <http://www.ceo.org.pl/pl/ok/news/co-ma-najwiekszy-wplyw-na-osigniecie-uczniow>

<sup>7</sup> Ibidem

<sup>8</sup> Źródło: <http://magdalapiec.pl/tag/raport-hattiego/>

<sup>9</sup> Więcej na stronie o adresie <https://cloud2p.edupage.org/cloud/Piaget.pdf?z%3ARGwCKn9KQO2IZUBuiK44RYVKGYZpWVwVs5ycCxS61AdK0JGrYQX0H9t0dAsocw6P>

Tabela 3. Interwencje (działania) nie przekraczające średniego efektu interwencji

Interwencja	Badania	Efekty	Średni efekt interwencji	Źródło interwencji/wplywu
Podział na grupy wg zdolności	125	202	0,30	Nauczyciel
Praca domowa	161	295	0,29	Nauczyciel
Indywidualizacja nauczania	638	1185	0,22	Nauczyciel
Rozmiar klasy	96	785	0,21	Szkoła
Szkoły społeczne	18	18	0,20	Szkoła
Dodatkowe programy nauczania	102	68	0,17	Szkoła
Edukacja nauczycieli	85	391	0,12	Nauczyciel
Wiedza merytoryczna Nauczycieli	92	424	0,09	Nauczyciel
Powtarzanie klasy	207	2675	-0,16	Nauczyciel

Źródło: <http://www.ceo.org.pl/pl/ok/news/co-ma-najwiekszy-wplyw-na-osiagnięcia-uczniow>

### Czy jest to wybór prawidłowy?

John Hattie ustalił, jak podaje T. Wejner-Jaworska<sup>10</sup>, następujące zależności: 0,0 – 0,15 – niski rozmiar efektu, 0,15 – 0,4 – średni rozmiar efektu, powyżej 1,0 – bardzo duży wzrost<sup>11</sup>, lecz „0,4” mówi się o pozytywnym wpływie danej metody<sup>12</sup>, czyli interwencji w edukacji.

W tabeli 2, to zestawienie opracowane przez A. Tułodziecką-Gumkowską, która wskazuje na wyniki

badania Hattie’go informujące, że większość interwencji mających wpływ na osiągnięcia edukacyjne uczniów zależy od nauczyciela<sup>13</sup>.

Tabela zawiera nie tylko nazwę interwencji, ale także badanie i efekty oraz to, co najbardziej interesuje odbiorcę, czyli średni efekt interwencji, a przede wszystkim wskazanie nauczyciel, inicjujących interwencję. Tabela 3, według raportu to zestawienie efektów przynoszących bardzo małe, a wręcz czasami negatywne rezultaty.

### Wizualizowanie 800 meta-analiz i 138 Badań Meta – efektów – kilka faktów

Hattie po syntetyzowaniu meta-analiz związanych z osiągnięciem, w książce *Visible Learning* przedstawił 138 wpływów na pozytywne i negatywne skutki wyników nauczania. Niektórzy krytycy twierdzą, że Hattie w porównywał tak wiele różnych rzeczy, iż „wygląda to jak porównywanie jabłek i pomarańczy”.

### Ile zostało meta-analizy syntetyzowanych dla każdego z 138 wpływów?<sup>14</sup>

W meta-analizach syntetyzowanych przez Hattiego ukazane są wyniki oparte na 50.000 badaniach. W badaniach bazowych widać (rys.3) silny nacisk na: „strategie” z wartością 5667 badań, „nauczanie wspomaganie komputerowe – instrukcja” wartość 4875 badań dotyczących nauczania wspomaganego sprzętem komputerowym, „wcześniejszego osiągnięcia” o wartości 3607 badań i „gender” – płeć uczniów o wartości badań 2926. Były badane także „wcześniejsza interwencja”, czyli zapobieganie; „sprzężenie zwrotne”,

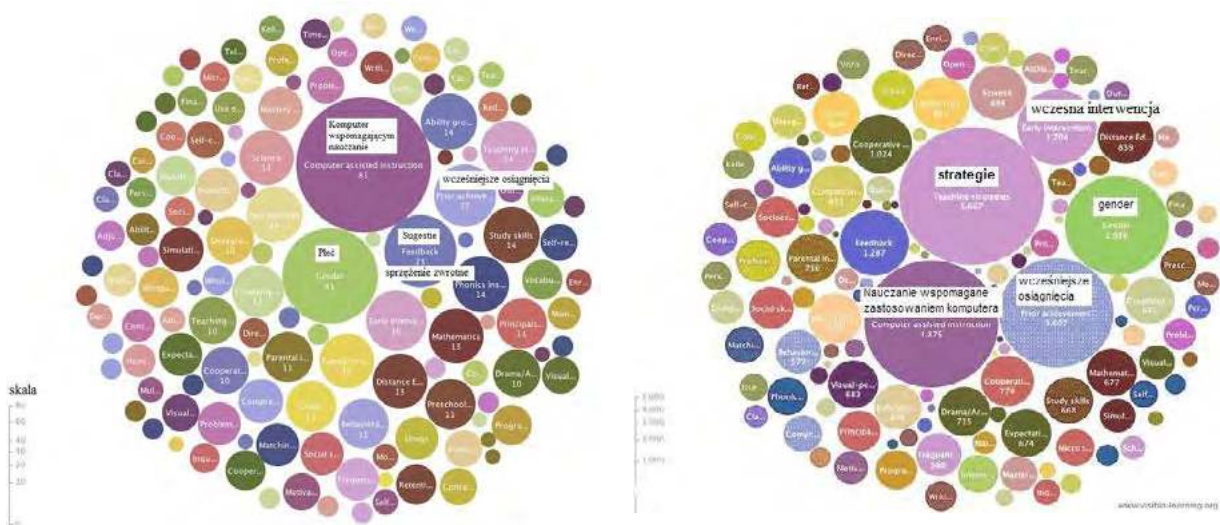
<sup>10</sup> w opracowaniu pt: T. Wejner-Jaworska, Czynniki warunkujące lepsze wyniki w nauce w świetle badań prof. Johna Hattiego. [w] Diagnostyka edukacyjne. Dorobek i nowe zadania. XX Konferencja Diagnostyki Edukacyjnej, Gdańsk

<sup>11</sup> Ibidem 2014 [http://www.ptde.org/file.php/1/Archiwum/XX\\_KDE/pdf\\_2014/Wejner-Jaworska.pdf](http://www.ptde.org/file.php/1/Archiwum/XX_KDE/pdf_2014/Wejner-Jaworska.pdf)

<sup>12</sup> <http://magdaliapiec.pl/praktyka-oparta-na-dowodach-2/>

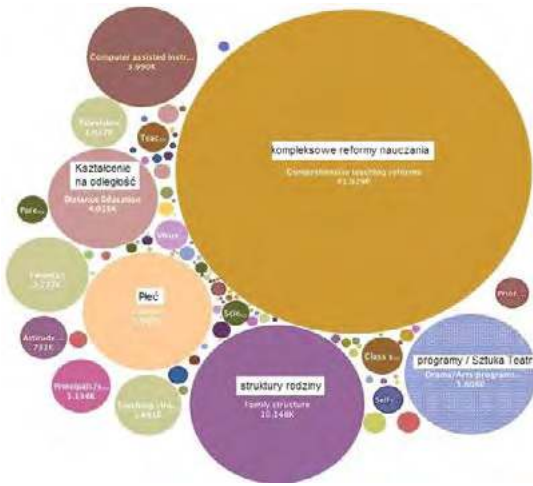
<sup>13</sup> A. Tułodziecka-Gumkowska, Co ma największy wpływ na osiągnięcia uczniów? <http://www.ceo.org.pl/pl/ok/news/co-ma-najwiekszy-wplyw-na-osiagnięcia-uczniow>

<sup>14</sup> <http://visible-learning.org/2013/06/visible-learning-meta-studies-effects-visualized/>



Rysunek 2. 3. Przedstawienie stosunkowo zrównoważonego rozkładu 800 meta-analiz, z naciskiem na „Wspomaganie nauczania komputerem”, „Płeć” i „Sugestie-sprzężenie zwrotne” i „Wcześniejsze osiągnięcia”.

