

# FIZYKA

## w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

398 (LXV) indeks 35810X Nr 3 maj/czerwiec 2025 CENA 50,00 zł (z tym 8% VAT)

### Napęd wodorowy

Przyjazne środowisku źródło energii

Polaryzacja  
kołowa i eliptyczna

**TWIERDZENIE H**

**35 LAT TELESKOPU  
HUBBLE'A**

Zaćmienie Słońca 2025

**Zjeżdżalnie i kaczki**

Proste eksperymenty dydaktyczne

Spektroskopia jądrowa  
rezonansu magnetycznego

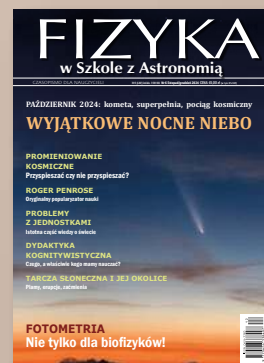


# Letni rabat do 80%!

## ROCZNIK 2024 6 wydań – 60 zł!

### PAKIET ARCHIWALNY 6 różnych wydań – 30 zł!

(w cenie są koszty wysyłki)  
(oferta ważna do wyczerpania zapasów)



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

eprasa.pl 4f21a3cd74

## Drodzy Czytelnicy!

**Z** olbrzymią przyjemnością przekazuję Państwu wakacyjny numer „Fizyki w Szkole”. Co prawda wakacje jako pora relaksu nie służą czytaniu poważnych lektur, ale może przynajmniej niektórymi artykułami uda się Państwa zainteresować. Polecamy zarówno poważny temat jakim jest spektroskopia jądrowa rezonansu magnetycznego autorstwa dr Tomasza Kubiaka, jak i z pozoru lżejszy, kontynuację tematyki „zabawek fizycznych” przez prof. Grzegorza Karwasza i Katarzynę Wyborską o zjeżdżalniach, ruskich górach i kroczących kaczkach.

Należy wspomnieć, że w momencie oddawania tego numeru do druku miało miejsce bardzo ważne wydarzenie jakim jest powrót Polaka w przestrzeń kosmiczną. Misja ta nie tylko ma służyć turystyce kosmicznej, ale też wykonaniu wielu interesujących eksperymentów.

Skoro mowa o kosmosie to warto zwrócić uwagę na jeszcze jedno wydarzenie. Jest nim częściowe zaćmienie Słońca. Zjawisko zaćmień Słońca jest jednym z najbardziej interesujących zjawisk astronomicznych. Możliwe jest ono do obserwowania z powierzchni ziemi. Ostatniemu obserwowanemu w Polsce jest poświęcony artykuł Marcina Wesołowskiego i współpracowników.

Co prawda obserwacje Kosmosu z powierzchni Ziemi przeważały w historii astronomii, to od 35 lat mamy możliwość dokonywania obserwacji kosmosu za pomocą narzędzi znajdujących się powyżej ziemskiej atmosfery – jest nim min opisany w artykule Krzysztofa Kowalczyka – Teleskop Hubble’a.

Wakacje to też proszę Państwa czas podróży. Oczywiście żeby podróżować potrzebne jest paliwo. Może można by paliwo wziąć z kosmosu. Pomyśl nie jest taki abstrakcyjny. Otóż kosmos w większości zbudowany jest z wodoru. Wodór w rezultacie spalania daje niezwykle ekologiczny materiał jakim jest woda, nie więc dziwnego, że od wielu lat trwają prace nad uczynieniem z wodoru nowoczesnej benzyny. Prace te ostatnio przynoszą coraz bardziej wymierne rezultaty. Tym problemom poświęcony jest artykuł Edwarda Rydygiera pt. „Napęd Wodorowy w transporcie”.

Kończąc życzę Państwu miłej lektury wszystkich artykułów i udanych wakacji w Szkole.

W imieniu redakcji

**Zbigniew Wiśniewski**



## Fizyka wczoraj, dziś, jutro

### 4 Od spektroskopii do obrazowania, czyli magnetyczny rezonans jądrowy w pigułce ■ Tomasz Kubiak

Spektroskopia jądrowego rezonansu magnetycznego to jedna z najpopularniejszych metod badawczych wykorzystywanych we współczesnej fizyce, biofizyce, chemii, biochemii oraz biologii molekularnej.

### 13 Napęd wodorowy w transporcie – aspekt poznawczy i edukacyjny ■ Edward Rydygier

Ciągle podejmowane są próby opracowania nowych, bardziej przyjaznych środowisku i ludziom źródeł energii. Jednym z nich może być paliwo wodorowe napędzające samochody i lokomotywy kolejowe.



### 20 Twierdzenie H ■ Maciej Panczykowski

### 22 Żyoty fizyków. James Clerk Maxwell (1831-1879) ■ Tadeusz Wibig

### 26 Polaryzacja kołowa i eliptyczna światła ■ Jan Kurzyk

Polaryzację kołową możemy uzyskać składając dwie fale o tych samych częstotliwościach i amplitudach, spolaryzowanych w kierunkach do siebie prostopadłych, ale przesuniętych względem siebie o  $\frac{1}{4}$  długości fali, czyli przesuniętych w fazie o  $90^\circ$  lub  $-90^\circ$ .

### 33 Rosalind Elsie Franklin. Kulisy odkrycia struktury DNA

■ Kazimierz Mikulski

## Z naszych lekcji

### 38 Zjeżdżalnie duże i małe ■ Grzegorz Karwasz, Katarzyna Wyborska

Zaczynamy od zabawy, zrozumiałej dla wszystkich, poprzez minimum dydaktyki, a kończymy na ujęciu uniwersyteckim, zgodnie z naszą zasadą 9:1 – nauczyciel powinien wiedzieć 9 razy więcej niż ma do nauczania studenta.



## Astronomia dla każdego

### 47 Teleskop Hubble’a – 35 lat na orbicie ■ Krzysztof Kowalczyk

24.04.2025 minęło 35 lat od wyniesienia na orbitę Kosmicznego Teleskopu Hubble’a, którego historia, szczególnie na początku, nie była łatwa.

### 48 Częściowe zaćmienie Słońca – astronomiczne wydarzenie wiosny 2025 roku

■ Marcin Wesołowski, Aleksandra Bis, Joanna Banaczyk

Po ponad dwuletniej przerwie ponownie byliśmy świadkami częściowego zaćmienia Słońca. Zjawisko to zaliczane jest do najbardziej spektakularnych zjawisk, które zachodzą w ciągu dnia na niebie.



**FIZYKA**  
w Szkole z Astronomią

NUMER 3 MAJ/CZERWIEC 2025  
398 (LXV) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 50,00 zł  
(w tym 8% VAT)

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.



## Od spektroskopii do obrazowania, czyli magnetyczny rezonans jądrowy w pigułce

Spektroskopia jądrowego rezonansu magnetycznego to jedna z najpopularniejszych metod badawczych wykorzystywanych we współczesnej fizyce, biofizyce, chemii, biochemii oraz biologii molekularnej. Chociaż bazuje na efekcie odkrytym już w 1945 roku przez dwa niezależne zespoły naukowców kierowane przez późniejszych noblistów Feliksa Blocha i Edwarda Purcella, wciąż jest intensywnie rozwijana, stanowiąc fundament wielu interdyscyplinarnych projektów naukowych.

Tomasz Kubiak

Analiza strukturalna, badanie dynamiki molekularnej, pomiary dyfuzji, mikroobrazowanie to tylko wybrane obszary z niezwykle szerokiego spektrum zastosowań spektroskopii NMR. Skrót ten pochodzi oczywiście od angielskiej nazwy obserwowanego zjawiska, czyli *Nuclear Magnetic Resonance*. Chociaż sama metoda jest stosunkowo skomplikowana, jej zasadniczą ideę można oddać jednym zdaniem. Mamy bowiem do czynienia z analizą oddziaływania fal elektromagnetycznych o częstotliwości radiowej z umieszczoną w zewnętrznym polu magnetycznym próbką, która zawiera atomy o niezerowym spinie jądrowym ( $I \neq 0$ ). Przykładem takiego atomu jest wodór  $^1\text{H}$ , posiadający  $I = \frac{1}{2}$ .

### Odrobina teorii

Poszczególne jądra atomowe charakteryzuje konkretna wartość współczynnika giromagnetycznego  $\gamma$ , będącego

stosunkiem jądrowego momentu magnetycznego  $\mu_I$  do spinu (własnego momentu pędu) jądra:

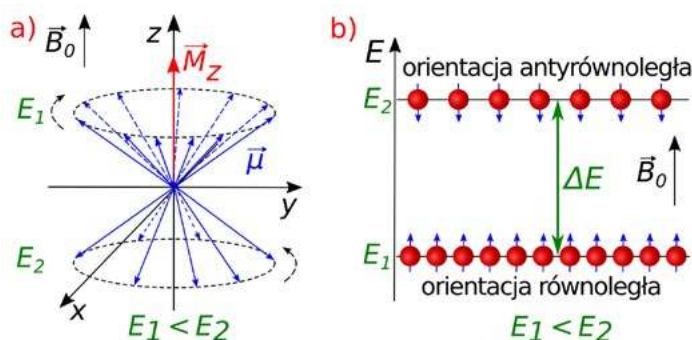
$$\mu_I = \gamma_I \hbar I$$

W zewnętrznym polu magnetycznym o indukcji  $B_0$  wektory momentu magnetycznego jąder wykonują ruch precesyjny z tzw. częstością Larmora<sup>1</sup>  $\omega_0$ :

$$\omega_0 = \gamma_I B_0$$

Dodajmy jeszcze, że w eksperymentach kierunkowi pola  $B_0$  przypisujemy zazwyczaj oś z laboratoryjnego, prostokątnego układu współrzędnych  $xyz$ , którego środek zlokalizowany jest w centrum elektromagnesu. Ze względu na fakt, że w makroskopowej próbce mieści się bardzo duża liczba jąder, do opisu warto wprowadzić także wektor magnetyzacji  $M$ , będący sumą momentów magnetycznych zgromadzonych w jednostce objętości. Jeśli na układ będzie działać jedynie  $B_0$  i wszystkie precesujące wektory  $\mu_I$  zrzutujemy na poszczególne osie układu współrzędnych, to ze względu na niezgodność faz wirujące

<sup>1</sup> Nazwa upamiętnia irlandzkiego fizyka Josepha Larmora, który opisał precesję momentu magnetycznego w 1897 r.



Rys. 1. a) Precesja jądrowych momentów magnetycznych  $\mu$  w zewnętrznym polu  $B_0$ . Wypadkowa magnetyzacja  $M_z$  ma kierunek osi z, gdyż składowe  $\mu_x$  i  $\mu_y$  znoszą się wzajemnie. b) Momenty magnetyczne jądra mogą ustawiać się równolegle (niższa energia) bądź antyrównolegle (wyższa energia) do pola.

w płaszczyźnie  $xy$  składowe  $\mu_x$  i  $\mu_y$  znoszą się wzajemnie. Wówczas wypadkowa magnetyzacja  $M_z$ , występująca tylko wzdłuż osi  $z$ , wywodzić się będzie od składowych  $\mu_z$ , równoległych do kierunku pola  $B_0$ . Sytuację zwizualizowaną na rys.1 a) można zatem podsumować następująco:  $M_x = 0$ ,  $M_y = 0$  oraz  $M_z = M_0$ , gdzie  $M_0$  to magnetyzacja w stanie ustalonym. Oczywiście proces orientowania dipoli  $\mu$  nie jest natychmiastowy, a ewolucję namagnesowania w czasie opisuje równanie:

$$\frac{dM_z(t)}{dt} = -\frac{M_z(t) - M_0}{T_1}$$

Występujący we wzorze parametr  $T_1$  to czas relaksacji podłużnej, charakteryzujący proces narastania lub zaniku składowej magnetyzacji wzdłuż osi  $z$ . Warto uświadomić sobie, iż zgodnie ze wzorem (iloczynem skalarnym):

$$E = -\vec{M}_0 \cdot \vec{B}_0 = -M_0 B_0 \cos(\angle \vec{M}_0, \vec{B}_0)$$

układ osiągnie najmniejszą energię, gdy wektor magnetyzacji będzie równoległy do kierunku  $B_0$ , gdyż  $\cos(0^\circ) = 1$ . Nadmiar energii od spinów przejmie wówczas tzw. sieć, stąd  $T_1$  nazywany jest również czasem relaksacji spin-sieć. Warto mieć na uwadze, że zgodnie z regułami mechaniki kwantowej przestrzenne orientacje momentu magnetycznego nie są dowolne. Rzut wektora  $\mu$  na kierunek pola magnetycznego (osi  $z$ ) przyjmować może bowiem tylko pewne dyskretne wartości. W najprostszym przypadku (jądro o spinie  $I = 1/2$ ) odpowiadają im dwa poziomy energetyczne. Dla  $\gamma > 0$  obsadzenie poziomu, który odpowiada orientacji równoległej do  $B_0$  (niższa energia) jest większe niż obsadzenie tego związanego z ustawieniem antyrównoległym (wyższa energia), co ilustruje rys. 1b).

Włączenie prostopadłego do  $B_0$ , oscylującego pola  $B_1$  o częstości równej lub bardzo zbliżonej do częstości Larmora zmieni orientację magnetyzacji i pozwoli zaobserwować zjawisko rezonansu jądrowego. Sam proces obracania wektora  $M$  wiąże się oczywiście z absorpcją energii wspomnianego przed chwilą pola  $B_1$ , które jest generowane przez cewkę.<sup>2</sup> Pojawienie się oraz późniejszy zanik w czasie poprzecznej magnetyzacji, którą możemy rozłożyć na składowe  $M_x$  i  $M_y$  określa następująca formuła:

$$\frac{dM_{x,y}}{dt} = -\frac{M_{x,y}}{T_2}$$

Występująca w niej wielkość  $T_2$  to czas relaksacji poprzecznej. Warto wspomnieć, iż inną jego nazwa, tj. czas relaksacji spin-spin, wywodzi się z podejścia statystycznego, które mówi o ustalaniu się równowagi w układzie spinów. W praktyce eksperymentalnej pole magnetyczne  $B_0$  nie jest idealnie jednorodne w obrębie próbki, stąd częstości Larmora dla poszczególnych spinów nieco się różnią a do opisu potrzebny jest nowy, krótszy czas relaksacji  $T_2^*$ , o czym będzie jeszcze mowa w dalszej części niniejszego artykułu.

Wielu naukowców uznaje, że w całej teorii jądrowego rezonansu magnetycznego najważniejszym wzorem jest właśnie opisujące precesję wektora  $M$  równanie Blocha.<sup>3</sup> Warto zatem przytoczyć je w całości:

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = \gamma(\vec{M} \times \vec{B}) - \hat{x} \frac{M_x}{T_2} - \hat{y} \frac{M_y}{T_2} - \hat{z} \frac{M_z - M_0}{T_1}$$

Dodajmy tylko, że  $\hat{x}$ ,  $\hat{y}$ ,  $\hat{z}$  to wersory (wektory jednostkowe) odpowiednio dla osi:  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

## Spektroskopia NMR

Warto uzmysłowić sobie, że w dużych centrach badawczych znajduje się po kilka a nawet kilkanaście nowoczesnych spektrometrów NMR wyposażonych w magnesy nadprzewodzące. Przykładowe urządzenia: 400 MHz (9,4 T) oraz 800 MHz (18,8 T) z laboratorium na uniwersytecie w Poznaniu przedstawiają odpowiednio fot. 1 i 2. Obecnie preferowane są przede wszystkim metody impulsowe. W ich przypadku badany obiekt umieszcza się w silnym zewnętrznym polu magnetycznym o indukcji  $B_0$ .

Jak już wiemy, poza rezonansem obserwujemy niekoherentny ruch precesyjny momentów magnetycznych, a jedyną niezerową składową magnetyzacji jest wówczas  $M_z$ . Jeśli dodatkowo posłużymy się pomocniczym układem odniesienia, który z prędkością kątową  $\omega_0$  wiruje wokół osi  $z$ , wektor magnetyzacji może zostać potraktowany jako nieruchomy. Zjawisko NMR jest wywołane działaniem na próbkę jednego lub kilku generowanych przez cewkę RF (od ang. *radio frequency*) krótkich impulsów pola  $B_1$ , oscylującego z częstotliwością rezonansową.<sup>4</sup>

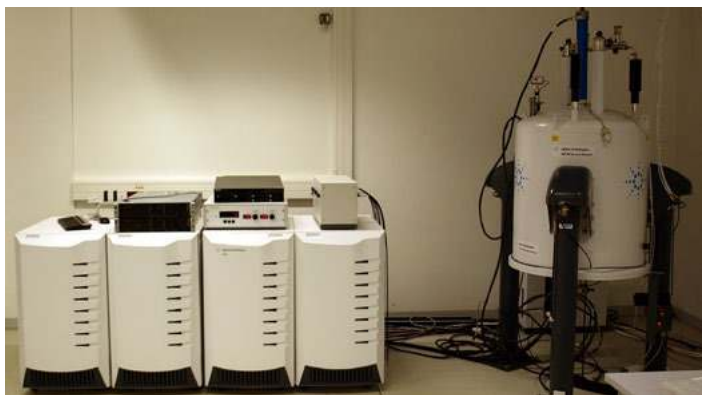
Zależnie od eksperymentu, obserwowany rezultat pomiarów stanowi sygnał swobodnej precesji FID (od ang. *Free Induction Decay*) albo echo spinowe. Aby zrozumieć ich powstawanie, warto przeanalizować na rys.2 działanie generowanych przez układ elektroniczny impulsów we wprowadzonym uprzednio układzie wirującym. Włączenie równoległego do osi  $x$  pola  $B_1$  sprawi, że składowa namagnesowania, poruszając się z prędkością kątową  $\omega_1$ , obróci się wokół jego kierunku o kąt:

$$\theta = \omega_1 t_i = \gamma \cdot B_1 \cdot t_i$$

<sup>2</sup> Zmienne pole  $B_1$  jest znacznie słabsze niż  $B_0$ , ale pozostaje w rezonansie z precesującym momentem magnetycznym.

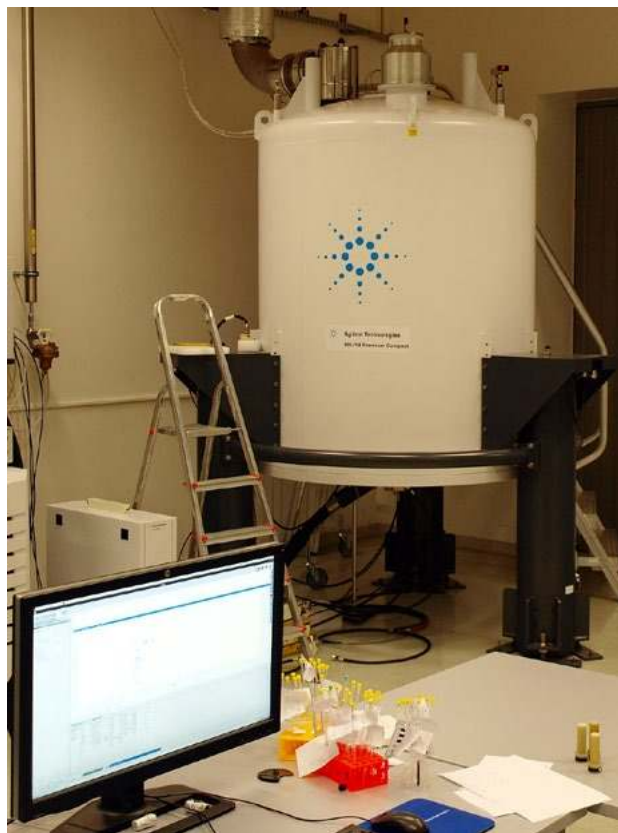
<sup>3</sup> Równanie to sformułował w 1946 r. szwajcarsko-amerykański fizyk Felix Bloch, laureat Nagrody Nobla z 1952 r.

<sup>4</sup> Pole  $B_1$  włączane jest w sposób kontrolowany, tzn. ustawia się amplitudę, fazę, długość oraz sekwencję impulsów.



Fot. 1. Spektrometr NMR 400 MHz z magnesem 9.4 T przeznaczony jest do badań fazy skondensowanej oraz cieczy w szerokim zakresie temperatur.

Zatem, jeśli czas impulsu  $t_i$  ustawimy na  $\frac{1}{4}$  okresu, przerzucimy wektor magnetyzacji o  $90^\circ$ , czyli z kierunku osi  $z$  na oś  $y$ , otrzymując  $M_y$ .<sup>5</sup> Po wyłączeniu pola  $B_1$  układ będzie stopniowo powracać do stanu równowagi. Składowa poprzecznego namagnesowania  $M_y$  zaniknie z czasem relaksacji  $T_2$ , a spektrometr zarejestruje wspomniany wcześniej sygnał swobodnej precesji FID. Powoli, tj. z czasem relaksacji  $T_1$  (spin – sieć), będzie także odrastać składowa  $M_z$ . Należy jednak pamiętać, iż na skutek niejednorodności pola  $B_0$ , wytwarzanego przez elektromagnesy rdzeniowe, składowa  $M_y$  rozłoży się na szereg wektorów, które mogą poruszać się w obu kierunkach (w podręcznikach akademickich napotykamy obrazowe określenie, że  $M_y$  „rozsypuje się w wachlarz”), co sprawia, iż sygnał zanika znacznie prędzej z czasem  $T_2^* < T_2$ . Dlatego do układu po czasie  $\tau$  od pierwszego impulsu przykładają się kolejny, tym razem  $\pi$ . Obraca on elementarne wektory na



Fot. 2. Spektrometr NMR 800 MHz z magnesem nadprzewodzącym o indukcji 18.8 T.

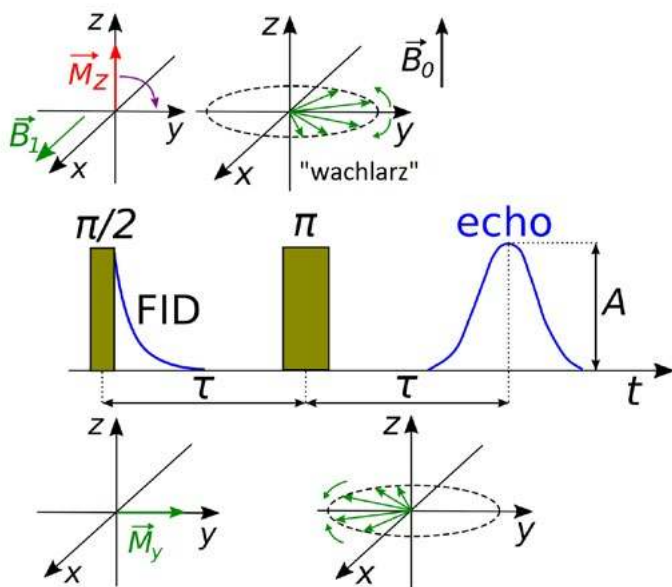
magnesowania o  $180^\circ$  wokół osi  $x$ , tak, że po czasie  $2\tau$  od  $\pi/2$  ponownie zejdą się na osi  $y$ . Spektrometr zarejestruje wówczas sygnał nazywany echem spinowym.<sup>6</sup> W przypadku wydłużania odstępu  $\tau$  między impulsami  $\pi/2$  a  $\pi$  w eksperymencie zaobserwujemy wykładnicze zmniejszanie się amplitudy echa z czasem  $T_2$ , co można opisać równaniem:

$$A = A_0 \exp\left(-\frac{\tau}{T_2}\right)$$

gdzie:  $A_0$  – amplituda po pierwszym impulsie,  $A$  – amplituda echa,  $\tau$  – interwał między impulsami.

Rys. 3 przedstawia rezultat tego typu eksperymentu dla próbki gliceryny. Wykres zależności amplitudy echa [j.u.] od odstępu  $\tau$  [ms] między impulsami  $\pi/2$  a  $\pi$  został stworzony na podstawie pomiaru amplitud echa Hahna dla kolejnych interwałów  $\tau$ . Po dopasowaniu odpowiedniej krzywej w programie komputerowym uzyskano wartość czasu relaksacji  $T_2$  dla gliceryny. Dla ciekawostki warto wspomnieć, że  $T_2$  można znaleźć jeszcze inną metodą, tzn. przy wykorzystaniu sekwencji Carra-Purcella, tj. nadawanej po impulsie  $\pi/2$  serii równoodległych w czasie impulsów  $\pi$ . Każdy z nich skutkuje wygenerowaniem kolejnego echa o malejącej amplitudzie.

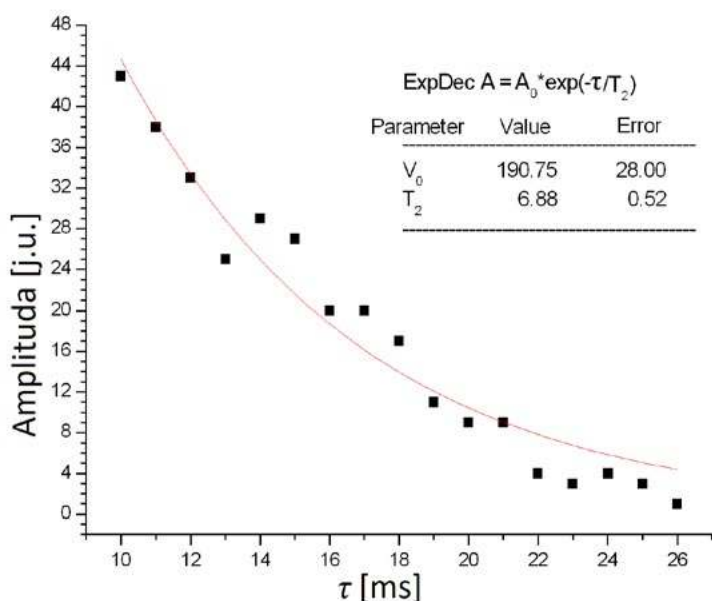
Do wyznaczenia czasu relaksacji  $T_1$  (spin-sieć) wykorzystuje się natomiast metodę odrostu namagnesowania po nasyceniu. Przydatna jest sekwencja:  $\pi/2-t-\pi/2-\tau-\pi$ . Początkowy impuls  $\pi/2$  przerzuca magnetyzację z osi  $z$  na oś  $y$ , kolejny  $\pi/2$  próbuje zrobić to samo, ale żeby zadziałał, skła-



Rys. 2. Sygnał FID i echo spinowe wywołane sekwencją impulsów  $\pi/2$  i  $\pi$ . Pokazano także poszczególne etapy ewolucji wektora magnetyzacji w wirującym układzie współrzędnych.

<sup>5</sup> Jeśli pole  $B_1$  wyłączylibyśmy po  $\frac{1}{2}$  okresu, wektor magnetyzacji zakreśliłby kąt  $180^\circ$ , dając składową  $-M_z$ .

<sup>6</sup> Sygnał nazywany jest również echem Hahna na cześć odkrywcy – amerykańskiego fizyka Erwina Hahna.



Rys. 3. Zależność wartości amplitudy echa spinowego od  $\tau$  wraz z dopasowaną krzywą dla próbki gliceryny.

dowa wzdłuż osi  $z$  musi chociaż częściowo odrosnąć, a to, przypomnijmy, dzieje się z czasem  $T_1$ . Impuls  $\pi$  wywoła zatem echo dopiero po określonym czasie  $t$ . Wydłużając go dostrzeżemy wykładniczy wzrost amplitudy echa, a obwiednia kolejnych sygnałów będzie spełniać równanie:

$$A = A_0 \left[ 1 - \exp\left(\frac{-t}{T_1}\right) \right]$$

Warto wspomnieć, że  $T_1$  można znaleźć również metodą odrostu namagnesowania po inwersji. Nazwa bierze się z faktu, że pierwszym impulsem jest  $\pi$ , obracający wektor namagnesowania o  $180^\circ$  (czyli  $-M_z$ ) a dopiero później przykładana jest sekwencja czytająca  $\pi/2 - \tau - \pi$ . W tym przypadku również bada się zależność amplitudy echa  $A$  od czasu  $t$ :

$$A = A_0 \left[ 1 - 2 \exp\left(\frac{-t}{T_1}\right) \right]$$

Zainteresowanym szczegółami w/w. metod impulsowych polecam książki przytoczone w wykazie literatury.

Współcześnie zdecydowanie mniej popularną techniką rejestracji widm NMR jest spektroskopia fali ciągłej CW (od ang. *continuous wave*). W jej przypadku w sposób ciągły zmienia się częstotliwość fal radiowych przy zachowaniu stałego pola magnetycznego albo odwrotnie, tzn. wspomniana częstotliwość pozostaje stała, ale przemienia się polem magnetycznym. Tego typu pomiary w najprostszym przypadku pomagają zidentyfikować jądra wchodzące w skład badanego związku. Przy znajomości pola magnetycznego oraz częstości rezonansowej można bowiem łatwo obliczyć współczynniki  $\gamma$  dla kolejnych linii

NMR i porównać je z wartościami tablicowymi. W przypadku próbek ciekłych często analizuje się także przesunięcie chemiczne, sprzężenie spin-spin oraz oddziaływania dipolowe.

### Przesunięcie chemiczne

Protony w badanej próbce są zazwyczaj otoczone różnymi atomami (np. węgla, azotu czy tlenu), budującymi cząsteczki. Obserwowane widmo nie stanowi zatem pojedynczego sygnału o częstotliwości rezonansowej  $\nu_{pr}$ , tylko jest zbiorem kilku linii, pochodzących od poszczególnych grup funkcyjnych, np.  $\text{NH}_2$  czy  $\text{CH}_3$ . Protony w zależności od usytuowania są bowiem ekranowane przez elektrony otaczających jądro atomów a tym samym odczuwają lokalne pole magnetyczne nieco inne niż  $B_0$ .

$$\omega = \gamma B_0 (1 - \delta)$$

Przesunięcie chemiczne  $\delta$  to właśnie różnica w położeniu linii rezonansowych odpowiadającym konkretnym otoczeniom. Aby uniezależnić jego wielkość od wartości przyłożonego pola  $B_0$ , dokonuje się normalizacji względem częstości rezonansowej wzorca:

$$\delta = \frac{\nu_{pr} - \nu_{wz}}{\nu_{wz}} \times 10^6$$

gdzie:  $\nu_{pr}$  i  $\nu_w$  to częstotliwości rezonansowe zmierzone odpowiednio dla próbki oraz wzorca. Tym ostatnim jest zazwyczaj metaloorganiczny związek TMS, czyli tetrametylosilan o wzorze sumarycznym  $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$ . Warto jeszcze dodać, że wartość przesunięcia chemicznego wyraża się w ppm (czyli part per million) a wielkość tę wyznaczamy nie tylko dla  $^1\text{H}$  ale także dla  $^{13}\text{C}$ ,  $^{15}\text{N}$ ,  $^{17}\text{O}$  czy  $^{19}\text{F}$ . Ponadto, jeśli zastosujemy spektrometr charakteryzujący się wysoką zdolnością rozdzielczą, okaże się, że linie od protonów w poszczególnych grupach są w rzeczywistości złożone z szeregu składowych o różnych amplitudach.

Przyczyną występowania tej tzw. struktury subtelnej jest wpływ pola magnetycznego pochodzącego od momentów jądrowych innych grup. Dla przykładu widmo alkoholu etylowego  $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$  w wyniku przesunięcia chemicznego (ekranowania przez elektrony poszczególnych grup) będzie składało się z trzech odrębnych składowych od  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  i  $\text{OH}$ , przy czym każda z nich będzie dodatkowo rozszczepiona na kilka linii właśnie pod wpływem obecności protonów z sąsiednich grup.<sup>7</sup>

Analiza zarejestrowanych sygnałów NMR dostarcza cennych informacji o budowie cząsteczki, należy jednak podkreślić, iż dla dużych molekuł otrzymane widma mogą być bardzo skomplikowane. Trzeba jeszcze koniecznie dodać, że przesunięcie chemiczne obserwuje się dla cieczy, w których oddziaływanie dipolowe uśrednia się do zera na skutek szybkich ruchów cząsteczek. Niestety, w ciałach stałych  $\delta$  jest przesłonięte przez efekt silnych oddziaływań dipolowych, które są odpowiedzialne za poszerzenie linii NMR.

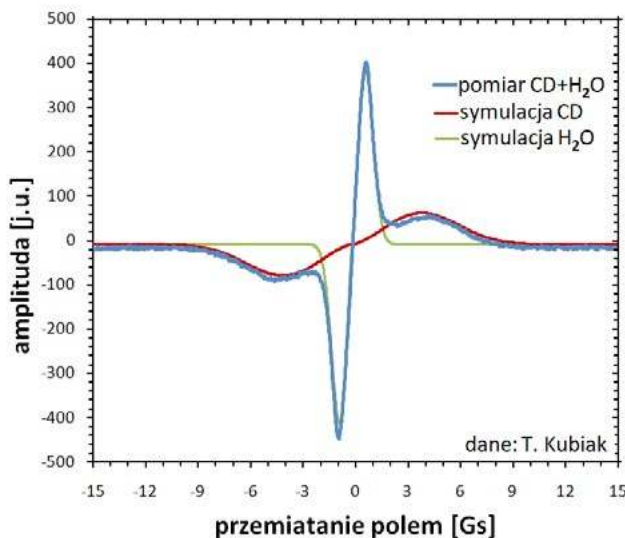
<sup>7</sup> Protony z grupy  $\text{CH}_2$  odczuwają wpływ trzech spinów jądrowych z grupy  $\text{CH}_3$ . Te ostatnie mogą ustawić się na osiem różnych sposobów, dających jednak tylko cztery wartości wypadkowe. W widmie grupy  $\text{CH}_2$  mamy zatem 4 linie o stosunku amplitud 1:3:3:1. Z kolei widmo grupy  $\text{CH}_3$  składa się z 3 komponentów o stosunku amplitud 1:2:1, co wynika z wpływu ustawienia dwóch protonów z  $\text{CH}_2$ .

## NMR w eksperymentach

Po zapoznaniu się z podstawami teoretycznymi spektroskopii NMR warto prześledzić jej przykładowe zastosowania w biofizyce. Z racji ogromnej popularności tej metody badawczej w laboratoriach na całym świecie, nie sposób wymienić nawet niewielkiej części ciekawych eksperymentów przeprowadzonych dotychczas przez naukowców. Autor niniejszego tekstu ograniczy się zatem do wspomnienia pomiarów, jakie kiedyś sam miał okazję wykonać.

Pierwszy z nich umożliwił zbadanie procesu dehydratacji i rehydratacji  $\beta$ -cyklodekstryny, czyli cyklicznego oligosacharydu złożonego z 7 podjednostek glukopiranozy. Warto nadmienić, iż cyklodekstryna posiada kształt ściętego, wydrążonego w środku stożka. Na zewnątrz jest hydrofilowa (tzn. „lubi” wodę), natomiast w środku pozostaje hydrofobowa. Taka budowa otwiera jej szerokie możliwości zastosowań w przemyśle farmaceutycznym oraz spożywczym. Leki oraz substancje słabo rozpuszczalne w  $H_2O$  zamykane są właśnie we wnętrzu struktury. Mówimy wówczas o kompleksie typu gość-gospodarz. Spektrometr NMR fali ciągłej, pracujący przy częstotliwości 27 MHz oraz układ kontroli temperatury, pozwolił prześledzić proces oddawania cząsteczek wody przez ogrzewaną ciepłym powietrzem, początkowo uwodnioną  $\beta$ -cyklodekstrynę.<sup>8</sup> Rys. 4 przedstawia charakterystyczny sygnał NMR od takiej próbki.<sup>9</sup> Widać wyraźnie, że składa się on z dwóch składowych, czyli szerokiej linii, pochodzącej od  $^1H$  z cyklodekstryny oraz wąskiego komponentu od  $^1H$  z wody.

Pole powierzchni pod krzywą absorpcji (intensywność integralna sygnału NMR) jest proporcjonalne do liczby



Rys. 4. Widmo NMR uwodnionej cyklodekstryny w temperaturze 23°C składa się z szerokiej linii od  $^1H$  z cyklodekstryny (CD) oraz wąskiego komponentu od  $^1H$  z  $H_2O$ . Symulacje komputerowe pozwoliły na dopasowanie krzywych do wyniku eksperymentalnego.