Źródło: <http://www.visible-learning.org>



Rysunek 4. Przedstawienie liczby respondentów w podstawowych badaniach w meta-analizie mających wpływ na wyniki  
Źródło: <http://www.visible-learning.org>

czyli informacja zwrotna, oraz „współdziałanie” i „edukacja na odległość”.

Liczba osób, dla każdego wpływu jest bardzo nierównomiernie rozłożona została na 138 czynników. Otóż widoczne jest, (rys.4) że: połowa respondentów uczestniczyła w badaniu zatytułowanym „kompleksowe reformy nauczania” (41,9 mln); znacznie mniej osób brało udział w badaniach na temat „struktury rodziny” (10,1 mln); jeszcze mniej w badaniu dotyczącym „programy / Sztuka Teatr” (5,8 mln); a także w badaniu uwzględniającym „Pleć” (5,6 mln) i „Kształcenie na odległość” (4mln) i wpływ na efekty uczenia.

Przedstawiona w dane uwzględniają fakt, że w badaniu Hattiego poinformowano tylko o liczbie osób uwzględnionych w 98 spośród 138 wpływów. Niektóre pierwsze spostrzeżenia z tych wizualizacji to: nie wszystkie 138 wpływy są badane w takim samym stopniu (ilościowo). Otóż, Hattie nie analizował dokładnie wypowiedzi 80 milionów ludzi w każdym ze 138 wpływów. Ponad 60 mln osób uczestniczyło w badaniach związanych z wpływem czynników na uczenie się, które nie są najskuteczniejsze. Jego wpływy (interwencje) dla 10 najlepszych wyników pochodzą od studiowania odpowiedzi udzielonych przez mniej niż 1 mln osób.

Widoczny jest brak analizy na 40 czynników, w tym 3 wpływów z „barometru” Hattiego z puli 10 najlepszych. Badania Johna Hattie są kamieniem milowym w badaniach edukacyjnych. Supplement Times nazwał te badania edukacyjne: „Święty Graal nauczania”<sup>15</sup> lub szukania odpowiedzi na istnienie życia we wszechświecie. Książki Hattie dają odpowiedź w oparciu o zebrane i zinterpretowane dowody na pytanie „co działa najlepiej dla studentów (uczniów) na większe osiągnięcia (edukacyjne)?” Jak uważa autor powyższego określenia, „Profesor John Hattie, Auckland University, spędził ponad dziesięć lat

nad studiowaniem badań nad skutkami każdego rodzaju interwencji edukacyjnych stosowanych w salach na całym świecie anglojęzycznym”. I dodaje w następnych wersach: „Wyzsze szczeble jego rankingu dla 138 rodzajów reformy<sup>16</sup>, są zdominowane przez programy, które koncentrują się na poprawie interakcji uczeń-nauczyciel”.

Hattie skupia się na szkołach w anglojęzycznym świecie, ale większość aspektów podstawowych spostrzeżeń i wniosków powinny być również uwzględniane w innych krajach i systemach szkolnych albowiem, z kluczowych czynników, dla lepszych wyników nauczania, wiele ma implikacji tego, co jest dobre dla nauczania i odniesienia sukcesu w szkole. Po pierwsze, nauczyciele są centralnym elementem efektywnego uczenia się w szkołach. Po drugie, wyniki sugerują, że „Reforma Hattiego” w szkołach powinna skupić się na tym, co dzieje się w klasie, a nie na reformach strukturalnych<sup>17</sup>.

W wielu krajach wyniki Hattie już stały się ważnym elementem rozwoju zawodowego nauczycieli. Inni pójdą w tym samym kierunku. Jacek Strzemieczny tak pisze o dokonaniu Hattiego: „... zebraną przez siebie imponującą bazę syntez badań naukowych przełożył na pojedynczą skalę z wielkością efektu edukacyjnego (effect size). W ten sposób stworzył bardzo prosty i użyteczny sposób porównywania wszechstronnego zbioru inicjatyw edukacyjnych. Poza opracowaniem obszernej tabeli zbierającej przeanalizowane meta-analizy przygotował wygodny do wykorzystania opis. Z jego publikacji wylania się odpowiedź na pytanie:

### Jakie metody według badań naukowych działają w edukacji i w jakim stopniu ?

W książce *Visible Learning* z 2008 r., John Hattie syntetyzował wyniki, co faktycznie działa w szkołach w celu poprawy nauczania. Napisana książka dla studentów, jako element kształcenia wstępnego i nauczycieli realizujących edukację, wyjaśnia, jak stosować zasady, w każdej klasie (oddziale szkolnym) na całym świecie. Autor oferuje zwięzłe i łatwe w obsłudze podsumowania najbardziej udanych interwencji i praktycznie, krok po kroku, wskazuje drogę do udanej realizacji widocznego uczenia się i nauczania w danej klasie.

Ta pozycja w literaturze dydaktycznej o treści, która łączy największy projekt badawczy w historii strategii nauczania z praktyczną realizacją w klasie (oddziale szkolnym), w każdym środowisku. W mistrzowski sposób ujmuje planowanie pracy, zarówno nauczyciela i ucznia oraz zawiera wskazówki krok po kroku do przygotowania lekcji, interpretując naukę i pozyskane opinie podczas obserwacji lekcji i po ich omówieniu. Oferuje formularze kontrolne, ćwiczenia, studia przypadków i scenariusze najlepszych praktyk, aby pomóc w podnoszeniu osiągnięć uczniów. Zawiera testy kontrolne dla całej szkoły i porady dla dyrekto-

<sup>15</sup> Warwick Mansell, Research reveals teaching’s Holy Grail, <https://www.tes.co.uk/article.aspx?storycode=6005393>

<sup>16</sup> w rankingu pod względem ich wpływu na podniesienie osiągnięć uczniów

<sup>17</sup> <http://visible-learning.org/2009/02/visible-learning-meta-study/>

<sup>18</sup> Jacek Strzemieczny, Jak w systemie edukacji możemy odejść od testocentryzmu? [http://www.eid.edu.pl/blog/wpis\\_jak\\_w\\_systemie\\_educacyjnym\\_mozemy\\_odejsc\\_od\\_testocentryzmu,1601.html](http://www.eid.edu.pl/blog/wpis_jak_w_systemie_educacyjnym_mozemy_odejsc_od_testocentryzmu,1601.html)

rów szkół, mające na celu ułatwienie zobrazowania nauki w szkole. Zawiera także dodatkowe meta-analizy, co w sumie ukazuje ponad 900 badań. Kompleksowo obejmującej wiele dziedzin aktywności uczenia się, w tym motywację uczniów, strategii programu, metod meta-poznawczych, zachowań, strategii nauczania i zarządzania w klasie.

Pozycja w literaturze pt. „*Widoczna nauka dla nauczycieli*” to lektura obowiązkowa dla każdego ucznia lub nauczyciela, który chce uzyskać odpowiedź na pytanie opartą na dowodach: „Jak maksymalizujemy osiągnięcia w naszych szkołach?” i **w jaki sposób uzyskać to w naszych szkołach?**<sup>19</sup>

Na pytanie, o poprawę systemu edukacji w Wielkiej Brytanii, John Hattie odpowiedział, że musimy pozbyć się mentalności przeciętnych nauczycieli. Jeśli uczniowi nie uda się, to dlatego, że nie byli w stanie tego osiągnąć za pierwszym razem, i należy zastąpić go kolejnym działaniem. Jeśli uczeń nie osiąga zamierzonych efektów, to dlatego, że jego wysiłek nie był właściwie wspomagany przez nauczyciela lub instruktora. John Hattie pragnie wyjaśnić, że zdolność ucznia do osiągnięcia wyznaczonych celów edukacyjnych, głównie sprowadza się do **wiedzy nauczycieli**. Jak nauczyciele myślą, co robią, jak codzienne podejmują decyzje, są to najważniejsze zdarzenia w szkole. Profesor występuje z jasnym przesłaniem: szkoły muszą przestać myśleć o rzeczach, które tak naprawdę nie liczą się i zamiast **mówić o wiedzy nauczycieli, pasji, diagnozowaniu i praktyce, realizować to, co daje wzrost osiągnięć edukacyjnych młodzieży**.<sup>20</sup>

### Jakie zagadnienia są istotne w edukacji – kilka uwag o nauczaniu fizyki

Poniżej kilka zagadnień oraz wynikające z działania najważniejsze fakty.