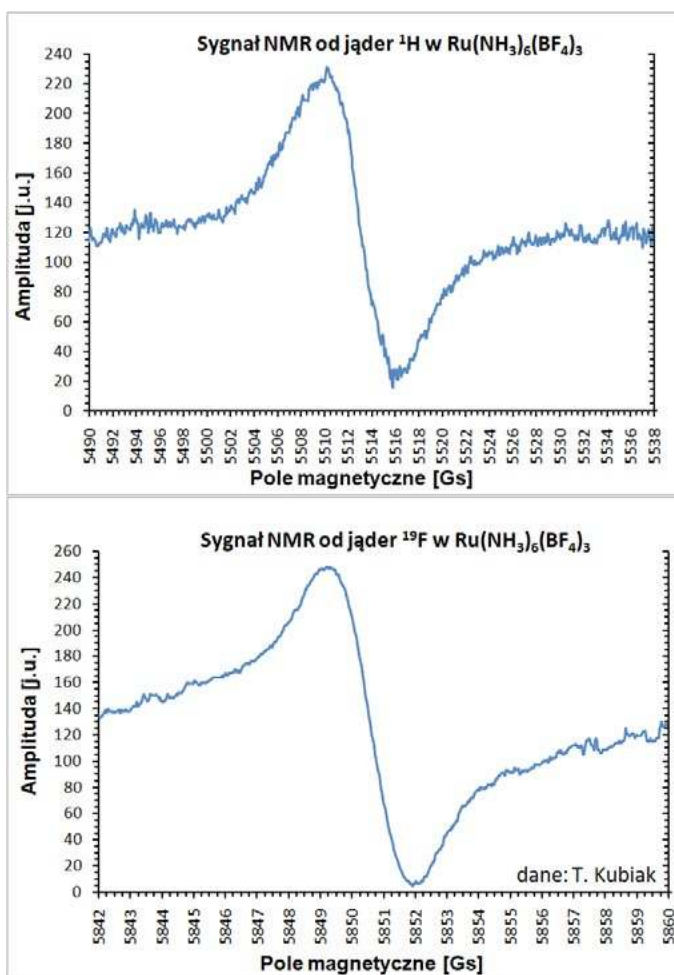
<sup>8</sup> W temperaturze pokojowej cyklodekstryna tworzy hydraty  $C_{42}H_{70}O_{35} \cdot nH_2O$ , ale liczba  $n$  molekuł wody maleje wraz ze wzrostem temperatury.

<sup>9</sup> Przedstawione na rys. 4 widmo NMR fali ciągłej ma postać pierwszej pochodnej sygnału absorpcji w wyniku zastosowania podwójnej modulacji pola magnetycznego. W takim przypadku działające na próbkę, liniowo zmieniające się w czasie pole magnetyczne jest dodatkowo modulowane z częstotliwością  $f_m$ , a sygnał zarejestrowany na diodzie detekcyjnej po odpowiednim wzmacnieniu poddawany detekcji synchronicznej.

<sup>10</sup> Sygnał NMR od pojedynczej cząsteczki wody pochodzi od dwóch  $^1H$ , natomiast sygnał od  $\beta$ -cyklodekstryny od 70 jąder wodoru zawartych w 7 jednostkach glukopiranozy.

rezonujących jąder, stąd można obliczyć, ile cząsteczek wody w danej temperaturze przypada na jedną cyklodekstrynę.<sup>10</sup> Co ciekawe, po stopniowym ogrzaniu próbki do temperatury 163°C w widmie NMR nie zaobserwowano już wąskiej składowej, co świadczy o całkowitej dehydratacji cyklodekstryny. Natomiast po schłodzeniu cykliczny oligosacharyd ponownie zaczął absorbować wodę z otoczenia i komponent od  $H_2O$  znowu odrastał wraz z postępującym procesem rehydratacji.

Drugie z przykładowych doświadczeń NMR dotyczyło związku  $Ru(NH_3)_6(BF_4)_3$ , będącego kompleksem heksaamminerutenu, który testowano w związku z potencjalnym wykorzystaniem do produkcji leków przeciwnowotworowych. Badania pomogły m.in. w optymalizacji kształtu cząsteczek oraz obliczeniu odległości międzyatomowych. Sygnały NMR, zarejestrowane w temp. -187°C metodą fali ciągłej, pochodziły zarówno od  $^1H$  ( $I = 1/2$ ,  $\gamma = 2,6752 \cdot 10^8 T^{-1}s^{-1}$ ) jak i  $^{19}F$  ( $I = 1/2$ ,  $\gamma = 2,5181 \cdot 10^8 T^{-1}s^{-1}$ ). Przedstawiono je na rys. 5. Do analizy tego typu linii



Rys. 5. Widma NMR związku  $Ru(NH_3)_6(BF_4)_3$  zarejestrowane dla  $^1H$  oraz  $^{19}F$  metodą fali ciągłej w temp. -187°C.

naukowcy wykorzystują metodę momentów Van Vlecka.<sup>11</sup> Jest ona przydatna, np. gdy mamy do czynienia ze sproszkowaną substancją, charakteryzującą się widmem NMR, które stanowi złożenie dużej liczby sygnałów, pochodzących od mikrokryształów odmiennie zorientowanych względem pola  $B_0$ . Nawet dwa izolowane protony mogą bowiem oddziaływać dipolowo, powodując poszerzenie rejestrowanej linii a co dopiero, gdy mamy do czynienia z grupami większej liczby jąder. W takich przypadkach standardowe metody mechaniki kwantowej często nie okazują się przydatne, a analizę wyników pomiarów ułatwia właśnie metoda momentów, zaproponowana przez Van Vlecka.

Drugi moment  $M_2$ , wyrażony w jednostkach pola, można obliczyć na podstawie zarejestrowanej pochodnej krzywej absorpcyjnej:

$$M_2 = \frac{1}{3} \frac{\int_0^\infty f'(B)(B - B_0)^3 dB}{\int_0^\infty f'(B)(B - B_0) dB}$$

gdzie:  $B_0$  – wartość indukcji pola magnetycznego w centrum linii rezonansowej NMR,  $f(B)$  – funkcja kształtu krzywej absorpcyjnej,  $f'(B) = df(B)/dB$ . Powyższy wzór zapewne wydaje się czytelnikom skomplikowany ze względu na pojawiające się w nim całki. Dlatego, z pewnym przybliżeniem, można ułatwić sobie zadanie i posłużyć się metodą graficzną, dzieląc powierzchnię pod zarejestrowaną linią na  $2n$  pasków o szerokości  $\Delta B$ . Wówczas, jeśli przez  $h_i$  oznaczymy wysokość  $i$ -tego paska a przez  $b_i$  odległość jego środka od  $B_0$ , to przydatne okaże się uproszczone równanie:

$$M_2 = \frac{1}{3} \frac{\sum h_i b_i^3}{\sum h_i b_i}$$

W tym miejscu warto jeszcze raz przypomnieć cel wyznaczania  $M_2$ . Otóż drugi moment jest odwrotnie proporcjonalny do szóstej potęgi odległości międzyjądrowych. Zatem wyznaczając jego wartość dla wybranego ciała stałego jesteśmy w stanie uzyskać informacje o dystansie między atomami, czyli poznać strukturę wewnętrzną testowanego związku. Ponadto skokowa zmiana drugiego momentu może odzwierciedlać zajście strukturalnego przejścia fazowego.

## Dwuwymiarowa spektroskopia NMR

Doświadczenia z wykorzystaniem spektroskopii magnetycznego rezonansu jądrowego, w których otrzymuje się widma dwuwymiarowe, pozwalają uzyskać cenne informacje o wzajemnych interakcjach jednego bądź kilku rodzajów jąder obecnych w pojedynczej makrocząsteczce

ce bądź zawartych w różnych molekułach w badanym roztworze. Przykładowo, na podstawie sygnałów NMR od białek można badać odpowiedzialne za poszerzenie linii rezonansowej oddziaływania dipolowe (występujące pomiędzy dwoma dipolami magnetycznymi) a także oddziaływania wymienne. Te ostatnie zachodzą za pośrednictwem wiązań chemicznych cząsteczki i znajdują odzwierciedlenie w występowaniu multipletu, czyli rozszczepionych linii.

Warto dodać, iż dwuwymiarowa spektroskopia NMR została zaproponowana przez belgijskiego fizyko-chemika Jeana Jeenera w 1971 r. Technika ma charakter impulsowy, a eksperyment podzielony jest na cztery etapy. W pierwszym z nich następuje wyprowadzenie jąder ze stanu równowagi termodynamicznej, np. poprzez zastosowanie pojedynczego nieselektywnego impulsu  $\pi/2$ . Wzbudza on spiny i sprawia, że zaczynają precesję.

W kolejnym etapie mamy do czynienia z ewolucją układu spinowego pod wpływem oddziaływań wewnątrz- i międzycząsteczkowych. Warto uzmysłowić sobie, iż ze względu na krótkotrwałość tej fazy nie dochodzi w niej do pełnej relaksacji układu. W kolejnej części doświadczenia, nazywanej etapem mieszania, rejestruje się korelacje pomiędzy różnymi jądrami atomowymi. W ostatniej, czwartej fazie następuje detekcja sygnału swobodnej precesji. Jest on zależny od dwóch czasów: ewolucji  $t_1$  oraz detekcji  $t_2$ . Sygnał  $F(t_1, t_2)$ , będący funkcją dwóch zmiennych, może zostać przeniesiony z domeny czasu w domenę częstości  $W(\omega_1, \omega_2)$  dzięki zastosowaniu dwuwymiarowej transformacji Fouriera<sup>12</sup>:

$$W(\omega_1, \omega_2) = \iint F(t_1, t_2) \exp(-i\omega_1 t_1) \exp(-i\omega_2 t_2) dt_1 dt_2$$

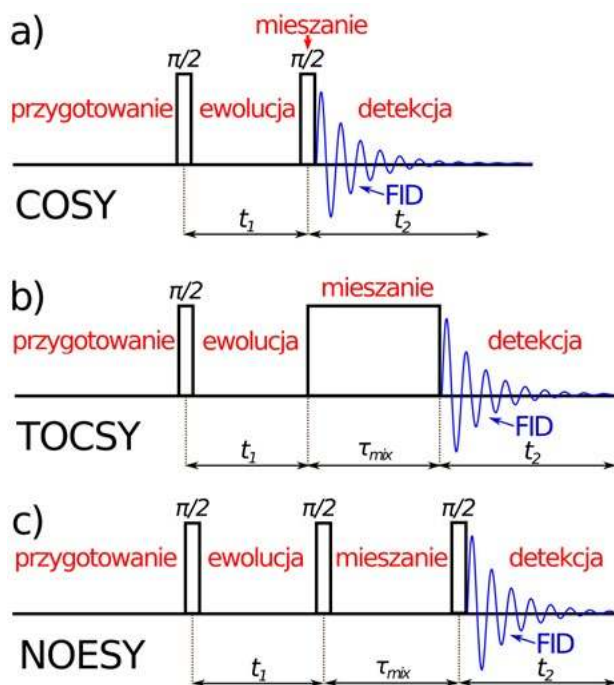
Widmo dwuwymiarowe  $W(\omega_1, \omega_2)$ , przedstawione na wykresie konturowym, składa się z pików rezonansowych leżących na przekątnej i odpowiadających widmu jednowymiarowemu (linie od niesprzężonych protonów) oraz pików bocznych, które położone są po obu stronach diagonalu i opisują korelacje między oddziałującymi jądrami. Częstości prezentowane na osi  $\omega_1$  charakteryzują linie wywodzące się od protonów sprzężonych oddziaływaniem wymiennym, a częstości odłożone na osi  $\omega_2$  związane są z sygnałami, na jakich uwidaczniają się efekty występowania oddziaływania dipolowego. Mamy zatem korelacje częstości precesji spinów w czasie ewolucji i detekcji.

W dwuwymiarowej spektroskopii NMR wyróżniamy kilka podstawowych typów doświadczeń, które cechują się odmiennym sposobem wzbudzania próbek oraz rodzajem uzyskiwanych danych. Warto przyjrzeć się im nieco bliżej. Najbardziej znany, a zarazem niezwykle użyteczny wciąż pozostaje eksperyment **COSY** (od ang. *Correlation Spectroscopy*). Wykorzystuje on sekwencję przedstawioną na rys. 6a. Wyróżniamy etap przygotowania<sup>13</sup> zakończony impulsem  $\pi/2$  oraz następujący po nim czas

<sup>11</sup> John Hasbrouck van Vleck był amerykańskim fizykiem, laureatem Nagrody Nobla w 1977 r. za „fundamentalne badania teoretyczne struktury elektronowej układów magnetycznych i nieuporządkowanych”.

<sup>12</sup> Więcej o transformacji Fouriera dowiedzieć się można z artykułu: T. Kubiak, Sygnały i obrazy, czyli fizyka w przetwarzaniu i analizie danych biomedycznych, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 3 (2020), s. 4-12.

<sup>13</sup> Przed podaniem pierwszego impulsu  $\pi/2$  spiny uzyskują równowagę termodynamiczną w zewnętrznym polu  $B_0$ .



Rys. 6. Sekwencje impulsowe dla najpopularniejszych eksperymentów dwuwymiarowej spektroskopii jądrowego rezonansu magnetycznego: a) COSY, b) TOCSY oraz c) NOESY.

ewolucji  $t_1$ , w którym nie podaje się żadnych radioimpulsów. Następnie mamy etap mieszania, pokrywający się z czasem drugiego impulsu  $\pi/2$  i poprzedzający detekcję sygnału, próbkowanego w czasie  $t_2$ . Warto dodać, że oba  $\pi/2$  są nieselektywne (tzn. w taki sam sposób oddziałują na badane jądra) oraz trwają o wiele krócej niż czasy  $t_1$  i  $t_2$ .

Pełne widmo dwuwymiarowe uzyskuje się po wykonaniu wielu eksperymentów dla różnych wartości  $t_1$ . Analiza wyników pozwala wyznaczyć stałe sprzężenia spin-spin pomiędzy sąsiadującymi jądrami.  $^1\text{H} - ^1\text{H}$  COSY uwiadczenia korelacje między protonami, np. dotyczące oddziaływań jąder wodoru z łańcucha szkieletowego białka. Oczywiście widma można zarejestrować także dla innych aktywnych magnetycznie oraz stabilnych izotopów, np.  $^{19}\text{F}$  czy  $^{31}\text{P}$ , a sam eksperyment COSY posiada wiele odmian, różniących się nieco sekwencją impulsową.

**Eksperyment TOCSY** (od ang. *Total Correlation Spectroscopy*) umożliwia zbadanie sprzężeń pomiędzy wszystkimi spinami obecnymi w układzie, czyli nawet dla atomów oddalonych o większą liczbę wiązań kowalencyjnych. Jest to przydatne m.in. podczas identyfikacji protonów w pierścieniach cukrowych lub w aminokwasach. Analizując zaprezentowaną na rys. 6b) sekwencję TOCSY, należy zwrócić uwagę, iż w jej przypadku etap mieszania jest dłuższy (np. dla białek może wynosić  $\approx 70$  ms) i przez cały jego czas próbka pozostaje pod działaniem silnego pola  $B_1$ , będącego złożeniem szeregu impulsów  $\pi/2$  i  $\pi$ .

Z punktu widzenia biofizyki oraz badania struktury białek niezwykle istotna jest technika **NOESY** (od ang. *Nuclear Overhauser Effect Spectroscopy*), gdyż pozwala

ona wyznaczyć odległości międzyatomowe. Jak sama nazwa wskazuje metoda ta wykorzystuje jądrowy efekt Overhausera. Sekwencja pomiarowa (rys. 6c) złożona jest z trzech impulsów  $\pi/2$ . Pierwszy z nich wzbudza spiny, kończąc etap przygotowania. Pomiedzy drugim a trzecim impulsem  $\pi/2$  zachodzi etap mieszania, stanowiący interwał czasowy o długości  $\tau_{\text{mix}} = 20\text{--}400$  ms. Amplituda rejestrowanych w eksperymencie pików odzwierciedla procesy cross-relaksacyjne wywoływane oddziaływaniami dipolowymi. Analiza wyników dostarcza więc informacji o sąsiadujących jądrami, które są sprzężone właśnie tym oddziaływaniem. Odległość  $r$  pomiędzy dwoma, biorącymi udział w rezonansie jądrami wyznaczana jest na podstawie pomiaru wzrostu intensywności  $I_b$  bocznego pików obserwowanego przy wydłużaniu czasu mieszania  $\tau_{\text{mix}}$ :

$$I_b \approx \frac{\tau_c}{r^6} \tau_{\text{mix}}$$

Eksperyment powtarza się zatem dla kilku wartości  $\tau_{\text{mix}}$ . Występujący we wzorze czas korelacji  $\tau_c$ , dla białek jest najczęściej stosunkowo długi. Można go ustalić na podstawie znanych wcześniej odległości między jądrami przy założeniu, że nie różni się dla wszystkich reszt aminokwasowych.

Obecnie w laboratoriach fizycznych w celu zdobycia jak najszerszej informacji o układach molekularnych stosuje się szeroką gamę eksperymentów spektroskopii dwuwymiarowej. Oznacza się je odpowiednimi skrótowcami. Nie ma oczywiście sensu ich wszystkich wymieniać, warto jednak uświadomić sobie, iż nazwy poszczególnych technik mogą pochodzić zarówno od zjawisk fizycznych takich jak jądrowy efekt Overhausera (w przypadku NOESY), jak i otrzymywanych informacji np. korelacji między jądrami (jak w COSY).

## Tomografia magnetyczno-rezonansowa

Bez wątpienia niemal każdy z czytelników spotkał w swoim życiu osobę, która została skierowana przez lekarza na „rezonans magnetyczny”. Ta potoczna nazwa odnosi się do metody diagnostycznej, bazującej na zjawisku NMR. Warto przypomnieć, iż tomografii magnetyczno-rezonansowej, wykorzystywanej w medycynie do uzyskiwania szczegółowych obrazów ciała człowieka, w tym także tkanek miękkich, poświęcono osobny tekst w „Fizyce w Szkole”.<sup>14</sup>

Podstawy naukowe oraz rozwiązania techniczne aparatu MRI (od ang. *Magnetic Resonance Imaging*) przedstawili już w latach 70-tych XX w. amerykański chemik Paul Lauterbur oraz angielski fizyk Peter Mansfield (późniejsi laureaci Nagrody Nobla w dziedzinie fizjologii lub medycyny z 2003 roku). Możliwość rozpoznania na obrazie konkretnych struktur anatomicznych zawdzięczamy sygnałom od jąder wodoru, które pochodzą zarówno z cząsteczek  $\text{H}_2\text{O}$  zawartych w uwodnionych w różnym stopniu tkankach, jak i z trójglicerydów, wchodzących w skład tkanki tłuszczowej.

<sup>14</sup> T. Kubiak, Od protonów do diagnostyki, czyli obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 4 (2017), s. 4-9.

Oprócz gęstości protonów czynnikami różnicującymi poszczególne tkanki są także czasy relaksacji. Przy  $B_0 = 1\text{ T}$  czas  $T_1$ , mierzony dla protonów w ciele człowieka, zawiera się w zakresie 240 – 2500 ms, z kolei  $T_2$  wynosi 40-300 ms.<sup>15</sup> Należy jednak zaznaczyć, że wartości te mogą się zmieniać w przypadku tkanek objętych procesem chorobowym, np. nowotworem. Badania naukowe pokazały również, że czasy  $T_1$ , zmierzone dla zdrowych tkanek w temp. 37°C, znacząco wydłużały się wraz ze zwiększaniem natężenia pola magnetycznego. Przykładowo,  $T_1$  dla wątroby w polu  $B_0 = 1,5\text{ T}$  wynosił  $\approx 576\text{ ms}$ , a w  $B_0 = 3\text{ T}$  już  $\approx 812\text{ ms}$ .<sup>16</sup>

Co ciekawe, eksperymenty nie ujawniły podobnej reguły dla czasów relaksacji  $T_2$ . Warto dodać, iż w diagnostyce metodą MRI w celu lepszego różnicowania struktur anatomicznych, stosunkowo często wykorzystuje się środki kontrastowe, które, gromadząc się w określonych tkankach, zmieniają ich czasy relaksacji. Chociaż wciąż największą popularnością cieszą się podawane dożylnie paramagnetyczne związki gadolinu, które skracają  $T_1$ , co przekłada się na lokalne zwiększenie jasności obrazu (pozytywny środek kontrastowy), do użycia dopuszczone są też substancje zawierające superparamagnetyczne nanocząstki tlenku żelaza.<sup>17</sup> Te ostatnie skracają czas relaksacji poprzecznej  $T_2$ , są więc środkami negatywnymi, a widoczny efekt ich działania stanowi zacinienie fragmentu obrazu.

Cylindryczne skanery MRI, używane do rutynowej diagnostyki w placówkach służby zdrowia, wykorzystują pola magnetyczne o indukcji 1,5 T albo 3 T. Do niestandardowych procedur oraz badań naukowych służą natomiast wysokopolowe aparaty 7 T, które oferują znacznie wyższą rozdzielczość obrazowania. Generalnie silniejsze pole magnetyczne pozwala uzyskać lepszy stosunek sygnału do szumu oraz większą szybkość skanowania. Ta ostatnia kwestia jest o tyle istotna, że badanie może trwać nawet kilkadziesiąt minut a pacjent przez cały czas powinien leżeć nieruchomo wewnątrz urządzenia. Nie jest to dla niego przyjemne, nie tylko ze względu na duży hałas (minimalizowany przez nauszники ochronne bądź zatyczki do uszów)<sup>18</sup>, lecz również przez uczucie przebywania w tunelu.<sup>19</sup> Średnica otworu gantry wynosi bowiem tylko 60-70 cm a długość urządzenia to 130 cm – 270 cm.

Pojemna obudowa aparatu MRI kryje przede wszystkim zestawy cewek. W wypełnionym ciekłym helem ( $-270^\circ\text{C}$ ) kriostacie umieszczone są wykonane ze stopu niobu z tytanem (NbTi) magnesy nadprzewodzące, generujące pole  $B_0$  o wysokiej jednorodności przestrzennej oraz czasowej. Warto przypomnieć, że  $B_0$  skierowane jest

wzdłuż osi  $z$ , czyli równoległe do stołu, na którym leży pacjent. Współosiowo, ale na zewnątrz od cewek głównych elektromagnesu umiejscowione są natomiast uzwojenia odpowiedzialne za aktywne ekranowanie magnetyczne. Minimalizacja pola na zewnątrz skanera ma znaczenie, jeśli w pobliżu znajdują się wrażliwe na zakłócenia magnetyczne urządzenia elektroniczne, aparatura medyczna lub przebywają osoby z rozrusznikami serca. Trzy zestawy cewek gradientowych pozwalają z kolei modyfikować główne pole magnetyczne  $B_0$  w kierunkach  $x$ ,  $y$  i  $z$ .

Zastosowanie liniowych gradientów (30-80 mT/m) sprawia, że poszczególne momenty magnetyczne jąder znajdują się w odmiennym polu magnetycznym a tym samym charakteryzują się różną częstotliwością precesji. Umożliwia to przestrzenną lokalizację sygnałów NMR i przypisanie ich do konkretnych wokseli, czyli elementów objętościowych. Do obrazowania poszczególnych części ciała niezbędne są jeszcze specjalne cewki nadawczo-odbiorcze RF (ang. *radiofrequency coils*), które generują radio-impulsy  $B_1$  oraz rejestrują odpowiedź z wzbudzonych warstw.

Po umieszczeniu pacjenta na stole diagnosta wybiera odpowiedni zestaw cewek RF, umieszcza je tak, aby otaczały bądź przylegały do badanego miejsca, np. głowy, kończyny czy kręgosłupa. Wyróżniamy cewki powierzchniowe, macierzowe bądź objętościowe. Te ostatnie mają zazwyczaj cylindryczny kształt. Sygnał od protonów z wybranego obszaru anatomicznego zbierany jest w wielu kanałach, zazwyczaj 12-128, przy czym większa ich liczba skraca czas badania. Oczywiście sama procedura akwizycji obrazów i rekonstrukcji warstw tomograficznych, czyli dwuwymiarowych przekrojów poprzecznych ciała jest stosunkowo skomplikowana. Wykorzystywane mogą być metody Fourierowskie czy echa planarnego. Osoby zainteresowane poznaniem szczegółów odsyłam do pozycji książkowych wskazanych w bibliografii.

Wszystkich czytelników zachęcam natomiast, aby spojrzeć na rys. 7. Przedstawia on szczegółowe obrazy anatomiczne uzyskane metodą tomografii magnetyczno-rezonansowej. Już na pierwszy rzut oka widać, że pokazane przekroje wykonane w płaszczyźnie strzałkowej doskonale ukazują zarówno struktury kostne jak i tkanki miękkie. Na szczególną uwagę zasługuje fakt, że MRI stwarza najlepsze możliwości badania anatomii mózgu, bezapelacyjnie wygrywając w tym zakresie z tomografią rentgenowską, która pozostaje w pewnym stopniu fizycznie ograniczona przez dużą absorpcję promieniowania X przez kości czaszki.<sup>20</sup> Warto również wspomnieć, że zastosowania wciąż rozwijanej tomografii

<sup>15</sup> Dane na podstawie: M. Lakrimi, i inni, The principles and evolution of magnetic resonance imaging, Journal of Physics: Conference Series 286 (2011) 012016.

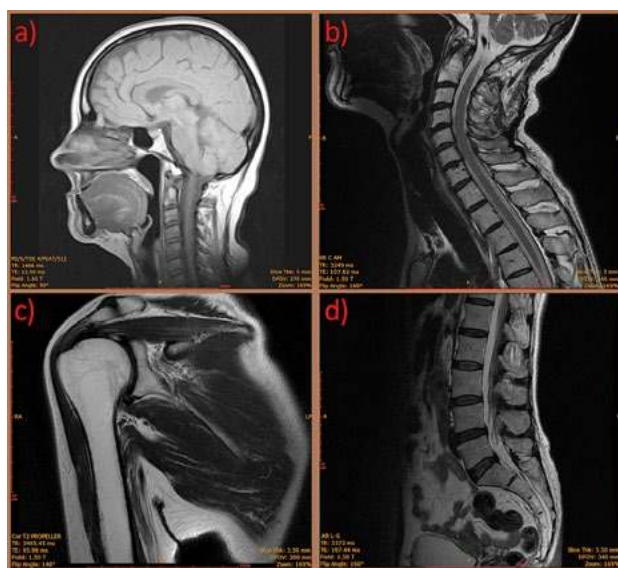
<sup>16</sup> Wartości czasów relaksacji zmierzone dla pól 1,5T oraz 3T dla różnych rodzajów tkanek można znaleźć w pracy G. J. Stanisz i inni, T1, T2 Relaxation and Magnetization Transfer in Tissue at 3T, Magnetic Resonance in Medicine 54, (2005), 507–512.

<sup>17</sup> Więcej informacji o zastosowaniach nanocząstek tlenku żelaza czytelnicy znajdą w tekście: T. Kubiak, Od nanocząstek do mikrokapsulek, czyli fizyczne rewolucje w medycynie, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 6 (2018), s. 4-8.

<sup>18</sup> O szkodliwości hałasu i sposobach minimalizowania jego wpływu na organizm przeczytać można w artykule: T. Kubiak, Biofizyka zmysłu słuchu i ochrona przed hałasem, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 2 (2021), s. 4-10.

<sup>19</sup> Jednym z przeciwwskazań do badania MRI jest klaustrofobia.

<sup>20</sup> Tomografii wykorzystującej promienie X poświęcono artykuł: T. Kubiak, Tomografia komputerowa, Fizyka w Szkole nr 1 (2014), s. 7- 10.



Rys. 7. Obrazy MRI przedstawiające: a) głowę; b) kręgosłup szyjny; c) staw ramienny prawy; d) kręgosłup lędźwiowy (wszystkie w płaszczyźnie strzałkowej).

magnetyczno-rezonansowej nie ograniczają się tylko do szczegółowej wizualizacji szczegółów anatomii człowieka. We współczesnej neuronauce ogromne znaczenie mają bowiem badania czynnościowe, wykorzystujące techniki tzw. funkcjonalnego rezonansu magnetycznego (fMRI).

### MRI w badaniach materiałowych

Chociaż obrazowanie metodą rezonansu magnetycznego kojarzy się przede wszystkim z diagnostyką medyczną, jest coraz powszechniej wykorzystywane w badaniach materiałowych. Zastosowanie gradientów pola magnetycznego umożliwia określenie rozkładu czasów relaksacji w próbce i uzyskanie jej przekrojów w różnych płaszczyznach. Jako przykład prostego eksperymentu, który znakomicie wykorzystuje potencjał techniki MRI, można podać badanie dynamiki wnikania wody do próbek różnych hydrofilowych kompozytów polimerowych, np. domieszkowanych hydrożeli. Odpowiedni dobór płaszczyzny wykonania skanów pozwala dokładnie zwymiarować rdzeń takiego, ulegającego hydratacji polimeru. Analiza wyników pomiarów, przeprowadzonych w ustalonych interwałach czasowych  $\Delta t$ , umożliwia określenie dynamiki przesuwania się frontu cieczy, a zatem średniokwadrato-

wego przesunięcia  $\langle z^2 \rangle$  jej cząsteczek, co z kolei pozwala wyznaczyć współczynniki dyfuzji translacyjnej  $D$  cząsteczek  $H_2O$  w testowanym materiale. Przydatny okazuje się tu wzór Einsteina – Smoluchowskiego:

$$\langle z^2 \rangle = 2D\Delta t$$

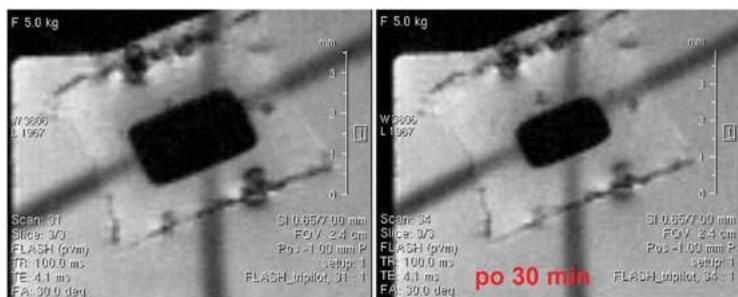
Skany przedstawione na rys. 8 ukazują pęcznienie kostki kompozytu polimerowego na skutek zwiększania się objętości warstwy żelowej otaczającej jego rdzeń. Widać, że wymiary rdzenia (czarny obszar) wyraźnie maleją z czasem. Uzyskanie takich obrazów możliwe było dzięki zastosowaniu spektrometru NMR 400 MHz z magnesem nadprzewodzącym wytwarzającym pole  $B = 9,4$  T oraz cewek gradientowych do mikroobrazowania. Dociekliwi czytelnicy na pewno zadadzą jeszcze pytanie, jaka sekwencja impulsowa znajduje zastosowanie w takim przypadku? Okazuje się, że odpowiednia jest standardowa sekwencja FLASH (*ang. Fast Low Angle Shot*), umożliwiającą pozyskanie obrazów  $T_1/T_2$  ważonych.

Wykorzystanie magnetycznego rezonansu jądrowego do obrazowania nie ogranicza się tylko do biofizyki i badania materiałów funkcjonalnych. Ta nieniszcząca technika okazuje się bowiem przydatna także m.in. w budownictwie czy geologii. Oczywiście szczególne zastosowanie ma w przypadku charakteryzowania materiałów porowatych. Pozwala wizualizować ich mikrostrukturę, ustalać rozmieszczenie, kształt, wielkość oraz połączenia porów. Co ciekawe, rozdzielczość przestrzenna takiego obrazowania może wynosić nawet  $17,6 \mu m$ .

Poznanie struktury porów a także ustalanie dynamiki przepływu cieczy w próbkach materiałów konstrukcyjnych takich, jak beton czy cegły, przyczynia się do lepszego określenia ich właściwości, np. izolacyjności, wytrzymałości, trwałości czy podatności na działanie wilgoci. Z kolei w przypadku analiz geologicznych badać można m.in. przepuszczalność skał, np. piaskowców czy wapieni. Należy spodziewać, iż MRI jako wciąż rozwijana technika, na pewno znajdować będzie coraz szersze spektrum zastosowań, nie tylko w medycynie i sektorze nauki, ale również w szeroko pojętym przemyśle.

dr Tomasz Kubiak

Wydział Fizyki i Astronomii UAM Poznań  
oraz Akademii Nauk Stosowanych im. H. Cegielskiego w Gnieźnie



Rys. 8. Zarejestrowane w odstępie 30 min obrazy MRI ukazujące zmniejszenie się wymiarów rdzenia kompozytu polimerowego na skutek pęcznienia otaczającej go warstwy żelowej, która nasycy się wodą.

### LITERATURA:

- [1] J. Stankowski, W. Hilczner, Wstęp do spektroskopii rezonansów magnetycznych, PWN, Warszawa, 2005, s. 11-29 i 62-87.
- [2] Y. Chen, MRI Applications and Research in Materials Science 1(5), (2024), 1-6.
- [3] J. Stankowski, W. Hilczner, Pierwszy krok ku radiospektroskopii rezonansów magnetycznych, OWN, Poznań, 1994, s. 7-53.
- [4] G. Ślósarek, Analiza strukturalna białek za pomocą spektroskopii NMR, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 2000, s. 117-148; 178-189.
- [5] J. W. Hennel, J. Klinowski, Podstawy magnetycznego rezonansu jądrowego, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 1997, s. 13-33.
- [6] A. Pajzderska i inni,  $^1H$  NMR study of rehydration/dehydration and water mobility in  $\beta$ -cyclodextrin, *Carbohydrate Research* 346(5), 2011, 659-663.
- [7] B. Gruber i inni, RF Coils: A practical guide for nonphysicists, *Journal of Magnetic Resonance Imaging* 48(3), 2018, 590-604.
- [8] N. Kuźnik, M. Wysokocka, Środki kontrastowe do obrazowania magnetyczno-rezonansowego na przykładzie związków kompleksowych żelaza, *Wiadomości chemiczne*, 67, 2013, 665-694.
- [9] W.S. Price, Pulsed-Field Gradient Nuclear Magnetic Resonance as a Tool for Studying Translational Diffusion: Part II. Experimental Aspects, Concepts in Magnetic Resonance 10(4) 1998, 197-237.



# Napęd wodorowy w transporcie

## – aspekt poznawczy i edukacyjny

Zasoby paliw kopalnych kurczą się, a ich wydobycie jest coraz droższe. Powszechne używanie paliw kopalnych (węgla, ropy naftowej, gazu ziemnego) w energetyce, przemyśle i transporcie doprowadziło do bardzo poważnych i niebezpiecznych zmian klimatu na całym globie. Aby ograniczyć destrukcyjny wpływ cywilizacji na naszą planetę, podejmowane są próby opracowania nowych, bardziej przyjaznych środowisku i ludziom źródeł energii. Jednym z nich może być paliwo wodorowe napędzające samochody i lokomotywy kolejowe.

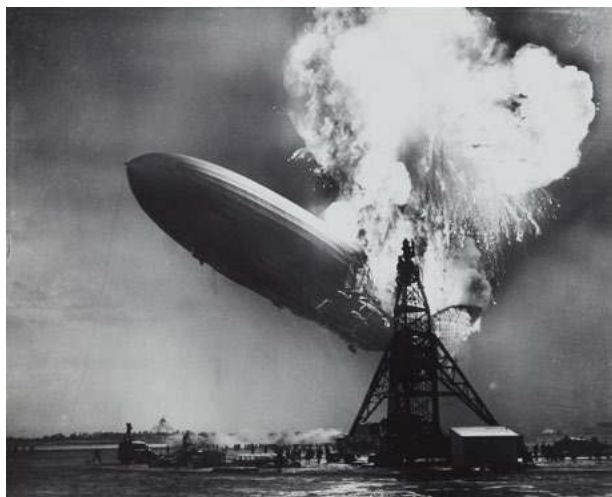
Edward Rydygier

### Pozyskiwanie wodoru

Wodór jest najbardziej rozpowszechnionym pierwiastkiem we Wszechświecie. Na Ziemi w stanie lotnym wodór występuje w śladowych ilościach, np. w gazie ziemnym, ale wchodzi w skład wielu związków chemicznych, takich jak woda, białko, cukry i węglowodory. Wodór jest gazem bez smaku, bezbarwnym i bezwonny. Sam nie jest palny ani wybuchowy, ale w połączeniu z tlenem daje niezwykle łatwopalną mieszaninę (zwaną nawet „mieszaną piorunującą”). Ponieważ wodór jest ponad 14-krotnie lżejszy od powietrza, zatem unosi się ponad ziemską atmosferą, co oznacza, że należy go pozyskiwać z powszechnie dostępnego źródła jakim jest woda (oblicza się, że całkowita objętość wody na Ziemi to ok. 1,386 mln km<sup>3</sup>).

Lotność wodoru wykorzystywano na początku XX wieku do napełniania sterowców i balonów. Znanym przykładem sterowca napełnionego wodorem jest niemiecki sterowiec pasażerski „Hindenburg”. Pierwotnie powłokę sterowca napełniono obojętnym i niepalnym hellem, lecz kiedy USA nałożyły na Niemcy embargo, sterowiec dostosowano do napełnienia wodorem. Miał długość 245 i średnicę 41 metrów, zawierał 200 000 m<sup>3</sup> wodoru w 16 zbiornikach. Napędzały go cztery silniki Diesla o mocy 1200 KM każdy. Osiągał prędkość maksymalną 135 km/godz.