#### Widoczne działanie w fizyce (matematyce), dla szkolnictwa ponadpodstawowego (klasy K-12): co najlepiej sprawdza się w optymalizacji uczenia się uczniów<sup>21</sup>

Różnorodne zadania, praca zespołowa, liczne rozmowy – dyskusje, uczenie się oparte na rozwiązywaniu problemów, bezpośrednie instrukcje przy eksperymentowaniu i wiele innych możliwych sposobów możemy stosować w trakcie nauki fizyki, ale skąd mamy wiedzieć, które z nich działają najlepiej? W książce *Visible Learning for Mathematics* sześciu uznanych pedagogów twierdzi,

że nie chodzi o to, który, ale przede wszystkim chodzi o kiedy to realizować.

Autorzy pokazują, jak zaprojektować nauczanie o dużym wpływie, aby wszyscy uczniowie wykazali się wartością ponad roku nauki fizyki (a także matematyki, jako języka fizyki) w ciągu roku spędzonego w szkole. To wysoka poprzeczka, ale dzięki niesamowitej strukturze K12,<sup>22</sup> nauczyciel wybiera właściwe podejście we właściwym czasie, w zależności od tego, gdzie uczniowie znajdują się w trzech fazach uczenia się: powierzchniowej, głębokiej i transferowej. Powoduje to zauważalne uczenie się, ponieważ efekt jest mierzalny, a ramy są tworzone na podstawie bieżących badań w fizyce (matematyce) w połączeniu z syntezą Hattiego.

Opracowanie książkowe, wyposażone w klipy wideo, narzędzia do planowania, rubryki i szablony, pozwalają utworzyć ścieżkę edukacyjną dla nauczania fizyki, na podstawie której strategii instruktażowe należy użyć w każdej fazie cyklu nauczania i uczenia się. Oto wyróżnione fazy uczenia:

**Faza uczenia się powierzchniowego**, występuje kiedy, dzięki starannie skonstruowanym doświadczeniom, uczniowie poznają nowe koncepcje i realizują połączenia umiejętności proceduralnych z słownictwem, które nadają kształt rozwijaniu rozumienia pojęciowego. **Faza głębokiego uczenia się**: to, poprzez rozwiązywanie bogatych, skomplikowanych, na odpowiednio wysokim poziomie zadań poznawczych, wraz z bogatą dyskusją. Uczniowie nawiązują i realizują połączenia między koncepcjami pojęciowymi, tworzą matematyczne uogólnienia oraz płynnie stosują i ćwiczą umiejętności proceduralne.

**Faza przeniesienia**: jest realizowana kiedy uczniowie mogą samodzielnie przemyśleć bardziej złożoną fizykę (matematykę) oraz planować, badać i opracowywać, stosując zdobytą wiedzę w nowych sytuacjach fizycznych (matematycznych).

Aby przygotować uczniów do nauki fizyki (matematyki) na wyższym poziomie, musimy jasno określić, gdzie są uczniowie w danej chwili, dokąd muszą się udać i jak to wygląda, gdy tam dotrą.

### Dziesięć sposobów myślenia dla widocznego uczenia się w celu nastawionego na sukces

Oryginalne badanie zaprezentowane w opracowaniu „*Visible Learning*” wykazało, że jednym z najważniej-

<sup>19</sup>[http://www.amazon.com/Visible-Learning-Teachers-Maximizing-Impact/dp/0415690153/ref=pb\\_bxgy\\_b\\_text\\_y](http://www.amazon.com/Visible-Learning-Teachers-Maximizing-Impact/dp/0415690153/ref=pb_bxgy_b_text_y) [https://www.amazon.com/Visible-Learning-Teachers-Maximizing-Impact/dp/0415690153/ref=pb\\_sbs\\_3/138-8222929-8986600?pd\\_rd\\_w=Kvvy&pf\\_rd\\_p=3676f086-9496-4fd7-8490-77cf7f43f846&pf\\_rd\\_r=A89CE6AGHHPBQ09SF04E&pd\\_rd\\_r=21e30372-4cfa-4f1e-b230-a46d8c59268d&pd\\_rd\\_wg=RkgYt&pd\\_rd\\_i=0415690153&pvc=1](https://www.amazon.com/Visible-Learning-Teachers-Maximizing-Impact/dp/0415690153/ref=pb_sbs_3/138-8222929-8986600?pd_rd_w=Kvvy&pf_rd_p=3676f086-9496-4fd7-8490-77cf7f43f846&pf_rd_r=A89CE6AGHHPBQ09SF04E&pd_rd_r=21e30372-4cfa-4f1e-b230-a46d8c59268d&pd_rd_wg=RkgYt&pd_rd_i=0415690153&pvc=1)

<sup>20</sup> Co tak naprawdę wpływa na zdolności dziecka? Praca domowa? Rozmiar klasy? Sarah Montague przeprowadza wywiad z autorem jednego z największych projektów badawczych dotyczących szkół i nauczania. <https://www.bbc.co.uk/programmes/b04dmxwl>

<sup>21</sup> [https://www.amazon.com/Visible-Learning-Mathematics-Grades-K-12/dp/150636294X/ref=pb\\_vtp\\_3/138-8222929-8986600?pd\\_rd\\_w=g2HFN&pf\\_rd\\_p=96226b5f-2d9a-439b-be45-97603787c682&pf\\_rd\\_r=NQGF8Y97JM04A6ADSA7&pd\\_rd\\_r=352579cc-9237-40d9-9371-d88954596f38&pd\\_rd\\_wg=OVOMF&pd\\_rd\\_i=150636294X&pvc=1](https://www.amazon.com/Visible-Learning-Mathematics-Grades-K-12/dp/150636294X/ref=pb_vtp_3/138-8222929-8986600?pd_rd_w=g2HFN&pf_rd_p=96226b5f-2d9a-439b-be45-97603787c682&pf_rd_r=NQGF8Y97JM04A6ADSA7&pd_rd_r=352579cc-9237-40d9-9371-d88954596f38&pd_rd_wg=OVOMF&pd_rd_i=150636294X&pvc=1)

<sup>22</sup> <https://kometa.edu.pl/artykuly/244,edukacja-k12-ery-cyfrowej> <https://www.jp edukacja.pl/porady/system-edukacyjny-w-usa/> Jedynym elementem jest obowiązek zdobycia wykształcenia podstawowego i średniego – to ostatnie kończy się na poziomie 12 klasy (K-12) <https://lagunita.education/blog/system-edukacji-w-usa>.