„Hindenburg” uległ historycznej katastrofie na lotnisku Lakehurst w New Jersey 6 maja 1937 roku, gdzie podczas lądowania (cumowania) doszło do rozszczelnienia powłoki, a powstała mieszanina wodoru z powietrzem wywołała pożar. Sterowiec „Hindenburg” w podróż przez Atlantyk wystartował z Frankfurtu nad Menem z 97 osobami na pokładzie (36 pasażerów i 61 osób załogi), a podróż trwała 3 dni. W katastrofie zginęło 13 pasażerów i 22 członków załogi.



Rys. 1. Katastrofa „Hindenburga”. Źródło: Wikipedia

Na ostatnim Zjeździe Fizyków w Gdańsku we wrześniu 2023 roku aktywiści środowiska nauczycielskiego postulowali, aby nie ograniczać nauczania fizyki w szkole tylko do realizacji coraz bardziej redukowanej podstawy programowej, ale uzupełniać treści nauczania poprzez informacje o aktualnych nagrodach Nobla z fizyki oraz objaśnianie uczniom najnowszych osiągnięć i wynalazków z zakresu fizyki i techniki. Dr Jerzy Jarosz z Wydziału Nauk Ścisłych Uniwersytetu Śląskiego w swoim referacie w czasie Sesji Popularyzatorskiej zachęcał nauczycieli do pokazania uczniom, że fizyka jest fundamentem rozwoju cywilizacyjnego, a wiedza fizyczna przyczynia się do rozwoju nowoczesnych i innowacyjnych rozwiązań technicznych takich, jak kolejne duże prędkości czy pojazdy z napędem wodorowym (relacja z 48. ZFP w „Fizyce w Szkole” nr 6/2023). Wychodząc naprzeciw tym postulatom w „Fizyce w Szkole” (nr 4/2022) został opublikowany artykuł o kolejach dużych prędkości w aspekcie poznawczym i edukacyjnym. Nadszedł więc czas na prezentację użycia napędu wodorowego w transporcie. Odnośnie napędu wodorowego w transporcie, warto też przypomnieć konkluzje panelu dyskusyjnego „Fizyka 2050” przeprowadzonego na zakończenie Zjazdu Fizyków w Bydgoszczy we wrześniu 2021 roku, gdzie w podsumowaniu wskazano obszary wyzwań dla fizyków takie, jak: obniżenie emisji gazów cieplarnianych, wytworzenie nowych, bardzo wydajnych źródeł energii, wprowadzenie gospodarki opartej na wodorze, wykorzystanie energii termojądrowej, bardzo szybki transport naziemny i podziemny (relacja z 47. ZFP w „Fizyce w Szkole” nr 2/2022). Obecnie media informują, że w Niemczech jeżdżą już pociągi pasażerskie ciągnięte przez lokomotywy z silnikami wodorowymi, a w Internecie pokazywane są różne modele samochodów na napęd wodorowy, nawet duża ciężarówka z ciągnikiem siodłowym. Najwyższą zatem pora, żeby nauczyciele wyjaśnili uczniom zasady działania silników wodorowych i zaprezentowali wykorzystanie napędu wodorowego w transporcie samochodowym i kolejowym.

Katastrofa „Hindenburga” zakończyła karierę sterowców w dziedzinie turystyki i komunikacji pasażerskiej na wiele następnych lat. Sterowce nie wyszły jednak zupełnie z użytku, w latach 90. XX wieku koncern Zeppelin zdecydował o stworzeniu spółki Zeppelin Luftschifftechnik i powrocie do budowy sterowców wciąż bazujących na konstrukcji ramy pomysłu Ferdinanda Graf von Zeppelina (1838-1917). Od 1997 roku sterowce wykorzystywane są m.in. w Niemczech, USA i Japonii w turystyce, badaniach georadarowych, służbach celnych, meteorologii, armii i reklamie.

### Paliwo wodorowe

Wodór zwany „zielony paliwem”, określany jest jako paliwo ekologiczne. Jest on pozyskiwany w procesie elektrolizy wody. Elektrolizer oddziela wodór od cząsteczek wody, a jednocześnie wytwarza produkt uboczny w postaci tlenu, który uwalnia się do powietrza. Wytworzony wodór gazowy jest magazynowany. Niestety elektroliza jest procesem o wysokim zapotrzebowaniu na energię, aby wytworzyć 1 kg czystego wodoru, trzeba zużyć 30-70 kWh energii elektrycznej. Z tego powodu napęd wodorowy przez niektórych ekologów jest kwestionowany jako napęd ekologiczny, podobnie jak napęd samochodów elektrycznych ładowanych prądem wytwarzanym w elektrowniach węglowych.

Paliwowe stacje wodorowe są wyposażone w specjalny dystrybutor, który z wyglądu przypomina ten do tankowania gazu. Żeby napelnić bak pojazdu, wystarczy



Rys. 2. Tankowanie wodoru. Źródło: Mat. reklamowe firmy Toyota, [toyota.pl](http://toyota.pl)

podłączyć pistolet, uruchomić dystrybutor i poczekać, aż zbiornik zostanie uzupełniony gazem. Tankowanie wodoru zajmuje kilka minut, a cała procedura jest całkowicie bezpieczna. Funkcjonują dwa ciśnienia tankowania. Wyższe ciśnienie to tzw. opcja do pełna.

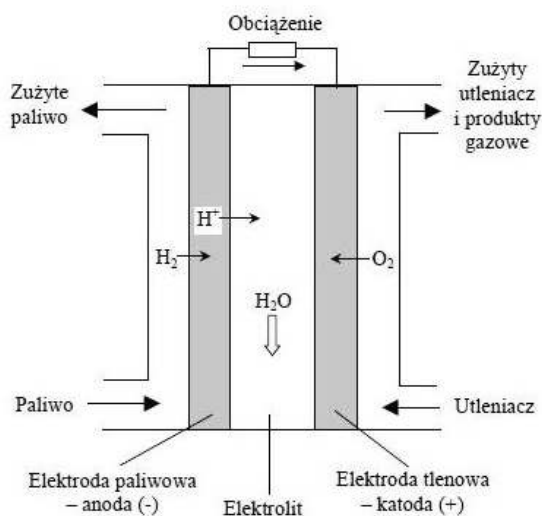
### Wodorowy silnik spalinowy

Silnik spalinowy jest znany już od 145 lat. Przez ten czas opracowano technologię wykorzystania zarówno paliwa płynnego, jak i gazowego. Wykorzystując dotychczasowe doświadczenia, kilka firm motoryzacyjnych (*Toyota, Deutz, Aquarius Engines*) opracowało własne rozwiązania silników iskrowych zasilanych wodorem. Podobnie jak inne paliwa gazowe, wodór potrzebuje zmagazynowania w zbiorniku wysokociśnieniowym, skąd jest przemieszczany do komory spalania w silniku, zatem cykl pracy silnika tłokowego pozostaje bez zmian. Firma *Toyota* wykorzystała do testów trzycylindrowy silnik o pojemności 1600 cm<sup>3</sup>, a spalanie wodoru w efekcie spowodowało zmniejszenie drgań silnika oraz cichszą pracę jednostki. Silnik spalający wodór nie emituje substancji zanieczyszczających środowisko naturalne, gdyż z rury wydechowej wydalaną jest czysta woda.

### Wodorowe ogniwa paliwowe

W praktyce do napędu pojazdów stosowane są ogniwa wodorowe i wówczas pojazdy o napędzie wodorowym są w zasadzie pojazdami elektrycznymi, z tym, że zamiast ciężkich baterii, są zaopatrzone we własne „mini elektrownie”. Idea wodorowych ogniw paliwowych znana jest od XIX wieku. Zasadę działania ogniw wodorowych odkrył w 1838 roku szwajcarski chemik Christian F. Schönbein (1799-1868). Na tej podstawie w roku 1839 fizyk brytyjski William R. Grove (1811-1896) stworzył pierwsze działające ogniwo paliwowe wytwarzające prąd elektryczny. Ogniwo takie nie ma części ruchomych, działa bezszumowo, a jego jedyną substancją odpadową jest woda.

Ogniwa paliwowe przez ponad wiek traktowane były jako ciekawostka laboratoryjna. Dopiero w latach 60’ ub. wieku NASA zaczęła instalować ogniwa wodorowe w statkach kosmicznych w misjach Gemini i Apollo do wytwarzania wody i zasilania w prąd elektryczny. Technologia napędu wodorowego polega na dostarczaniu wodoru z wysokociśnieniowego zbiornika do ogniwa i jednoczesnym



Rys. 3. Schemat ogniwa wodorowego. Źródło: B. Ceran, *Polityka Energetyczna* T17, Z3, 2014

najczęściej za pomocą sprężarki dostarczaniu tlenu atmosferycznego, następnie w wyniku reakcji elektrochemicznej z udziałem wodoru oraz tlenu ogniwo paliwowe wytwarza prąd elektryczny stały, który następnie zamieniany jest na prąd zmienny, a ten zasila elektryczne silniki napędowe. Produktami ubocznymi tego procesu są ciepło i woda.

Można określić, że ogniwo paliwowe jest elektrochemicznym urządzeniem, które przetwarza energię chemiczną bezpośrednio w energię elektryczną. Brak pośrednich przemian przewodzących do powstania energii mechanicznej pozwala na uzyskanie wysokiej sprawności wytwarzania energii elektrycznej. Zasada działania ogniwa paliwowego typu PEMFC z jonowymienną membraną polimerową polega na tym, że paliwo (wodór) doprowadzane jest w sposób ciągły do anody, a utleniacz dostarczany jest do katody. Elektrolitem jest membrana polimerowa przewodząca protony. Anoda pokryta jest katalizatorem, dzięki któremu zachodzi dysocjacja wodoru na protony (jony  $H^+$ ) i elektrony.

Obecne na rynku ogniwa paliwowe dzielą się na niskotemperaturowe (o temperaturze pracy ok.  $250^{\circ}C$ ) oraz wysokotemperaturowe (o temperaturze pracy ok.  $600^{\circ}C$ ). W motoryzacji wykorzystuje się ogniwa niskotemperaturowe, gdyż w ich przypadku niewymagana jest izolacja termiczna. Paliwo wodorowe jest wysokokaloryczne



Rys. 4. Samochód wodorowy Toyota Mirai. Źródło: Mat. reklamowe firmy Toyota, toyota.pl

i lekkie, zbiornik na to paliwo o pojemności 120 litrów mieści 5-6 kg sprężonego wodoru. Taka ilość wodoru pozwala na pokonanie dystansu ok. 500 km.

Oprócz zalet napęd wodorowy ma kilka wad. Przede wszystkim taką wadą jest koszt pozyskiwania ekologicznego wodoru (wartość zużytej energii elektrycznej) oraz jego dostępność, czyli niewielka liczba stacji tankowania. Innym istotnym problemem wynikającym z wykorzystania paliwa wodorowego jest temperatura pracy, w przypadku ogniw niskotemperaturowych wymagane jest nagrzanie silnika przed każdym rozruchem, a to oznacza kilkunastosekundową zwłokę. W niedalekiej przyszłości ten mankament ma zostać rozwiązany.

## Samochody wodorowe

Samochody na paliwo wodorowe stanowią korzystną środowiskowo alternatywę dla tradycyjnych pojazdów spalinowych, gdyż napęd wodorowy nie generuje emisji  $CO_2$ . Ponadto, ich zasięg i czas tankowania są porównywalne do konwencjonalnych samochodów, co sprawia, że są praktyczną opcją dla konsumentów. Chociaż rynek samochodów wodorowych nadal jest stosunkowo niewielki w porównaniu do pojazdów elektrycznych (BEV) czy spalinowych, coraz więcej producentów rozwija modele napędzane wodorem, jak przykładowo *BMW iX5*. Najpopularniejszymi spośród dostępnych na rynku modeli samochodów na napęd wodorowy są *Toyota Mirai*, *Hyundai Nexo* czy *Honda Clarity Fuel Cell*.

Korzyści z użycia wodoru jako paliwa w motoryzacji polegają na tym, że wodór posiada określone właściwości, które mogą zwiększać bezpieczeństwo jego użytkowania. Ponieważ jest on ok. 14-krotnie lżejszy od powietrza, dlatego w momencie ewentualnego wycieku szybko unosi się w otwartej przestrzeni, co zmniejsza ryzyko zapłonu. Charakteryzuje się też wysoką temperaturą samozapłonu ( $585^{\circ}C$ ), przez co trudniej o inicjację procesu spalania bez udziału dodatkowego katalizatora. Dodatkowo, w przeciwieństwie do benzyny nie tworzy ryzyka powstania i zapłonu kałuży w obszarze pojazdu w wyniku wycieku.



Rys. 5. „Premier” – polski samochód wodorowy (WAT, AGH i RIOT Technologies). Źródło: Mat. inform. Międz. Inst. Innowacji, instytutinnowacji.edu.pl



Rys. 6. Ciężarówka na wodór firmy francuskiej Hyliko z ogniwami Toyota. Źródło: Mat. reklamowe Toyota, toyotanews.eu



Rys. 7. Ciągnik siodłowy polskiej firmy MAN na napęd wodorowy. Źródło: Mat. informacyjne portalu Polski Traker, polskitraker.pl

Poza korzyściami środowiskowymi i zmniejszeniem śladu węglowego, zalety samochodów wodorowych to długi zasięg jazdy oraz szybkie tankowanie. Średni zasięg samochodu wodorowego (FCEV) na pełnym tankowaniu jest porównywalny do konwencjonalnych pojazdów spalinowych, przykładowo w modelu *Toyota Mirai* wynosi ok. 650 km. Jednak rzeczywisty zasięg samochodów FCEV zależy każdorazowo od warunków i stylu jazdy oraz dodatkowych czynników takich, jak warunki drogowe czy obciążenie pojazdu. Zaletą samochodu wodorowego jest też szybkie tankowanie. Długość tankowania to ok. 5 min, co stanowi przewagę na trasach długodystansowych.

Mimo korzyści, rozwój transportu z wykorzystaniem samochodów wodorowych narażony jest na wyzwania. Chodzi o to, że infrastruktura tankowania wodoru jest nadal ograniczona w wielu regionach, co może być poważną przeszkodą dla konsumentów, którzy obawiają się braku dostępu do paliwa w trakcie podróży. Dodatkowym wyzwaniem są koszty pojazdów oraz produkcji i magazynowania wodoru, które na obecnym etapie pozostają wyższe od tradycyjnych źródeł energii.

Prognozy wskazują, że wraz z rozwojem technologii i infrastruktury produkcyjnej odnawialnego wodoru oraz planowanym finansowaniem projektów, możliwa będzie stopniowa redukcja cen w kolejnych latach, zgodnie z celami Unii Europejskiej w zakresie zeroemisyjnego transportu.

Chociaż „zielony wodór” produkowany poprzez elektrolizę wody z wykorzystaniem energii odnawialnej skutkuje znacznym zmniejszeniem emisji gazów cieplarnianych związanych z sektorem transportowym, to jednak, aby zwiększyć dostępność tego zasobu, konieczne są inwestycje w infrastrukturę do produkcji *on-site* lub w wyspecjalizowanych hubach.

Firmy produkujące samochody wodorowe w dalszej perspektywie mogą stać się znaczącymi graczami na rynku motoryzacyjnym, gdyż samochody te stanowią czystą i efektywną alternatywę dla konwencjonalnych pojazdów spalinowych. Technologia wykorzystania wodoru do napędu stwarza szanse osiągnięcia bardziej ekologicznego transportu, zwłaszcza długodystansowego i ciężkiego.

Należy podkreślić, że kosztowne inwestycje w produkcję zielonego wodoru i rozwój infrastruktury wodorowej są konieczne dla osiągnięcia nadrzędnych celów związanych z dekarbonizacją sektora transportowego i ochroną środowiska naturalnego.

## Pociągi napędzanie wodorem

Chociaż wodór jest postrzegany jako paliwo przyszłości do samochodów, nadaje się również do zasilania pociągów. Pierwszy pociąg pasażerski napędzany wodorem o nazwie *Coradia iLint* wyjechał już na tory w 2022 roku w Czechach. Został wyprodukowany przez francuski koncern *Alstom*, który specjalizuje się w tworzeniu infrastruktury energetycznej oraz transportowej. Koncern ten od lat wykorzystuje technologię wodorową w transporcie kolejowym, ale dopiero w 2022 roku przygotował skład pasażerski.

Użycie napędu wodorowego w kolejnictwie skutkuje cichą, komfortową jazdą oraz bezemisijną eksploatacją przyjazną dla środowiska naturalnego. Według ekspertów pociąg wodorowy może z powodzeniem zastąpić składy napędzane silnikami Diesla, które wciąż kursują w wielu krajach, szczególnie tam, gdzie sieć trakcyjna nie jest dostatecznie rozwinięta. Korzyścią z zastosowania w kolejnictwie ogniw wodorowych zamiast silników spalinowych jest także poprawa komfortu podróżowania oraz ochrona środowiska naturalnego poprzez brak emisji spalin.

W wykorzystaniu pociągów napędzanych wodorem przodują na razie Niemcy, gdzie wykorzystywane jest 14 składów produkcji *Alstom Coradia iLint*. Pierwszy na świecie pociąg wodorowy został zaprojektowany i zbudowany w zakładach *Alstom* w Salzgitter w Niemczech, a poszycia nadwozia są produkowane w chorzowskiej fabryce koncernu. Konstrukcja pociągu bazuje na sprawdzonym pociągu spalinowym z rodziny *Coradia iLint*, który także był wytwarzany w Chorzowie. Prędkość maksymalna wynosi 140 km/godz. Pociąg *Coradia iLint* mieści do 300 pasażerów i może pokonać dystans 1000 km na jednym tankowaniu.

Pociąg wodorowy *Coradia iLint* jest przeznaczony specjalnie do użytku na niezelektryfikowanych trasach. W Unii Europejskiej jest to prawie połowa (46%) linii kolejowych, a więc mogą się po nich poruszać pociągi z napędem spalinowym lub alternatywnym, np. zasilane wodorem. Pierwsze na świecie dwa pociągi wodorowe przez półtora roku (w latach 2018-2020) kursowały w regularnej komunikacji pasażerskiej w Niemczech i przejechały ponad 180 000 km. Firma *Alstom* sprzedała na tamtym rynku już 41 takich pociągów napędzanych wodorem, które zastąpiły dotychczas eksploatowane pojazdy z silnikami wysokoprężnymi. Od 2022 r. seryjne pociągi wodorowe są regularnie eksploatowane w Niemczech.



Rys. 8. Pociąg firmy Alstom o napędzie wodorowym. Źródło: Mat. reklamowe firmy Alstom, alstom.com

Firma *Alstom* dostarcza pociągi wyposażone w ogniwa paliwowe Włochom i Francji. We Francji przewoźnik SNCF *Voyageurs* złożył zamówienie w firmie *Alstom* na pierwsze 12 pociągów elektryczno-wodorowych *Regiolis*. Jesienią 2023 roku pociąg wodorowy *Coradia iLint*, przez 3 miesiące jeździł w regularnych przewozach pasażerskich dla Austriackich Kolei Federalnych (ÖBB) na regionalnych liniach kolejowych w południowej części Dolnej Austrii. Pociągi *Coradia iLint* zostały pomyślnie przetestowane m.in. w Austrii, Holandii, Polsce i Szwecji, zatem firma ta może spodziewać się kolejnych kontraktów.

Na świecie znani są też inni producenci pociągów wodorowych. Pod koniec stycznia 2021 roku chińska firma CRRC zaprezentowała lokomotywę zasilaną ogniwami wodorowymi przeznaczoną przede wszystkim do prac manewrowych. Moc układu napędowego to 700 kW, a uciążenie lokomotywy wynosi 5000 ton. Lokomotywa działa całkowicie bezemisyjnie, nie wymaga dostępu do sieci trakcyjnej, co zdecydowanie zwiększa jej użyteczność. Chińska lokomotywa została zbudowana na platformie modułowej, dzięki czemu można łatwo przygotować inne jej warianty dopasowane do potrzeb nabywców.

Obecnie w Chinach wdrażane są do eksploatacji wodorowe pociągi pasażerskie opracowane wspólnie przez państwowy CRRC i prywatny *Chengdu Rail Transit*. Czteroczonowy skład może osiągnąć prędkość 160 km/godz. Ma zasięg ok. 600 km i jako odpad emituje wyłącznie wodę. Pociąg został wyprodukowany w Chengdu w prowincji Syczuan w południowo-zachodnich Chinach. Skład ma realizować połączenia aglomeracyjne. Może

przewozić łącznie 1502 pasażerów. Według zapewnień producenta, pociąg może poruszać się autonomicznie. Komunikację z pojazdem zapewnia sieć 5G. Skład wyposażono ponadto w inteligentne funkcje jazdy, takie jak automatyczne budzenie, automatyczne uruchamianie i zatrzymywanie oraz automatyczny powrót do zajezdni. System oświetlenia może automatycznie dostosowywać jasność i temperaturę barwową zgodnie z warunkami panującymi na zewnątrz.

Pociąg został wyposażony nie tylko w wodorowe ogniwa paliwowe, ale także w superkondensatory. Same ogniwa paliwowe nie są dobre w reagowaniu na skokowe wysokie zapotrzebowanie na moc. Możliwe jest użycie większego zestawu ogniw, aby zaspokoić duże zapotrzebowanie na moc, ale takie rozwiązanie byłoby bardzo kosztowne i nieefektywne. Dlatego chiński producent wykorzystał superkondensatory, które można porównać do tzw. *power banku*. Są one powoli ładowane przez ogniwa paliwowe, aby następnie dostarczyć jednostce dużą moc, gdy jest ona najbardziej potrzebna. Inną zaletą superkondensatorów jest to, że mogą one magazynować energię przechwyconą z hamowania. Jest to szczególnie pomocne, gdy pociąg pokonuje długie wzniesienie. Podczas zjazdu część energii może zostać przechwycona i przechowywana jako energia elektryczna do późniejszego wykorzystania.

Pociąg wodorowy pozwala zaoszczędzić nawet 10 000 kilogramów CO<sub>2</sub> rocznie w porównaniu z pociągiem z lokomotywą spalinową. Pojazd CRRC może rozpędzać się do prędkości o ok. 20 km/godz. większej niż pociąg *Alston*, czyli do 160 km/godz., za to pociąg *Coradia iLint*



Rys. 9. Chińska lokomotywa na napęd wodorowy CRRC Zhunhou może ciągnąć 105 wagonów. Źródło: Mat. informacyjne portalu Rynek Kolejowy, rynek-kolejowy.pl



Rys. 10. Japoński pociąg na napęd wodorowy Hybari. Źródło: Mat. reklamowe firmy Toyota, toyotanews.eu

oferują znacznie większy zasięg, bo ok. 1000 km. Zgodnie z planem przedstawionym przez Narodową Komisję ds. Rozwoju i Reform oraz Krajową Administrację Energetyczną (NEA) do 2025 r. po drogach kraju będzie jeździło około 50 000 pojazdów napędzanych wodorowymi ogniwami paliwowymi. Oczekuje się również, że roczna produkcja wodoru w Chinach ze źródeł odnawialnych osiągnie 200 tys. ton. Według NEA na koniec czerwca 2022 r. Chiny miały około 270 stacji tankowania wodoru.

Japonia również inwestuje w pociągi z napędem wodorowym. W tym celu firma *East Japan Railway* we współpracy z *Toyotą Motor* oraz *Hitachi* skonstruowała dwuwagonowy pociąg *Hybari* napędzany wodorem, który kosztował 35 mln dolarów. Jego nazwa to połączenie japońskich słów hybryda i skowronek, ponieważ wyposażony jest w system hybrydowy, który używa ogniw paliwowych zasilanych wodorem, a także akumulatorów, jako źródeł energii elektrycznej. Po tankowaniu pociąg może pokonać do 140 km ze średnią prędkością 100 km/godz. Normalna eksploatacja pociągu przewidywana jest w 2030 roku. W pierwszej kolejności niskoemisyjne pojazdy szynowe zastąpią pociągi spalinowe na przedmieściach. Całe przedsięwzięcie spowodowane jest dążeniem Japonii do neutralności pod względem emisji dwutlenku węgla do 2050 roku, a przy okazji wykorzystane zostaną odnawialne źródła energii.

### Pociągi wodorowe w Polsce

W dniu 17 maja 2022 roku PKN *Orlen* podpisał porozumienie z koncernem *Alstom* dotyczące dostaw nie



Rys. 11. Lokomotywa wodorowa Gama firmy Pesa. Źródło: Mat. reklamowe firmy Pesa, pesa.pl

tylko bezemisyjnych pociągów, ale i paliwa wodorowego. Przedstawiciele *Orlenu* zapowiadali wówczas, że pierwsze wodorowe pociągi wyjadą na polskie tory w przeciągu najbliższych dwóch lat i mają wozic pasażerów na trasach regionalnych. Pociąg *Coradia iLint* zadebiutował na torze testowym Instytutu Kolejnictwa w Żmigrodzie koło Wrocławia.

Pociągi *Coradia iLint* to ogromna szansa także dla Polski na ograniczenie emisji CO<sub>2</sub>, a nawet na dekarbonizację transportu szynowego. Dyrekcja *Alstom* na Polskę, Ukrainę i Kraje Bałtyckie zapewnia, że jeśli w Polsce wybudowane zostaną stacje tankowania i zostanie ogłoszony przetarg na pociągi wodorowe, to zakład *Alstom Konstal* będzie dysponował wszystkimi zasobami niezbędnymi do wyprodukowania takiego taboru.

Lokomotywę wodorową wyprodukowała także polska firma *Pesa* z Bydgoszczy, która specjalizuje się w budowie pociągów i tramwajów. Od 2021 roku konstruuje lokomotywy wodorowe, ale już 2019 roku firma powołała specjalny zespół badawczo-rozwojowy, którego celem była budowa prototypów lokomotywy manewrowej i pasażerskiego zespołu trakcyjnego z napędami wykorzystującymi ogniwa paliwowe zasilane wodorem.

Lokomotywa wodorowa *Pesy* została zaprezentowana podczas Międzynarodowych Targów Kolejowych TRA-KO. Jest to lokomotywa o nazwie *Gama SM42 6Dn*, która powstała przy współpracy z PKN *Orlen* i PKP S.A. Źródłem napędu są dwa ogniwa wodorowe skonstruowane przez firmę *Ballard* o łącznej mocy 170 kW. Lokomotywa została wyposażona także w system autonomicznej jazdy.

Przedstawiciele *Pesy* przewidują, że pierwsze składki ciągnięte przez lokomotywę napędzaną wodorem wyjadą na polskie tory na przełomie 2025 i 2026 roku.

### Napęd wodorowy a Koleje Dużych Prędkości

Aktualnie napęd wodorowy w kolejnictwie nie nadaje się do wykorzystania na potrzeby Kolei Dużych Prędkości (KDP) ze względu na ich dużą energochłonność, a także ograniczoną wydajność i zasięg technologii wodorowych. KDP wymagają ogromnej mocy do osiągnięcia i utrzymania wysokich prędkości, co przekłada się na wysokie zużycie energii. Technologie wodorowe, choć efektywne, nie są jeszcze w stanie dostarczyć wystarczającej mocy dla KDP w krótkim czasie.

Pociągi wodorowe mogą pokonywać duże odległości bez tankowania, ale ich zasięg jest ograniczony

w porównaniu z pociągami spalinowymi. Tankowanie wodoru jest również szybsze niż w przypadku pociągów spalinowych, ale wciąż dłuższe niż w przypadku pociągów elektrycznych zasilanych z trakcji. Rozwój infrastruktury wodorowej, w tym stacji tankowania i magazynowania wodoru jest kosztowny. I wreszcie czynnik najważniejszy, czyli prędkość. Pociągi wodorowe mogą osiągać prędkość do 140 km/godz, co jest niewystarczające dla kolei dużych prędkości, które przewożą pasażerów z prędkościami powyżej 200 km/godz.

Technologia wodorowa wciąż jest rozwijana, a jej zastosowanie w pociągach dużych prędkości wymaga dalszych badań i innowacji. Kolejnym rozwiązaniem są pociągi hybrydowe, które mogą korzystać z różnych źródeł energii, np. z trakcji elektrycznej i z silników spalinowych lub wodorowych. Dalszy rozwój technologii wodorowych, w tym zwiększenie ich wydajności i zasięgu, może w przyszłości umożliwić ich zastosowanie w kolejach dużych prędkości.

Mimo obecnych trudności z wykorzystaniem napędu wodorowego na potrzeby KDP, trwają intensywne prace badawcze nad ich pokonaniem. Niedawno dziesięć hiszpańskich firm połączyło siły w celu zaprojektowania, zbudowania i zainstalowania, po raz pierwszy na świecie, systemu napędowego opartego na odnawialnych wodorowych ogniwach paliwowych w pociągu dużych prędkości. W ramach projektu *Hympulso* opracowywany jest zestaw technologii, które można zastosować w pociągu *Talgo 250*, umożliwiając elektryfikację sieci kolejowej za pomocą energii wytwarzanej w całości ze źródeł odnawialnych. Wśród partnerów projektu *Hympulso* są firmy *Golendus*, *Ingeteam*, *Optimus 3D*, *Repsol* i *Sener*. Inicjatywa otrzymała dotację w wysokości 6,5 miliona euro i jest częścią programu motywacyjnego na rzecz innowacyjnego łańcucha wartości i wiedzy na temat wodoru odnawialnego w ramach planu odbudowy, transformacji i odporności.

*Hympulso* będzie miał charakter kompleksowy: aktywuje cały łańcuch wykorzystania wodoru odnawialnego w systemie kolejowym, od produkcji po konsumpcję. Rezultatem projektu będzie wspólna produkcja instalacji zasilania wodorem dostosowanych do potrzeb kolei, zarówno mobilnych, jak i stacjonarnych oraz pionierski prototyp hybrydowego bimodalnego pociągu pasażerskiego z automatyczną zmianą rozstawu szyn, który będzie mógł poruszać się zarówno po sieciach konwencjonalnych, jak i szybkich, wykorzystując zasilanie z sieci trakcyjnej, jeśli będzie dostępne, lub wodór i akumulatory w tych korytarzach, które nie są zelektryfikowane. Pociągi *Talgo 250*, mają po dwa techniczne wagony końcowe (CET), które są obecnie wykorzystywane do generowania energii elektrycznej w celu zasilania jednostek trakcyjnych wykorzystując olej napędowy na odcinkach bez sieci trakcyjnej.

## Podsumowanie

Napęd wodorowy ma potencjał by stać się kluczowym elementem transportu w przyszłości, zwłaszcza w kontekście wdrażania dekarbonizacji i rozwoju zrównoważonego transportu. Technologia wodorowych ogniw paliwowych może być alternatywą dla tradycyjnych silników spalino-

wych i elektrycznych, gdyż zapewnia szybkie tankowanie i długi zasięg. Chociaż efektywność napędów wodorowych w cyklu zamkniętym wynosi około 60%, co czyni je mniej wydajnymi, to korzyściami z ich zastosowania są:

- długi zasięg, dzięki większej gęstości energii w porównaniu do baterii, samochody wodorowe mogą pokonać nawet powyżej 500 km na jednym tankowaniu, co sprawia, że są idealne do długich tras,
- szybkie tankowanie, tankowanie samochodów wodorowych trwa około 5 min, co jest zbliżone do tankowania samochodów spalinowych, ale znacznie krótsze niż ładowanie elektrycznych,
- brak szkodliwej dla środowiska emisji, jedynym produktem ubocznym jest woda,
- bezpieczeństwo, wodór jest gazem lekkim i szybko ulatnia się w przypadku rozszczelnienia zbiornika, minimalizując ryzyko wybuchu.

Wadami pozostają:

- koszty, gdyż wodór jest nadal droższy niż tradycyjne paliwa, także technologia ogniw paliwowych jest kosztowna,
- infrastruktura, liczba stacji tankowania wodoru jest wciąż niewielka, co utrudnia upowszechnienie tej technologii,
- efektywność, ogniwa paliwowe mają mniejszą sprawność niż silniki elektryczne, co wpływa na zasięg i zużycie energii,
- produkcja wodoru, wytwarzanie wodoru może wymagać dużych ilości energii elektrycznej, co może nie być ekologiczne, jeśli energia nie pochodzi z odnawialnych źródeł.

Perspektywy rozwoju transportu opartego na technologii wodorowej:

- rozwój infrastruktury, w Polsce i Europie powstają nowe stacje tankowania wodoru, co ma na celu ułatwienie dostępu do tej technologii,
- usprawnienie technologii, producenci prowadzą badania nad bardziej wydajnymi i tańszymi ogniwami paliwowymi, które w efekcie pozwolą obniżyć koszty i zwiększyć atrakcyjność napędu wodorowego,
- innowacje, wodór może być wykorzystywany jako paliwo w różnych rodzajach pojazdów, takich jak samochody osobowe, ciężarówki i pociągi,
- zrównoważony rozwój, wodór może być ważnym elementem w walce ze zmianami klimatu i w osiągnięciu neutralności klimatycznej.

Edward Rydygier

Autor jest fizykiem jądrowym,  
doktorem nauk technicznych w specjalizacji transport,  
posiada tytuł Fizyka Europejskiego (EurPhys)



# Twierdzenie H

Maciej **Panczykowski**

W artykule „Nie zawsze entropia” z numeru 1/2025 „Fizyki w Szkole” umieściłem dwa ciekawe wzory na potencjały termodynamiczne zawierające entropię:

$$F = U - TS \quad (\text{przemiany w stałej temperaturze otoczenia i objętości układu})$$

gdzie:  $F$  – energia swobodna,  $U$  – energia wewnętrzna układu,  $T$  – temperatura otoczenia,  $S$  – entropia układu

$$G = U + pV - TS \quad (\text{przemiany w stałej temperaturze i ciśnieniu otoczenia})$$

gdzie:  $G$  – entalpia swobodna,  $U$  – energia wewnętrzna układu,  $T$  – temperatura otoczenia,  $S$  – entropia układu,  $p$  – ciśnienie otoczenia,  $V$  – objętość układu.

Wzory te możemy przekształcić w ten sposób, by otrzymać wzory na entropię:

$$S = \frac{U - F}{T}$$

$$S = \frac{U + pV - G}{T}$$

Są one w fizyce rzadko używane, ale są poprawne. Najbardziej popularny wzór przedstawia taką oto zależność:

$$S = k \cdot \ln W$$

gdzie:  $k$  – stała Boltzmanna,  $\ln$  – logarytm naturalny,  $W$  – liczba mikrostanów na jaki może być zrealizowany dany makrostan układu (im więcej jest tych mikrostanów tym bardziej prawdopodobny jest makrostan i tym większą ma entropię).

W fizyce istnieje jeszcze czwarty, tajemniczy, mało znany i bardzo ogólny wzór na entropię, który w pełnej okazałości wygląda tak:

$$S = -k \sum p_i \cdot \ln p_i$$

gdzie:  $k$  – stała Boltzmanna,  $\ln$  – logarytm naturalny,  $p_i$  – prawdopodobieństwo danego mikrostanu.

Odczytujemy tę zależność tak: entropia danego makrostanu układu równa jest minus  $k$  razy sumie iloczynów: prawdopodobieństwa wystąpienia mikrostanu razy logarytm naturalny tego prawdopodobieństwa. Sumujemy po wszystkich mikrostanach.

Dalszą część artykułu piszę zainspirowany klasyczną książką „Elementary statistical physics” Charlesa Kittela. Będę pokazywał moc i magię czwartego wzoru na entropię na konkretnych przykładach i **krok po kroku**.

W przypadku **układu izolowanego** (czyli takiego, który nie wymienia z otoczeniem ani energii ani materii), który jest w równowadze, czyli w stanie końcowym, który się już nie zmienia – każdy mikrostan tego (makro)stanu jest równie prawdopodobny. Jeśli ich liczbę określimy sym-



Ludwig Boltzman. Foto – <https://commons.wikimedia.org>

bolem  $W$  to prawdopodobieństwo każdego z nich wynosi oczywiście:  $1/W$ . Podstawmy to do naszego wzoru:

$$S = -k \sum \frac{1}{W} \cdot \ln \frac{1}{W}$$

Iloczynów jest tyle ile mikrostanów, więc sumę możemy zastąpić mnożeniem przez  $W$ :

$$S = -kW \cdot \frac{1}{W} \cdot \ln \frac{1}{W}$$

$$S = -k \cdot \ln \frac{1}{W}$$

Wiemy z matematyki, że  $\ln(x/y) = \ln x - \ln y$ , zatem  $\ln(1/W) = \ln 1 - \ln W$

Logarytm naturalny z jedynki wynosi zero, więc w ostateczności mamy:

$$\ln(1/W) = -\ln W$$

Finalnie otrzymujemy poznany już i słynny w fizyce wzór:

$$S = k \cdot \ln W$$

Przejdźmy teraz do **układu zamkniętego**, czyli takiego, który wymienia z otoczeniem energię, ale nie wymienia materii. Otoczenie traktujemy jako zbiornik ciepła o stałej temperaturze  $T$ .