<sup>23</sup> [https://www.amazon.com/Set-Visible-Learning-Feedback-Mindframes/dp/1138635529/ref=pb\\_bxgy\\_img\\_1/138-8222929-8986600?pd\\_rd\\_w=SpW4m&pf\\_rd\\_p=6b3eeefa-7b16-43e9-be45-2e332cbf99da&pf\\_rd\\_r=NQGF8Y97JM04A6ADSA7&pd\\_rd\\_r=352579cc-9237-40d9-9371-d88954596f38&pd\\_rd\\_wg=OVOMF&pd\\_rd\\_i=1138635529&pvc=1](https://www.amazon.com/Set-Visible-Learning-Feedback-Mindframes/dp/1138635529/ref=pb_bxgy_img_1/138-8222929-8986600?pd_rd_w=SpW4m&pf_rd_p=6b3eeefa-7b16-43e9-be45-2e332cbf99da&pf_rd_r=NQGF8Y97JM04A6ADSA7&pd_rd_r=352579cc-9237-40d9-9371-d88954596f38&pd_rd_wg=OVOMF&pd_rd_i=1138635529&pvc=1)

szych czynników wpływających na osiągnięcia uczniów jest to, jak nauczyciele myślą o uczeniu się i własnej roli. W treści „*Dziesięć mentalności dla widocznego uczenia się*” autorstwa Johna Hattiego i Klaus Zierera zdefiniowano dziesięć zachowań lub sposobów myślenia, które nauczyciele muszą przyjąć, aby zmaksymalizować sukces uczniów. Obejmują one: myślenie i ocenianie swojego wpływu na naukę uczniów; znaczenie oceny i informacji zwrotnej dla nauczycieli; współpraca i poczucie wspólnoty; przekonanie, że uczenie się musi być trudne; angażowanie się w dialog i prawidłową równowagę między mówieniem a słuchaniem; przekazywanie uczniom kryteriów sukcesu; budowanie pozytywnych relacji. Ten sposób myślenia powinien stanowić podstawę każdego działania w szkołach, a opiera się na zasadzie, że nauczyciele są ewaluatorami, promotorami zmiany, ekspertami ds. uczenia się i poszukiwaczami informacji zwrotnej, którzy są stale zaangażowani w dialog i wyzwania.

### Zamień dobre intencje w lepsze wyniki – zgodnie z projektem!<sup>24</sup>

Jedno z pytań brzmi: po co pozostawiać sukces uczniów przypadkowi? Łącząc swoją intuicję i doświadczenie z najnowszymi badaniami na temat praktyk uczenia się o dużych wpływach na efekty kształcenia, nauczyciel fizyki może zmienić swoje nauczanie z dobrego na świetne i wywrzeć trwałe efekty u swoich uczniów. Znajdujemy informacje, które prowadzą nauczyciela krok po kroku od intencji do wdrożenia, aby przyspieszyć wpływ, jaki jego nauczanie ma na uczenie się uczniów.<sup>25</sup> Zapisano o czterech etapach modelu DIIE: Diagnoza i odkrywanie, interwencja, wdrażanie i ocena. Ukazane są historie najlepszych praktyk w działaniu i przykłady z klas na całym świecie. Zwraca się uwagę, że nauczanie może nie być

przypadkiem, ale przyjdzie zgodnie z planem. Niezależnie od tego, czy dopiero zaczynasz nauczać, czy chcesz jako nauczyciel wzmocnić swoje instrukcje, podejmij wyzwanie i odkryj nowe ramy nauczania z prawdziwą intencjonalnością.

### Widoczne efekty nauki dzięki informacji zwrotnej

Informacja zwrotna jest prawdopodobnie najbardziej krytycznym i potężnym aspektem nauczania i uczenia się. Wskazuje się na istniejący paradoks: dlaczego sprzężenie zwrotne jest tak potężne i dlaczego jest tak zmienne? Jest to paradoks, który *Visible Learning: Feedback* ma na celu rozwikłać i rozwiązać.<sup>26</sup> Łącząc doskonałość badawczą, teorię i rozległą wiedzę dydaktyczną, ta książka obejmuje zasady i praktyczne informacje zwrotne, w tym: zmienność informacji zwrotnej, znaczenie kontekstów powierzchniowych, głębokich i transferowych, informacje zwrotne od ucznia do nauczyciela, informacje zwrotne od rówieśników, moc informacji zwrotnych w trakcie lekcji i łatwych do opanowania informacji zwrotnych po lekcji. Autorzy rzucają światło na to, co tworzy skuteczną kulturę informacji zwrotnej i zapewniają struktury nauczania i uczenia się, które zapewniają najlepszą możliwą strukturę informacji zwrotnej. „*Widoczna nauka: Informacja zwrotna*” powstała po połączeniu dwóch znanych na świecie nauczycieli. Łączy światowej sławy wiedzę naukową Hattie z ogromnym doświadczeniem Clarke w zakresie praktyki i zastosowania w klasie. Dzięki temu ta książka jest niezbędnym źródłem informacji dla nauczycieli w każdym środowisku, fazie lub kraju. Także dla nauczyciela fizyki, na każdym etapie kształcenia.

dr Kazimierz Mikulski  
Maksymilianowo

<sup>24</sup> [https://www.amazon.com/Great-Teaching-Design-Intention-Implementation/dp/1071818333/ref=pd\\_sbs\\_5/138-8222929-8986600?pd\\_rd\\_w=JVLgh&pf\\_rd\\_p=3676f086-9496-4fd7-8490-77cf7f43f846&pf\\_rd\\_r=SV75E7GYWFFJRK2JJ6EC&pd\\_rd\\_r=0d935d7b-7665-4eb5-bf82-3ca06b7b2c13&pd\\_rd\\_wg=SYPJH&pd\\_rd\\_i=1071818333&psc=1](https://www.amazon.com/Great-Teaching-Design-Intention-Implementation/dp/1071818333/ref=pd_sbs_5/138-8222929-8986600?pd_rd_w=JVLgh&pf_rd_p=3676f086-9496-4fd7-8490-77cf7f43f846&pf_rd_r=SV75E7GYWFFJRK2JJ6EC&pd_rd_r=0d935d7b-7665-4eb5-bf82-3ca06b7b2c13&pd_rd_wg=SYPJH&pd_rd_i=1071818333&psc=1)

<sup>25</sup> Ibidem; Zorganizowana wokół struktury DIIE, Great Teaching by Design

<sup>26</sup> [https://www.amazon.com/Visible-Learning-Feedback-John-Hattie/dp/1138599891/ref=pd\\_sbs\\_7/138-8222929-8986600?pd\\_rd\\_w=CrGwE&pf\\_rd\\_p=3676f086-9496-4fd7-8490-77cf7f43f846&pf\\_rd\\_r=KWY6PSHHDD2TBPS4YDFZ&pd\\_rd\\_r=4bcf50c9-5372-4106-b20a-a7b0bdfa363f&pd\\_rd\\_wg=CE8hc&pd\\_rd\\_i=1138599891&psc=1](https://www.amazon.com/Visible-Learning-Feedback-John-Hattie/dp/1138599891/ref=pd_sbs_7/138-8222929-8986600?pd_rd_w=CrGwE&pf_rd_p=3676f086-9496-4fd7-8490-77cf7f43f846&pf_rd_r=KWY6PSHHDD2TBPS4YDFZ&pd_rd_r=4bcf50c9-5372-4106-b20a-a7b0bdfa363f&pd_rd_wg=CE8hc&pd_rd_i=1138599891&psc=1)

dokończenie artykułu ze str. 39

wymienioną energię wewnętrzną, ale jest to wynik **tarcia wewnętrznego** występującego w odkształcamy ciele. Jest ono związane z wzajemnym i trwałym przemieszczaniem się cząsteczek tego ciała.

Podobnie jest też w przypadku **tarcia zewnętrznego**. Mamy zatem tarcie zarówno zewnętrzne jak i wewnętrzne, i w obu tych zjawiskach następuje zamiana pracy na energię wewnętrzną wywołującą wzrost temperatury ciała. Oba te procesy obserwuje się między innymi w przypadku zderzenia ciała niesprężystego z ciałem sprężystym. Np. pocisk ołowiany topi się przy zderzeniu ze stalową płytą. Obliczenia wskazują, że niemal cała energia kinetyczna pocisku zamienia się wówczas

w jego energię wewnętrzną wywołującą znaczący wzrost temperatury ołowiu.

O ile tarcie ślizgowe jest wyczerpująco omawiane na lekcjach fizyki, to opór toczny jest jedynie wzmiankowany. A szkoda, bo jest to powszechne zjawisko obserwowane na co dzień. Nie pamiętam, by w literaturze metodycznej pojawiło się opracowanie tego problemu. Dziwi to mnie, bo przecież uczymy fizyki, by nasi uczniowie rozumieli zjawiska w otaczającej ich rzeczywistości przyrodniczo-technicznej. A nie jest to problem przekraczający możliwości poznawcze uczniów szkół średnich.