Prawdopodobieństwo ( $p_i$ ) stanu o energii  $E_i$  w tym układzie wyrażane jest wzorem:

$$p_i = A \cdot e^{-\beta E_i}$$

gdzie:  $A$  – stała,  $\beta = 1/(kT)$ ,  $k$  – stała Boltzmanna,  $T$  – temperatura otoczenia

Trzeba teraz wyznaczyć stałą  $A$ . Do tego potrzebny będzie drobny trik. Wiemy, że suma prawdopodobieństw wszystkich możliwych stanów wynosi 1. Zatem piszemy:

$$\sum p_i = \sum A \cdot e^{-\beta E_i} = A \cdot \sum e^{-\beta E_i} = 1$$

$$A = \frac{1}{\sum e^{-\beta E_i}} = \frac{1}{Z}$$

Występująca w powyższym wyrażeniu litera „ $Z$ ” symbolizuje tzw. **funkcję podziału** (sumę stanów):

$$Z = \sum e^{-\beta E_i}$$

Podstawmy wszystko, co otrzymaliśmy do czwartego wzoru na entropię:

$$S = -k \sum \frac{e^{-\beta E_i}}{Z} \cdot \ln \frac{e^{-\beta E_i}}{Z}$$

A teraz trochę matematyki. Pamiętamy, że:  $\ln e^a = a$  i przypominamy sobie zależność:  $\ln(x/y) = \ln x - \ln y$

$$S = -\frac{k}{Z} \sum e^{-\beta E_i} \left( \frac{-E_i}{kT} - \ln Z \right)$$

$$S = -\frac{k}{Z} \sum \left( e^{-\beta E_i} \cdot \frac{-E_i}{kT} - e^{-\beta E_i} \cdot \ln Z \right)$$

Pierwsza część tego wyrażenia to po prostu suma energii wszystkich możliwych stanów razy prawdopodobieństwo wystąpienia każdego z nich (czyli energia średnia = energii wewnętrznej  $U$ ) i to wszystko podzielone przez temperaturę  $T$ :

$$-\frac{k}{Z} \sum \left( e^{-\beta E_i} \cdot \frac{-E_i}{kT} \right) = \frac{1}{ZT} \sum (E_i \cdot e^{-\beta E_i}) = \frac{U}{T}$$

Drugą część tego wzoru wyznaczamy jako:

$$-\frac{k}{Z} \sum (-e^{-\beta E_i} \cdot \ln Z) = k \cdot \ln Z \frac{\sum e^{-\beta E_i}}{Z} = k \cdot \ln Z$$

W każdym podręczniku termodynamiki można znaleźć wzór na energię swobodną  $F$ :

$$F = -kT \cdot \ln Z$$

Zatem:

$$k \cdot \ln Z = -F / T$$

Po połączeniu obydwu części otrzymujemy poznany już wzór:

$$S = \frac{U - F}{T}$$

W fizyce istnieje tajemnicza **funkcja H**:

$$H = -S / k = \sum p_i \cdot \ln p_i$$

Zgodnie z **twierdzeniem H** ta funkcja dla izolowanego układu nie rośnie. Jest to inny sposób ujęcia drugiej zasady termodynamiki mówiącej, że entropia izolowanego układu nie maleje (zauważmy, że  $S$  i  $H$  różnią się zasadniczo znakiem minus). Twierdzenie to sformułował wybitny fizyk austriacki Ludwig Boltzmann. Jego nowatorskie prace z fizyki statystycznej nie zostały docenione przez środowisko ówczesnych fizyków-pozytywistów. Krytykowali oni fakt, że zakładał on istnienie atomów i cząstek w swych teoriach, a nie były one w tamtym czasie, na przełomie XIX i XX wieku, bezpośrednio obserwowalne. Załamany i zaszczuty Boltzmann popełnił w 1906 roku samobójstwo.

Maciej Pancykowski  
Katowice, 2025.03.31

## Wydział Technologii Kosmicznych na AGH

**W Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie rozpoczął działalność pierwszy w Polsce, i jeden z nielicznych w Europie, Wydział Technologii Kosmicznych.**

Rektor AGH prof. Jerzy Lis podkreślił, że sektor kosmiczny w Polsce rozwija się dynamicznie i ma coraz większe znaczenie, a nasz kraj jest aktywny w zakresie produkcji satelitów, rozwoju technologii aparatury badawczej stosowanej w kosmosie, badań kosmicznych oraz technik obserwacji Ziemi.

Nowy wydział oferuje studia magisterskie prowadzone w całości w języku angielskim na kierunku Space Technologies. Program studiów uwzględnia trzy specjalizacje: Upstream, czyli technologie wysyłane w przestrzeń kosmiczną (satelity, systemy rakietowe); Downstream – przetwarzanie i wykorzystanie danych satelitarnych oraz Bio-medical – wpływ warunków kosmicznych na organizm człowieka oraz systemy podtrzymania życia w kosmosie.

Każda specjalizacja przewidziana jest dla maksymalnie 12 studiujących.

Zajęcia na nowym kierunku będą prowadzone przy udziale ekspertów z branży kosmicznej, jak i przedstawicieli agencji kosmicznych oraz firm technologicznych.

Kadra nowego wydziału – zaznaczyli przedstawiciele AGH - ma zapewnić absolwentom i absolwentkom szeroki wachlarz możliwości zatrudnienia w sektorze kosmicznym.

Wydział Technologii Kosmicznych jest pokłosiem dotychczasowej działalności Centrum Technologii Kosmicznych, które od pięciu lat aktywnie bierze udział w projekcie UNIVERSEH – Europejski Uniwersytet Kosmiczny dla Ziemi i Ludzkości.

Władze uczelni wskazały, że ważnym elementem studiów na nowym Wydziale będzie aktywna działalność w kołach naukowych, których aktualnie w obszarze technologii kosmicznych działa przy Centrum Technologii Kosmicznych dziesięć (m.in. LunarTech, SatLab, AstroBio, AGH Skylink, AstroDevelopers, AGH Space Team, STARS), i w których innowacyjne rozwiązania tworzy około 260 osób. (PAP) Nauka w Polsce

## Żywoty fizyków

James Clerk Maxwell  
(1831-1879)

Tadeusz Wibig

Znany jest powszechnie z czterech równań opisujących w zupełności elektrodynamikę klasyczną. Wiemy już też („Fizyka w Szkole” nr 2/2025), że studiował percepcję kolorów i zbudował koło Maxwella, ale w fizyce wiele jest jeszcze innych rzeczy nazwanych jego nazwiskiem.

Ot, choćby na przykład **rozkład Maxwella**.

Mówi on, jakie są prędkości cząstek gazu doskonałego zamkniętych z doskonałym naczyniem, jeśli pozostawić je w spokoju przez jakiś czas, aby zaistniał a naczyniu tym stan równowagi (termodynamicznej). Gaz doskonały składa się z malutkich sferycznych kuleczek, taki model przyjął Maxwell w swojej pracy *Illustrations of the dynamical theory of gases. Part I. On the motions and collisions of perfectly elastic spheres*. (The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 4th Series, **19**, 19, 1860). Kulki Maxwella poruszały się bezładnie we wszystkich kierunkach i zdarzały się ze sobą doskonale elastycznie. Zderzały się też co jakiś czas ze ściankami naczynia, którego doskonałość polegała na tym, że każde takie zderzenie także było doskonale elastyczne, a same ścianki bardzo masywne, na tyle masywne, że w zderzeniach z kulkami nie przejmowały one nic z energii kulek, można przyjąć, że były nieskończenie wręcz ciężkie.

Oczywiście na skutek tych chaotycznych ruchów i zderzeń jedne kulki mają energię większą, inne mniejszą. Można powiedzieć, że najpewniej istnieje jakiś rozkład prawdopodobieństwa mówiący, jaka jest szansa, że wybrana losowo kulka ma energię z wąskiego przedziału w sąsiedztwie wartości  $v$ , powiedzmy  $(v, v + dv)$ . Oznaczmy ten rozkład literą  $f$ .

Prędkość jest wektorem i prędkości kulek w pudełku mają trzy składowe  $v_x, v_y$ , i  $v_z$ . Każda z tych składowych ma też odpowiedni rozkład prawdopodobieństwa bycia blisko konkretnych wartości  $v_x, v_y$  czy  $v_z$ . Ponieważ nie ma żadnego powodu, aby kierunek  $x$  różnił się zasadniczo od kierunku  $y$  (i od  $z$ ) wszystkie te rozkłady muszą być takie same. Oznaczmy je literą  $f$ .

Jest zupełnie oczywiste, że prędkości kulek wzdłuż osi  $x$  nie zależą od tego, jak kulka porusza się w kierunku  $y$  (i w kierunku  $z$ ). Zmienne  $v_x, v_y$ , i  $v_z$ , składowe prędkości kulek są niezależne. Fakt ten możemy zapisać jako

$$F(v_x, v_y, v_z) = f(v_x) f(v_y) f(v_z)$$

I teraz następuje gwóźdź rozumowania, a polega on na dość oczywistym stwierdzeniu, że osie  $x, y$  i  $z$  zostały wybrane zupełnie dowolnie. To samo możemy powtórzyć



Foto - <https://commons.wikimedia.org>

obracając sobie jakkolwiek układ współrzędnych i wtedy też rozkłady  $F$  i  $f$  muszą być dokładnie takie same. Własność ta nazywa się niezmienniczością na obroty.

To, co w wektorze nie zmienia się przy obrotach układu, w jakim go opisujemy, to jego długość. Zmieniają się współrzędne, ale długość pozostaje zawsze taka sama, a długość (z twierdzenia Pitagorasa)  $v$  spełnia warunek

$$v^2 = v_x^2 + v_y^2 + v_z^2$$

a zatem funkcja  $F$  może zależeć jedynie od  $v$  (albo  $v^2$ , co na jedno wychodzi)

$$F(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) = f(v_x) f(v_y) f(v_z)$$

równanie to pojawia się w ostatniej linijce na 22 stronie pracy Maxwella *Illustrations*..... Strona 23 rozpoczyna się zaś stwierdzeniem:

„rozwiązując to równanie funkcyjne otrzymujemy

$$f(x) = C e^{Ax^2} \quad F(r^2) = C^3 e^{Ar^2}.”$$

Proste?

A jak w szczegółach równanie to rozwiązać?

Niestety wymaga to odrobiny wiedzy o rachunku różniczkowym. Maxwell był w tym dobry.

Dla wygody, co okaże się za chwilę, przyjmijmy oznaczenie  $h(x) = \ln f(x)$ , czyli  $f(x) = \exp(h(x))$  i wtedy korzystając ze znanych własności funkcji wykładniczej ( $\exp(a+b) = \exp(a)\exp(b)$  i  $\ln(\exp(a)) = a$ ) możemy równanie zapisać jako

$$\ln F(v_x, v_y, v_z) = h(v_x) + h(v_y) + h(v_z)$$

Wprowadźmy (znowu dla wygody tylko) funkcję

$$H(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2) = \ln F(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$$

i wtedy równanie do rozwiązania wygląda tak:

$$H(v^2) = h(v_x) + h(v_y) + h(v_z)$$

Można je zróżniczkować po którejkolwiek składowej prędkości, powiedzmy  $v_x$ . Po tej operacji otrzymujemy z lewej strony

$$\begin{aligned} \frac{dH(v^2)}{dv_x} &= \frac{dH(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{dv_x} = \frac{dH(v^2)}{dv^2} \frac{dv^2}{dv_x} \\ &= \frac{dH(v^2)}{dv^2} \frac{d(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)}{dv_x} \end{aligned}$$

Czyli w końcu

$$\frac{dH(v^2)}{dv_x} = \frac{dH(v^2)}{dv^2} 2v_x$$

a z prawej

$$\frac{d(h(v_x) + h(v_y) + h(v_z))}{dv_x} = \frac{dh(v_x)}{dv_x}$$

Porównując ze sobą obie strony mamy

$$\frac{dh(v_x)}{dv_x} = \frac{dH(v^2)}{dv^2} 2v_x$$

czyli

$$\frac{dh(v_x)}{dv_x} \frac{1}{2v_x} = \frac{dH(v^2)}{dv^2}$$

i teraz lewa strona tego równania zależy od  $\frac{1}{2v_x}$ , ale prawa już nie (zależy od długości wektora  $v$ ), więc

$$\frac{dh(v_x)}{dv_x} \frac{1}{2v_x} = \text{const}_1$$

czyli

$$\frac{dh(v_x)}{dv_x} = v_x \text{const}_2$$

co jest dość elementarnym równaniem różniczkowym;

$$h'(x) = x \rightarrow h(x) = \frac{1}{2}x^2 + \text{const}_3$$

A zatem

$$h(v_x) = A v_x^2 + \text{const}_4$$

czyli wracając do funkcji  $f$

$$f(v_x) = C e^{A v_x^2}$$

c.b.d.o.

Dalej pojawia się dyskusja o tym, że  $A$  musi być ujemne. Maxwell przyjmuje oznaczenie  $A = -\frac{1}{\alpha^2}$  i wyznacza stałą  $C$  z faktu, że rozkład ten, jako rozkład prawdopodobieństwa, jest unormowany do jedności (wycalkowany od  $-\infty$  do  $+\infty$  musi dać 1), bo przecież z całą pewnością jakąś prędkość kulka posiadać musi) w rezultacie

$$f(v_x) = \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}} e^{-v_x^2/\alpha^2}$$

Jest to najbardziej chyba znany ciągły rozkład prawdopodobieństwa (poprawnie: gęstość rozkładu prawdopodobieństwa). Nazywa się on najczęściej rozkładem normalnym, czasem rozkładem Gaussa (Fizyka w Szkole 69/5, 14, 2024), czasem rozkładem Laplace'a-Gaussa, krzywą dzwonową. Został on „wynaleziony” w roku 1823 przez Gaussa i opisany w książce „*Theoria combinationis observationum erroribus minimis obnoxiae*” (Dieterich, Getynga 1823) w odniesieniu do statystycznych metod opisywania niepewności pomiarowych. Maxwell pokazał, że ta zmyślna konstrukcja nie jest jedynie „ciekawostką” matematyczną, elementem analizy statystycznej danych pomiarowych, ale ma głębokie, żeby nie powiedzieć fundamentalne znaczenie dla fizycznych podstaw atomistycznej budowy materii, termodynamiki. Dokonał on tego opierając się na sformułowanym przez siebie *twierdzeniu o rotacji*, które w języku statystyki można dziś sformułować następująco:

**Jeśli rozkład prawdopodobieństwa jakiejś zmiennej wektorowej jest niezmienny na obroty układu współrzędnych i wszystkie jej składowe są od siebie niezależne, to każda z nich ma ten sam rozkład i jest to rozkład normalny.**

Twierdzenie to znane jest jako **twierdzenie Maxwella**. Niekiedy nazywane jest też twierdzeniem Herschela-Maxwella.

Nazwisko **Sir Johna Fredericka Williama Herschela**, pojawia się tu nie bez powodu. Ponad 10 lat przed Maxwellem opublikował tekst *Queetelet on probabilities*, (Edinburgh Review 92, 1, 1850), w którym wypowiedział twierdzenie o rotacji ograniczając się jednak jedynie do dwóch wymiarów i do problemów statystycznego rozrzutu danych pomiarowych, a konkretnie od rzucania piłką do celu. Maxwell znał ten tekst.

Trójwymiarową gęstość prawdopodobieństwa  $F(v_x, v_y, v_z)$  można przekształcić na gęstość prawdopodobieństwa znalezienia w pudełku kulki o wartości prędkości z przedziału  $(v, v + dv)$ .

$$\begin{aligned} F(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z \\ = \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}} e^{-v_x^2/\alpha^2} dx \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}} e^{-v_y^2/\alpha^2} dy \frac{1}{\alpha\sqrt{\pi}} e^{-v_z^2/\alpha^2} dz \end{aligned}$$

przechodząc z kartezjańskiego układu współrzędnych  $(x, y, z)$  do układu sferycznego  $(r, \theta, \varphi)$ , definiując element kąta bryłowego  $d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$  i zamieniając zmiennę

$$dv_x dv_y dv_z = v^2 \sin \theta d\theta d\varphi = v^2 dv d\Omega$$

możemy wycalkować po kącie bryłowym, od którego funkcje podcałkowe zupełnie nie zależą, czyli całe całkowanie sprowadzi się do pomnożenia funkcji podcałkowej przez pełen kąt bryłowy, czyli  $4\pi$

$$F(v)dv = \frac{1}{(\alpha\sqrt{\pi})^3} 4\pi v^2 e^{(-v^2/\alpha^2)}$$

i ten rozkład nazywa się rozkładem Maxwella. Czasem Maxwella–Boltzmanna, gdyż ten drugi wyprowadził te same zależności na kilka innych sposobów włączając je do elementarnych zasad termodynamiki statystycznej. W wersji ostatecznej rozkład prędkości cząsteczek w gazie doskonałym opisuje wzór

$$F(v) = \left( m / (2\pi k_B T) \right)^{3/2} 4\pi v^2 e^{(-mv^2/2k_B T)}$$

$m$  – masa cząstki,  $k_B$  – stała Boltzmanna  $T$  – temperatura

Można stąd policzyć średnią prędkość cząstek (średnią kwadratową, najbardziej prawdopodobną). W normalnych warunkach cząsteczki azotu w powietrzu poruszają się

z prędkością prawie 1500 m/s. Czytając ten tekst w każdej sekundzie uderza w Was z taką prędkością ponad  $10^{27}$  cząsteczek azotu. Boli?

Nazwisko Maxwella pojawia się też w dziwnym związku z przyrządem (zabawką) sprzedawanym przez wiele firm z naukowymi zabawkami jako „koło Maxwella” (za 100 PLN, lub 100 \$ mniej więcej). Nie jest to to samo, co kolorowe koło Maxwella, które Maxwell prezentował osobiście na zebraniu Royal Society. Jest to podwieszony na dwóch sznurkach ciężki krążek, który może się opuszczać i podnosić rozwijając i zwijając sznurek. Niewątpliwie zabawne urządzenie i można uprawiać na jego przykładzie elementarną fizyką, o czym było między innymi ostatnio w „Fizyce w Szkole” (S. Bednarek, 69/5, 30, 2024 „Czy koło Maxwella może być w stanie nieważkości?”). Najdziwniejsze jest to, że nie wiadomo dlaczego przyrząd ten się tak nazywa. W dostępnych biografjach Maxwella nie ma najmniejszej wzmianki o tym, że bawił się on czymś takim. Nie ma też wśród jego dokonań niczego, co miało by cokolwiek wspólnego z takim kołem. Zagadka czeka na rozwiązanie i wdzięczni bylibyśmy Czytelnikom za jej rozwiązanie.