Waldemar. Reñda  
Olkusz



# Astronomiczna rachuba czasu

## cz. 1

Foto – Dreamstime

**W pierwszej części tego artykułu przedstawione zostały najważniejsze informacje i pojęcia związane z astronomiczną rachubą czasu.**

**Marcin Wesołowski**

Astronomia jest jedną z najstarszych nauk zajmujących się wyjaśnianiem i analizą ruchów ciał niebieskich. Jednym z fundamentalnych problemów astronomii jest astronomiczna rachuba czasu. Mówiąc o czasie w sensie czysto astronomicznym mamy na myśli przeważnie krótkie odstępy czasu związane z dobą, a więc z ruchem obrotowym Ziemi. W astronomii praktycznej miarą czasu jest zawsze kąt godzinny ruchu określonego punktu na sferze niebieskiej. Czas określamy więc jako pewien kąt i tym tłumaczy się stosowanie jednostek czasowych do określania kątów godzinnych. Przy wyznaczaniu odstępów czasu często w praktyce są stosowane jeszcze następujące zjawiska: drgania kryształów, okresowe zmiany wewnątrz atomów, ruch wahadła, itp. Podane powyżej przykłady zjawisk fizycznych służą do budowy coraz to dokładniejszych instrumentów odmierzających czas.

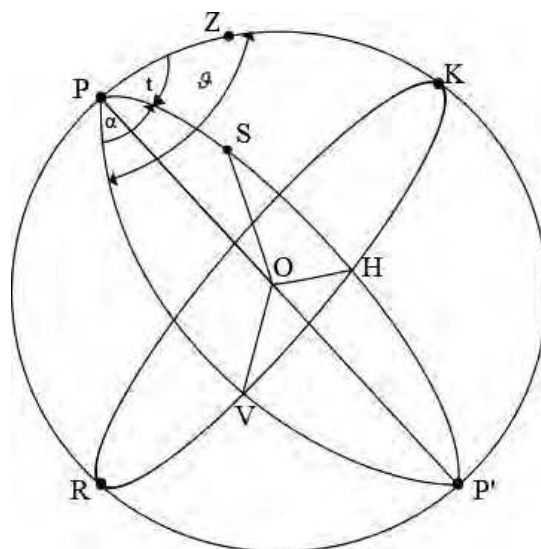
Dokonując analizy astronomicznej rachuby czasu skupimy się na następujących zagadnieniach: czas gwiazdowy, czas słoneczny i czas strefowy.

### Czas gwiazdowy

Wraz z ruchem dziennym sfery niebieskiej ściśle związane jest pojęcie czasu gwiazdowego. Jeżeli gwiazdy byłyby nieruchomymi punktami położonymi na sferze niebieskiej, to za obiekt służący do wyznaczania czasu gwiazdowego moglibyśmy wybrać tak naprawdę dowolną gwiazdę. Wówczas moglibyśmy mierzyć czas jej kątem godzinnym. Jednakże gwiazdy nie należą do obiektów

astronomicznych, które są ściśle nieruchome, tak więc nie możemy ich traktować jako nieruchome punkty sfery niebieskiej. Dlatego, że w ich położeniach występują niewielkie wzajemne przesunięcia. Aby w miarę dokładnie dokonać pomiarów czasu najlepiej jest go powiązać z układami współrzędnymi. Najlepszym takim układem w tym przypadku będzie drugi układ współrzędnych równikowych.

W rachubie czasu za podstawowy punkt sfery niebieskiej należy przyjąć punkt równonocy wiosennej i kąt godzinny tego punktu nazywamy czasem gwiazdowym.



Rys. 1. Związek czasu gwiazdowego  $\theta$  z kątem godzinnym  $t$  i rektascensją  $\alpha$ .

Różnica czasu pomiędzy kolejnymi kulminacjami górnymi punktu równonocy wiosennej w astronomii nosi nazwę doby gwiazdowej.

Z Rys. 1. wynika, że: koło PZKP'RP – oznacza południk, KHVRK – równik, P – biegun północny, S – położenie ciała na sferze niebieskiej, V – punkt równonocy wiosennej.

Korzystając z definicji kąta godzinnego  $t$  i rektascensji  $\alpha$  wynika, że kąt godzinny  $\vartheta$  punktu równonocy wiosennej V (czyli czas gwiazdowy,  $\vartheta$ ) jest sumą tych dwóch kątów. Dlatego też jego wartość jest równa:

$$\vartheta = t + \alpha. \quad (1)$$

W szczególnym przypadku w momencie kulminacji górnej, wtedy, gdy  $t = 0$ , dla tego momentu mamy:

$$\vartheta = 0 + \alpha = \alpha. \quad (2)$$

Na podstawie równania (1 i 2) możemy stwierdzić, że czas gwiazdowy w takim przypadku jest równy rektascensji ciał niebieskich w ich momencie górowania. Wynika stąd bardzo praktyczna rzecz, że czas gwiazdowy może być wyznaczony obserwacyjnie, jeżeli zaobserwujemy moment kulminacji ciała niebieskiego o znanej rektascensji  $\alpha$ .

## Czas słoneczny

Decydujące znaczenie podczas obserwacji astronomicznych ma czas gwiazdowy. Jednakże czas ten nie znajduje większego zastosowania związanego z egzystowaniem ludzi. Życie człowieka, związane jest ściśle ruchem dziennym naszej jedynej gwiazdy znajdującej się w Układzie Słonecznym – Słońca. Wśród wielu zjawisk zachodzących na sferze niebieskiej pierwotny człowiek nauczył się odróżniać światło od ciemności. Całą dobę podzielił na dwie części: dzień – to jest od wschodu Słońca, aż do jego zachodu i noc od zachodu do wschodu Słońca.

Wraz z dalszym rozwojem cywilizacji człowiek uczył się dzielić dzień i noc na mniejsze jednostki czasowe. Już około 3000 roku p.n.e. w starożytnym Egipcie wprowadzono pojęcie godziny. System ten zakładał, że dzień zostanie podzielony na 12 godzin dziennych i noc na 12 godzin nocnych. Taki właśnie system stosowali także Grecy, skąd przejęli go Rzymianie i Arabowie, a od nich narody europejskie czasów średniowiecza. Taki system podziału doby pozostał zasadniczo niezmienny do czasów dzisiejszych.

Wraz ze znaczącym rozwojem astronomii przyjęto za podstawową miarę czasu kąt godzinny środka tarczy słonecznej. Różnica czasu między kolejnymi górnymi lub dolnymi kulminacjami środka tarczy słonecznej nosi nazwę prawdziwej doby słonecznej. Czas kulminacji górnej to prawdziwe południe, a chwila kulminacji dolnej to prawdziwa północ. W obecnym czasie za początek prawdziwej doby słonecznej przyjmuje się północ. Dlatego też prawdziwy czas słoneczny  $T_0$  określamy jako kąt godzinny środka tarczy słonecznej  $t_0$  powiększony o  $12^h$ . Wówczas słuszna będzie następująca zależność:

$$T_0 = t_0 + 12^h. \quad (3)$$



Foto. 1. Zegar słoneczny (źródło: wikipedia).

Prawdziwy czas słoneczny wskazują zegary słoneczne. Główną częścią tego mechanizmu jest pręt skierowany ku biegunowi północnemu. Tworzy on z płaszczyzną horyzontu kąt  $\varphi$ , który jest równy szerokości geograficznej. Wskazówką zegara jest cień rzucany przez pręt. Płaszczyzny poprowadzone przez Słońce i pręt są płaszczyznami kół godzinnych Słońca. Cień rzucany przez pręt zegara słonecznego znajduje się w płaszczyźnie koła godzinnego Słońca.

W tym miejscu należy zwrócić uwagę na istotny fakt, mówiący o tym, że prawdziwy czas słoneczny nie jest czasem jednostajnym. Jednym z głównych powodów takiej sytuacji jest fakt, że kąt godzinny środka tarczy słonecznej nie narasta jednostajnie. Wynika stąd, że poszczególne doby słoneczne nie są sobie równe, gdyż Słońce porusza się z różną prędkością po ekliptyce. Jednakże, gdyby prędkość Słońca była stała, to kąty godzinne Słońca nie narastałyby jednostajnie, gdyż rzuty na równik równych łuków ekliptyki w różnych miejscach nie są jednakowe. Aby dokonać w miarę dokładnie rejestracji zachodzących zjawisk fizycznych jak i astronomicznych wymagany jest tzw. czas wzrastający jednostajnie. Możemy go otrzymać poprzez wprowadzenie pojęcia średniego Słońca, który będziemy traktować, jako punkt matematyczny. Dzięki takiemu podejściu ruch Słońca odbywa się ze stałą prędkością kątową, która jest równa średniej prędkości kątowej rzeczywistego ruchu Słońca po ekliptyce. Z potraktowania średniego Słońca jako punktu matematycznego wynika, że rektascensja  $\alpha_m$  słońca średniego jest równa jego średniej długości ekliptycznej  $\lambda_m$ .

$$T_s = t_s + 12^h. \quad (4)$$

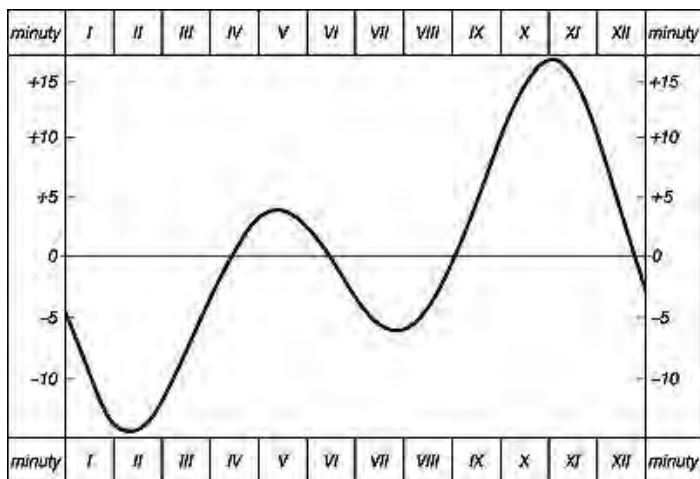
Różnicę pomiędzy rektascensją średniego słońca a rektascensją środka tarczy Słońca rzeczywistego w astronomii nazywamy równaniem czasu.

Równanie to możemy zapisać jako:

$$E = -7.7 \cdot \sin(79^\circ + \lambda) + 9.5 \cdot \sin(2\lambda), \quad (5)$$

gdzie  $\lambda$  oznacza długość ekliptyczną Słońca prawdziwego, a współczynniki  $-7.7$  oraz  $9.5$  wyrażone są w minutach.

Inaczej mówiąc równanie czasu określa różnicę pomiędzy czasem prawdziwym słonecznym i średnim przy założeniu, że oba te czasy obliczamy jednocześnie.



Rys.2. Wykres równania czasu.

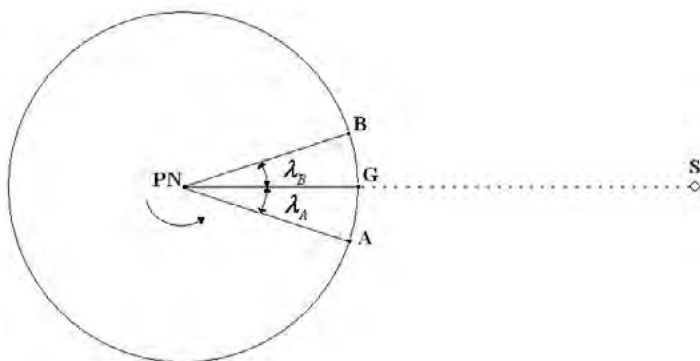
$$\Delta\alpha = T_O - T_S. \quad (6)$$

Przebieg równania czasu można przedstawić w następujący sposób, jak na rysunku 2.

### Czas strefowy

Ziemia w swoim ruchu wirowym wykonuje w stosunku do Słońca obrót o 360° w ciągu 24 godzin. Wynika z tego, że w ciągu godziny Ziemia obraca się o kąt 15°, a więc w ciągu minuty o ¼°. Konsekwencją tego jest fakt, że Słońce góruje w miejscowościach o różnych długościach geograficznych w różnym czasie. Oznacza to, że na różnych długościach geograficznych mamy różne czasy miejscowe.

Załóżmy, że patrzymy od strony północnego bieguna Ziemi na Ziemię wirującą wokół własnej osi na tle sfery niebieskiej. Na rysunku 3 zaznaczono następujące punkty: punkt PN oznacza biegun północny, punkt Greenwich G (λ=0°), punkt A to miejscowość położona na zachód od Greenwich, punkt B miejscowość położoną na wschód od Greenwich oraz S to Słońce. Rysunek 3 przedstawia moment, gdy Słońce góruje na południku Greenwich tzn. jest tam słoneczne południe: t<sub>G</sub> = 12<sup>00</sup>. Niech długość geograficzna miejscowości A wynosi λ<sub>A</sub> = 15° W, a długość geograficzna miejscowości B wynosi λ<sub>B</sub> = 15° E. Ponieważ Ziemia w ciągu godziny obróci się z zachodu na wschód o 15°, więc Słońce górowało już na południku w miejscowości B godzinę wcześniej, a będzie górować na połud-



Rys.3. Górowanie słońca na południku Greenwich.

niku w miejscowości A za godzinę. Z przeprowadzonej analizy wynika bezpośrednio, że w miejscowości B jest godzina 13<sup>00</sup>, a w miejscowości A jest godzina 11<sup>00</sup>.

Na podstawie tak przeprowadzonej analizy możemy wyciągnąć następujące wnioski:

$$t_A = 11^{00} \quad t_G = 12^{00}, \quad t_B = 13^{00},$$

$$\lambda_A = 15^\circ \text{ W}, \quad \lambda_G = 0^\circ, \quad \lambda_B = 15^\circ \text{ E}.$$

Należy pamiętać, że czas miejscowy równy jest czasowi w Greenwich pomniejszonemu o długość geograficzną danego miejsca obserwacji wyrażoną w mierze czasowej (15° długości geograficznej odpowiada 1 godzina). Wówczas obowiązuje tutaj następująca zasada: długości geograficzne zachodnie są dodatnie, a długości geograficzne wschodnie są ujemne. Dla dwóch różnych miejscowości A i B możemy zapisać:

$$t_1 = t_G + \lambda_1, \quad (7)$$

$$t_2 = t_G + \lambda_2.$$

Odejmując stronami powyższe równania otrzymujemy:

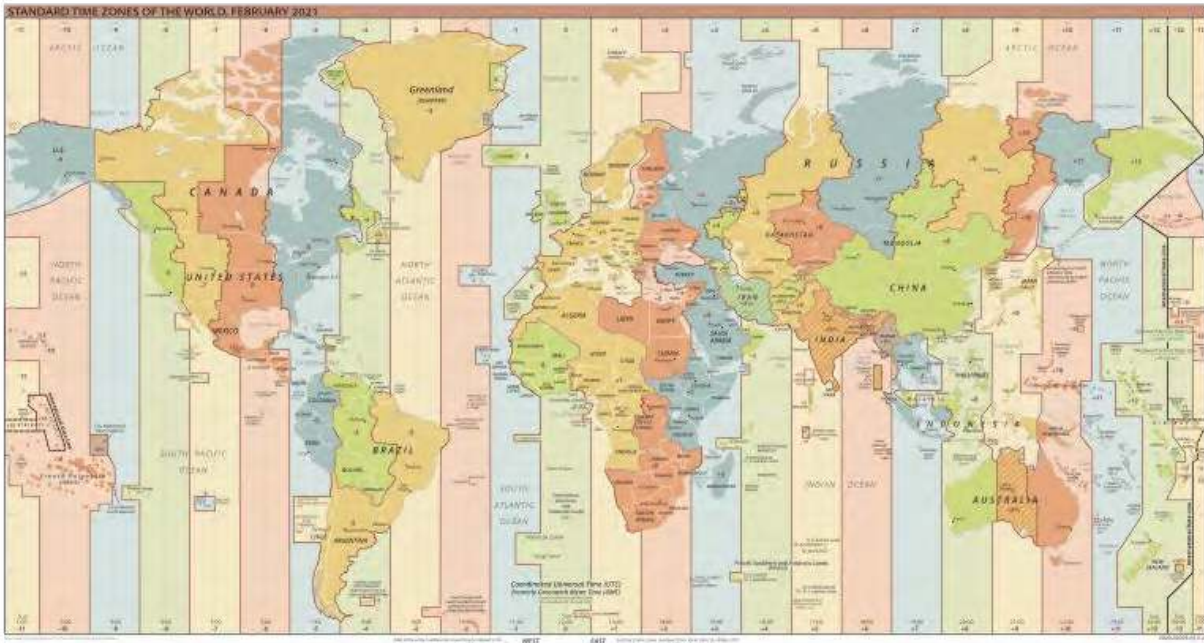
$$t_1 - t_2 = \lambda_1 - \lambda_2. \quad (8)$$

Otrzymana różnica czasów miejscowych w dwóch miejscowościach A i B jest równa różnicy długości geograficznych pomiędzy tymi miejscowościami.

Gdyby na różnych południkach regulowano zegarki według czasów miejscowych, to wskazywałyby one różne czasy, nawet w miejscowościach położonych bardzo blisko siebie. Aby uniknąć tej niedogodności wprowadzono na Ziemi 24 strefy czasowe (rys.4), z których każda obejmuje obszar 15° długości geograficznej. W strefach sąsiednich czas różni się o jedną godzinę. Środek pierwszej strefy wyznacza południk λ<sub>G</sub>=0° (Greenwich), który obejmuje obszar od 7,5° W aż do 7,5° E. W całej tej strefie czas liczony jest według czasu słonecznego miejscowego południka λ<sub>G</sub>=0°. Czas w tej strefie nazywamy czasem uniwersalnym (UT – Universal Time).

Na wschód od strefy czasu uniwersalnego w każdej strefie czas zwiększa się o jedną godzinę, a na zachód w każdej strefie czas pomniejsza się o jedną godzinę. Weźmy pod uwagę np. północ czasu uniwersalnego. W strefie południka -1<sup>h</sup> (na wschód) jest godzina 1<sup>00</sup> po północy dnia 10.07, w strefie -2<sup>h</sup> jest godzina 2<sup>00</sup> po północy dnia 10.07 itd. Przesuwając się tak dalej na wschód stwierdzamy, że w strefie -12<sup>h</sup> jest godzina 12<sup>00</sup> w południe dnia 10.07. Natomiast w strefie południka +1<sup>h</sup> (na zachód) jest o godzinę wcześniej niż na południku 0<sup>h</sup> czyli jest 23<sup>00</sup> przed północą dnia 9.07. Natomiast w strefie +2<sup>h</sup> jest godzina 22<sup>00</sup> przed północą dnia 9.07 itd. Wreszcie w strefie +12<sup>h</sup> jest godzina 12<sup>00</sup> w południe dnia 9.07.

Rozważania związane ze zmianą czasu a w konsekwencji i daty ściśle są związane np. z podróżowaniem z Azji do Ameryki. W celu podjęcia próby wyjaśnienia tego problemu posłużymy się następującym przykładem. Dwaj podróżni, z których jeden dotarł do południka L = 12<sup>h</sup> od zachodu a drugi od wschodu, datowali dzień odmiennie i różniliby się w rachubie daty o jeden dzień. Na południku tym zgodnie z zasadą czasu strefowego powinna, zatem nastąpić zmiana daty. Ustalono, że granica daty nie



Rys. 4. Podział Ziemi na 24 strefy czasowe.

biegnie ściśle wzdłuż południka  $L = 12^h$  ( $180^\circ$ ) lecz przebiega przez Ocean Spokojny nie przecinając wysp i lądów. Zmiany daty dokonuje się zazwyczaj o najbliższej północy – po przekroczeniu linii zmiany daty (rys. 5).

Z przedstawionego przykładu wynika, że dwa statki przepływają przez linię zmiany daty. Statek A płynący z Ameryki do Azji ma datę 9.07 – z tą datą wpłynął w obszar, gdzie trwa data 10.07. Za 12 godzin kończą się jednocześnie dwie daty: 9.07 i 10.07 na pokładzie statku, w obszarze, w który wpłynął statek. O północy zaczyna się w tym obszarze kolejny dzień 11.07. Na statku załoga dostosowuje się do daty obowiązującej. W dzienniku pokładowym stwierdzono, więc, że po 9.07 nastąpił 11.07. Jeden dzień to jest 10.07 został „zgrabiony”. Natomiast statek B płynący z Azji do Ameryki przekroczył linię zmiany daty mając na pokładzie 10.07 i wpłynął do strefy, w której obowiązuje 9.07. Za 12 godzin kończą się dwie daty: 10.07 na statku i 9.07 w strefie, do której wpłynął statek. W tym momencie w strefie zaczyna się data 10.07. Na statku załoga dostosowuje się do tej daty. W dzienniku pokładowym po 10.07 pojawia się 10.07 w strefie, do

której wpłynął statek. W takim przypadku dzień 10.07 jest dniem liczonym dwa razy.

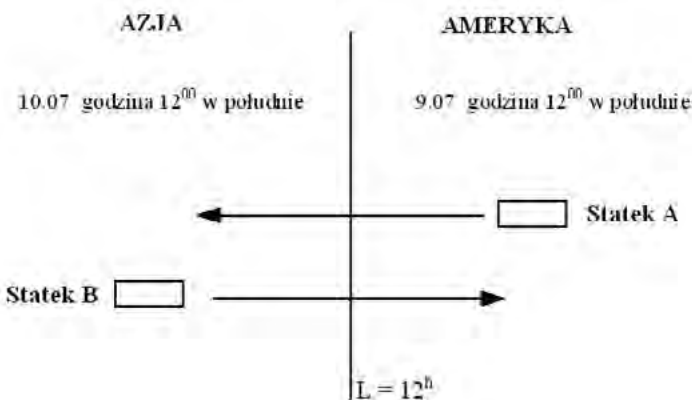
Ponadto za podstawę rachuby czasu może także posłużyć:

- ruch obiegowy Księżyca wokół Ziemi, który definiuje pojęcie miesiąca,
- ruch obiegowy Ziemi wokół Słońca, który definiuje pojęcie roku.

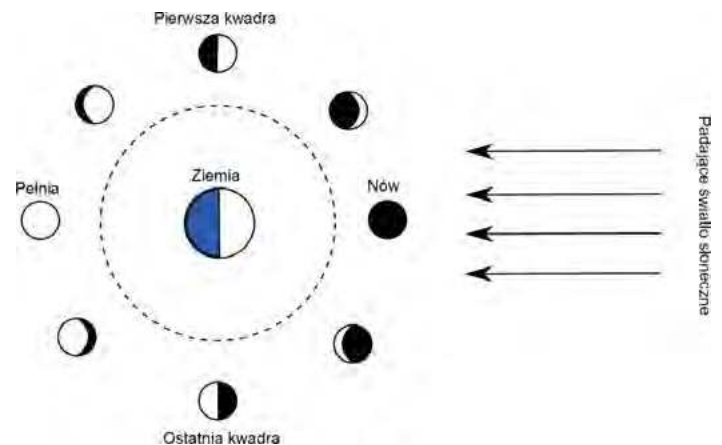
Poniżej przedstawiamy najważniejsze definicje terminów stosowanych w astronomii, które są konsekwencją rachuby czasu.

**Miesiąc synodyczny** – to czas pomiędzy dwiema występującymi po sobie tymi samymi fazami Księżyca (np. od nowiu do nowiu, od pełni do pełni, itp.). Średnia wartość tego czasu wynosi 29 dni 12 godzin 44 minuty i 3 sekundy (tj. 29,531 średniej doby słonecznej). Inaczej mówiąc miesiąc synodyczny określa różnicę pomiędzy długością ekliptyczną Słońca i Księżyca.

Poniżej przedstawiamy kilka fotografii tarczy Księżyca podczas różnych jego faz.



Rys.5. Przekraczanie linii zmiany daty.



Rys. 6. Fazy Księżyca



**Miesiąc gwiazdowy (syderyczny)** – to czas, w którym Księżyc obiegnie dokoła Ziemi i wróci do tego samego miejsca na niebie pośród gwiazd. Czas jego trwania wynosi 27 dni 7 godzin 43 minuty i 11.5 sekundy co oznacza, że jest on krótszy od miesiąca synodycznego średnio o około 2 dni.

**Miesiąc smoczy (drakoniczny)** – to średni czas, w którym Księżyc przechodzi przez dokładnie ten sam węzeł swojej orbity. Czas jego trwania jest równy 27 dni 5 godzin 5 minut i 35.9 sekundy co daje 27.212(2) dnia. Nazwa tego miesiąca odnosi się do mitycznego smoka, który zamieszkuje węzły orbity i pożera Księżyc lub Słońce w czasie zaćmień tych ciał niebieskich. Węzeł wstępujący, w którym znajduje się głowa smoka, określane jest jako *caput draconis*, a w węźle zstępujący usytuowany jest ogonem smoka *cauda draconis*. W tym miejscu wyjaśnimy, że węzły orbity Księżyca usytuowane są w punktach, w których przecina on płaszczyznę ekliptyki.

**Rok zwrotnikowy** – oznacza czas pomiędzy dwoma przejściami Słońca przez punkty równonocy wiosennej

(punkt Barana). Punkt Barana należy do jednego z dwóch punktów przecięcia ekliptyki z równikiem niebieskim. Inaczej mówiąc jest to czas rozpoczęcia astronomicznej wiosny na półkuli północnej. W obecnym – 2022 roku – rozpoczęcie astronomicznej wiosny miało miejsce 20 marca o godzinie 16:33. W tym miejscu warto zauważyć, że punkt Barana obecnie nie znajduje się w konstelacji Barana tylko w gwiazdozbiórze Ryb. Sytuacja ta jest konsekwencją precesji osi obrotu Ziemi, która co 25800 lat zatacza pełny okrąg. Precesja osi obrotu jest konsekwencją oddziaływania grawitacyjnego między Księżycem a Słońcem.

dr hab. Marcin Wesołowski, prof. UR

Uniwersytet Rzeszowski, Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych, Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy Techniczno-Przyrodniczej Uniwersytetu Rzeszowskiego.

**LITERATURA**

- [1] E. Rybka, 1970, *Astronomia ogólna*, PWN, Warszawa.
- [2] K. Borkowski, 1991, *Astronomiczne obliczenie nie tylko dla geografów*, UMK Toruń.
- [3] P. G. Kulikowski, 1976, *Poradnik miłośnika astronomii*, PWN, Warszawa.

**I. PRENUMERATĘ NA 2022 ROK MOŻNA ZAMÓWIĆ BEZPOŚREDNIO U WYDAWCY**

- **Przez internet:** zakładka *Prenumerata* na stronie [www.aspress.com.pl](http://www.aspress.com.pl) i wypełniając formularz zamówienia na podstronie prenumeraty
- **e-mailem:** [szewczyk24@gmail.com](mailto:szewczyk24@gmail.com) ■ **telefonicznie:** 606 201 244 ■ **listownie:** Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa

**Cena prenumeraty w 2022 roku**

Tytuł	Liczba wydań (I i II półrocze)	Cena egzemplarzowa	Cena prenumeraty rocznej	Cena prenumeraty w I półroczu
<b>Dwumiesięczniki</b>				
Chemia w Szkole	6 (3+3)	35,00	210,00	105,00
Geografia w Szkole	6 (3+3)	35,00	210,00	105,00
<b>Fizyka w Szkole z Astronomią</b>	<b>6 (3+3)</b>	<b>35,00</b>	<b>210,00</b>	<b>105,00</b>
Wiadomości Historyczne z WOS	6 (3+3)	35,00	210,00	105,00

**II. PRENUMERATA DOSTARCZANA PRZEZ FIRMY KOLPORTERSKIE:**

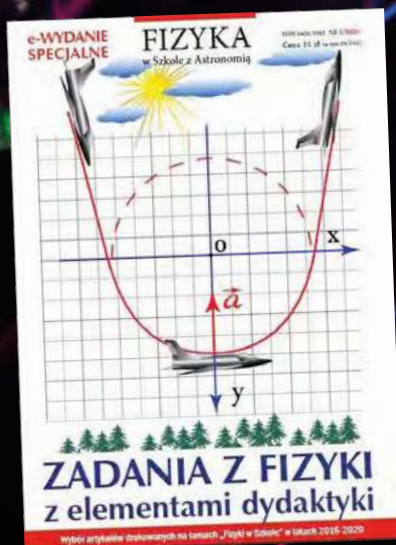
1. **RUCH** – zamówienia na prenumeratę w wersji papierowej i na e-wydania można składać bezpośrednio na stronie [www.prenumerata.ruch.com.pl](http://www.prenumerata.ruch.com.pl). Ewentualne pytania prosimy kierować na adres e-mail: [prenumerata@ruch.com.pl](mailto:prenumerata@ruch.com.pl) lub kontaktując się z Centrum Obsługi Klienta „RUCH” pod numerami: 22 693 70 00 lub 801 800 803 – czynne w dni robocze w godzinach 7.00–17.00. Koszt połączenia wg taryfy operatora.
2. **GARMOND PRESS** – tel. 22 836 69 21 [prenumerata.warszawa@garmondpress.pl](mailto:prenumerata.warszawa@garmondpress.pl).
3. **KOLPORTER S.A.** – prenumeratę instytucjonalną można zamawiać w oddziałach firmy. Informacje: [www.kolporter.com.pl](http://www.kolporter.com.pl).
4. **POCZTA POLSKA** – zamówienia we wszystkich urzędach pocztowych lub u listonoszy, drogą elektroniczną: [www.poczta-polska.pl](http://www.poczta-polska.pl). Infolinia w godz. 8.00–22.00: 801 333 444 (dla telefonów stacjonarnych) i 801 333 444 (dla telefonów komórkowych i z zagranicy).

**III. NUMERY ARCHIWALNE DRUKOWANE** dostępne są w ograniczonym zakresie. Przed złożeniem zamówienia prosimy o kontakt pod adresem: [szewczyk24@gmail.com](mailto:szewczyk24@gmail.com).

**Zamów prenumeratę przez Internet**  
[www.aspress.com.pl/prenumerata/](http://www.aspress.com.pl/prenumerata/)

# WYDANIA SPECJALNE „Fizyki w Szkole”

## Wersje elektroniczne – pliki PDF



Szczegóły i formularz zamówienia na [www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/](http://www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/)

eprasa.pl 2682b077bc

**Ile jest stanów skupienia?**

**Trzy, cztery, czy więcej?**

**Ciała stałe, ciecze, gazy...**

**A plazma, ciekłe kryształy,  
para wodna, ziemia?**



Wydanie specjalne  
– wybór artykułów  
z Fizyki w Szkole

**Tylko wersja  
cyfrowa!**

**Plik PDF**  
cena 20 zł

Szczegóły i formularz zamówienia – [www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/](http://www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/)

eprasa.pl 2682b077bc