#### Doświadczenie domowe:

#### inne koło Maxwella (?)

##### A. Potrzebne materiały

1. kilka, powiedzmy 10 (starych, zniszczonych, niepotrzebnych) płyt CD
2. ołówek
3. sznurek (~2 metry)
4. kij od szczotki, lub cos w tym rodzaj
5. dwa krzesła
6. taśma klejąca

##### B. Narzędzia:

1. Pistolet do klejenia na gorąco (może nie być konieczne, ale jest przydatne) zamiast niego może być jakiś inny klej (epoksydowy), ale to kłopotliwe.
2. Nożyczki.

##### C. Kolejność czynności

1. Stosik 10 płyt skleić razem taśmą klejącą.
2. Na środku ołówka owinąć go taśmą klejącą tak, aby powstało zgrubienie ciasno wchodzące w otwór w sklejonych płytkach.
3. Usztywnić ołówek używając (ostrożnie) gorącego kleju, albo czegoś innego zwracając szczególną uwagę, aby ołówek był najdokładniej jak się da prostopadły do płytek.
4. Uciąć dwa jednowymiarowe kawałki sznurka.
5. Po obu stronach płytek w możliwie dużych odległościach przywiązać do ołówka kawałki sznurka, można spróbować wywiercić w ołówku prostopadłe otwory i przeprowadzić przez nie sznurki.
6. Na oparciach dwóch krzeseł ułożyć kij od szczotki i przymocować go taśmą klejącą.
7. Dwa sznurki przywiązać do kija w odległościach kilku centymetrów tak aby tarcza z płyt CD wisiała z pół metra niżej.



8. Sznurki przywiązane do ołówka i te do kija od szczotki zalać klejem na gorąco (lub innym) i poczekać, aż dobrze zastygnie.
9. Uciąć kawałek sznurka (30 cm).
10. Delikatnie nawinąć sznurki na ołówek tak, by tarcza uniosła się blisko kija i przywiązać ją do kija, aby swobodnie wisiała.
11. Odczekać trochę aż wszystko będzie w bezruchu;
12. Zmierzyć na jakiej wysokości jest tarcza.
13. Przeciąć sznurek podtrzymujący tarczę.
14. ...i patrzeć, jak ta podąża w dół, a po rozwinięciu się całych sznurków zaczyna piąć się w górę.
15. Zmierzyć na jaką wysokość uniosła się.

Porównując wysokość z jakiej zaczynała swój ruch i tę na jaką się uniosła możemy ocenić jak wiele energii rozproszyło się gdzieś w trakcie ruchu w górę i w dół.

**Pytanie: co się z tą energią stało?**

Możliwości jest co najmniej kilka. Nie sugerując nic nikomu wymienić możemy choćby oczywiste opory powietrza, niesprężystość sznurków, elastyczność kija od szczotki i innych parę, których nie wymienimy, aby niczego nie sugerować.

Proszę opracować doświadczenie, które by definitywnie rozstrzygnęło, która z tych możliwości jest słuszna. I rozstrzygnąć!

### Awaria jakiej jeszcze nie było

Pod koniec kwietnia Hiszpania i Portugalia przez wiele godzin zostały pozbawione prądu. Przerwa w dostawach prądu sparaliżowała ruch uliczny, uziemiła samoloty, zatrzymała kolej, uwięziła wiele osób w windach i wagonach metra. Szpitale pracowały w trybie awaryjnym.

Do tej pory nie podano przyczyny tej awarii. Jak wyjaśnia w rozmowie z PAP dr hab. inż. Henryk Kocot z Politechniki Śląskiej przyczyną mógł być splot wielu czynników, które indywidualnie mogłyby być do opanowania, jednak zadziały się w jednym momencie, a potem nastąpił efekt domina.

Ekspert dodał, że operatorzy systemu danego kraju na co dzień pilnują bezpieczeństwa sieci elektroenergetycznych. „Ci w Hiszpanii na pewno też tak robią, ale tutaj mieliśmy do czynienia ze wspomnianym efektem domina. Automatyka to pewien system naczyń połączonych. Jeśli z jakichś przyczyn wyłączony zostanie jeden element systemu, te obciążenia przejmują inne elementy, które następnie zaczynają pracować na granicy swoich możliwości. Kiedy one się z kolei przeciążą, problem idzie dalej i dalej, a proces zaczyna się sam napędzać” – wskazał.

Naukowiec pytany, czy hipotetycznie awarie o takiej skali mogłyby być spowodowane czynnikami pogodowymi, np. nagłym wzrostem temperatury, potwierdził to, choć z pewnymi zastrzeżeniami.

„Nagły wzrost temperatury może być powodem blackoutu, ponieważ przy wyższej temperaturze zdolności przesyłowe sieci są mniejsze, obniżone są też zdolności produkcyjne elektrowni ciepłych, a z drugiej strony włącza się więcej urządzeń typu klimatyzacja czy chłodnie. Ale procesy cieplne mają długą tzw. stałą czasową, nie są gwałtowne, a dodatkowo operatorzy systemów monitorują prognozy i są przygotowani na różne sytuacje. Dlatego raczej nie wiązałbym awarii z pogodą – nie wiem jednak, jakie panowały wczoraj warunki pogodowe na tym terenie” – powiedział.

Kocot ocenił, że przyczyny awarii będą znane dopiero za jakiś czas. „To są długie i obszerne analizy zapisów rejestratorów zdarzeń w systemie oraz prac na modelach, gdy próbuje się odtworzyć sytuację, która miała miejsce”. Nauka w Polsce, Agnieszka Kliks-Pudlik (PAP)

**W następnych wydaniach polecamy m.in.**

- Bezpieczny model silnika odrzutowego na „sodkę” i ocet
- Skąd wziąć neutrina?
- Kolorowe doświadczenia z polaryzatorami
- Żywoty fizyków – Evangelista Torricellii

# Polaryzacja kołowa i eliptyczna światła

Jan Kurzyk

Jednym ze sposobów polaryzacji fal elektromagnetycznych (i innych fal poprzecznych) jest polaryzacja liniowa. Opisywałem ją w artykule [1]. Gdybyśmy obserwowali wektor natężenia pola elektrycznego związanego z falą elektromagnetyczną w konkretnym punkcie, to zobaczylibyśmy, że koniec tego wektora wykonuje drgania wzdłuż odcinka prostoliniowego prostopadłego do kierunku rozchodzenia się fali. W każdym innym punkcie przestrzeni kierunek tego odcinka byłby taki sam. Innymi słowy drgania wektora natężenia pola elektrycznego fali spolaryzowanej liniowo odbywają się w jednej płaszczyźnie. Taką sytuację przedstawia rysunek 1. Jest to najprostszy, ale nie jedyny sposób uporządkowania drgań pola elektrycznego i magnetycznego fali elektromagnetycznej. Uporządkowanie innego typu i sposób uzyskania tego uporządkowania będzie tematem tego artykułu.

## Polaryzacja kołowa i eliptyczna

W przypadku niespolaryzowanej fali świetlnej, koniec wektora natężenia pola elektrycznego zaczepiony w danym punkcie porusza się chaotycznie po skomplikowanej krzywej (patrz rysunek 2). Jednak nic nie stoi na przeszkodzie, aby koniec wektora natężenia pola elektrycznego w danym punkcie zakreślał symetryczną zamkniętą krzywą. W najprostszym przypadku może to być okrąg lub elipsa. W pierwszym przypadku mówimy o *polaryzacji kołowej*, a w drugim o *polaryzacji eliptycznej* [2].

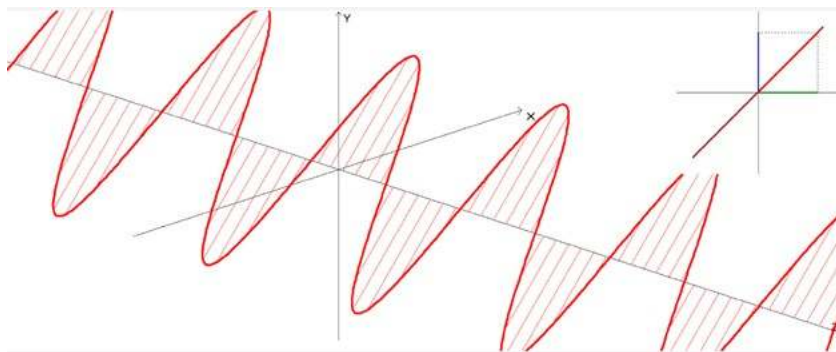
Końce wektorów natężenia pola elektrycznego tak spolaryzowanej fali tworzą linię śrubową (odpowiednio spłaszczoną, gdy polaryzacja jest eliptyczna). Pokazano to na rysunku 3 (a) i (b).

W obu przypadkach możemy rozróżnić dwie sytuacje: linia śrubowa może być prawoskrętna lub lewoskrętna, czyli wektor natężenia pola elektrycznego w danym punkcie może kręcić się zgodnie z ruchem wskazówek zegara lub odwrotnie. Mówimy wówczas o polaryzacji kołowej (eliptycznej) *prawoskrętnej* lub *lewoskrętnej*.

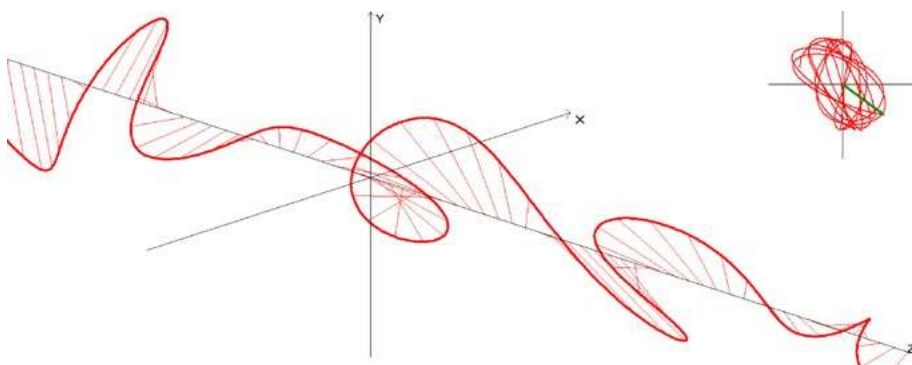
Określenie polaryzacji prawoskrętnej i polaryzacji lewoskrętnej nie jest jednoznaczne. W niektórych opracowaniach spotkamy się z określeniem skrętności polaryzacji patrząc w kierunku źródła fali, czyli patrząc na falę nadbiegającą do nas, a w innych z określeniem skrętności patrząc w kierunku zgodnym z ruchem fali. A zatem określając skrętność powinniśmy doprecyzować o jaki kierunek nam chodzi. W tym artykule będziemy określać skrętność patrząc w kierunku źródła fali, czyli patrząc na falę biegnącą w naszym kierunku.

Niezależnie od tego jaki kierunek przyjmiemy do zdefiniowania skrętności możemy zauważyć, że oba stany polaryzacji są jednoznacznie rozróżnialne. Ma to wiele zastosowań. Między innymi wykorzystujemy oba typy fal spolaryzowanych kołowo w kinach 3D.

Polaryzację kołową możemy uzyskać składając dwie fale o tych samych częstotliwościach i amplitudach, spolaryzowanych w kierunkach do siebie prostopadłych, ale przesuniętych względem siebie o  $\frac{1}{4}$  długości fali, czyli przesuniętych w fazie o  $90^\circ$  lub  $-90^\circ$  (patrz rysunki 4 (c)

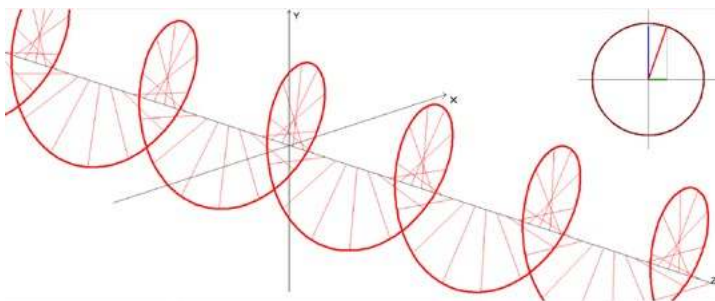


Rysunek 1. Fala harmoniczna przemieszczająca się wzdłuż osi Z spolaryzowana liniowo w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny XY i tworzącej kąt  $45^\circ$  z płaszczyzną XZ. Wstawka w prawym górnym rogu rysunku pokazuje linię, wzdłuż której drga koniec wektora natężenia pola elektrycznego zaczepiony w punkcie  $(0,0,0)$ .

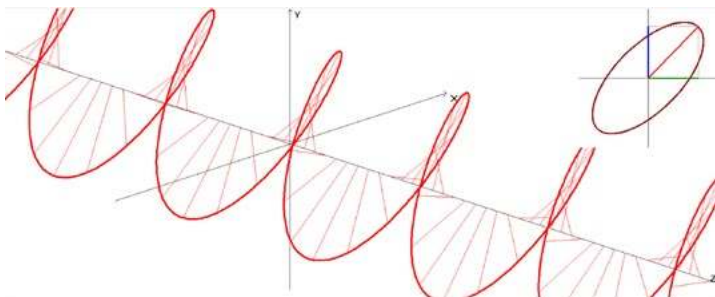


Rysunek 2. Fala niespolaryzowana przemieszczająca się wzdłuż osi Z. Wstawka w prawym górnym rogu rysunku pokazuje krzywą zakreślaną przez koniec wektora natężenia pola elektrycznego zaczepiony w punkcie  $(0,0,0)$ .

(a)



(b)



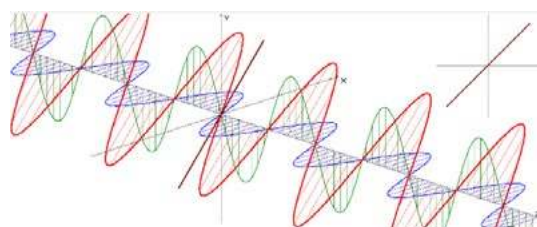
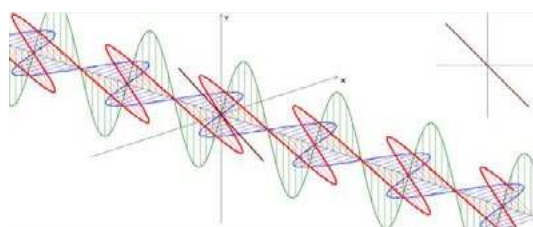
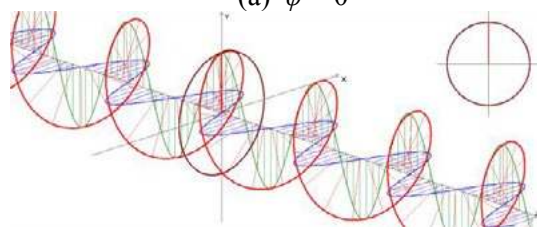
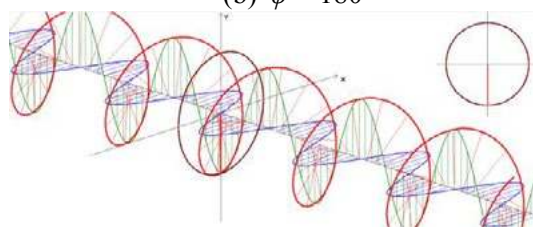
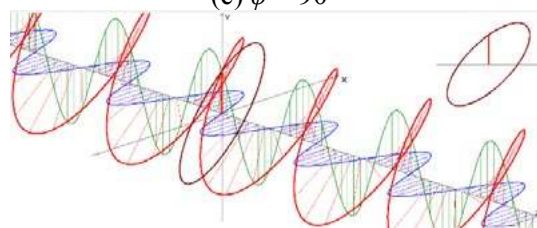
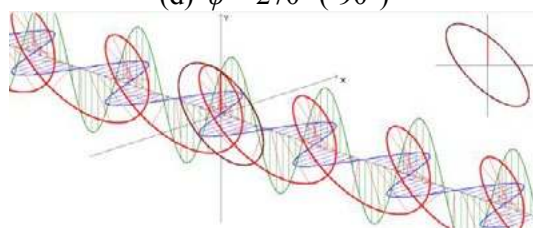
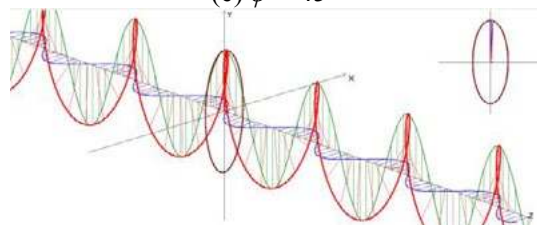
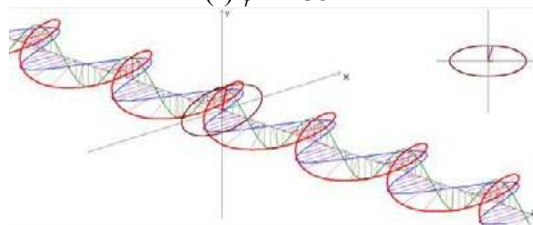
Rysunek 3. (a) Fala spolaryzowana kołowo. (b) Fala spolaryzowana eliptycznie.

i (d)). Jeśli przesunięcie w fazie będzie równe  $0^\circ$  (fale są zgodne w fazie) lub  $180^\circ$  (fale są przesunięte o pół długości fali), to złożenie fal da nam falę spolaryzowaną liniowo, odpowiednio pod kątem  $45^\circ$  lub  $135^\circ$  (patrz rysunki 4 (a) i (b)). Przy innych przesunięciach fazy dostaniemy falę spolaryzowaną eliptycznie (patrz rysunki 4 (e) i (f)). Falę spolaryzowaną eliptycznie możemy również otrzymać składając dwie fale spolaryzowane liniowo w płaszczyznach do siebie prostopadłych i nie przesuniętych w fazie, ale o różnych amplitudach (patrz rysunki 4 (g) i (h)).

### Ćwierćfalówka

W [1] opisywałem własności materiałów dwójłomnych na przykładzie kryształu kalcytu. Materiałów o takich własnościach jest więcej. Własności takie ma np. mika (minerał należący do grupy krzemianów), kwarc, niektóre polimery (np. poliwęglany), czy folia celulozowa, tzw. celofan.

Przypomnę, że materiały dwójłomne cechują się tym, że mają dwa nieco różne współczynniki załamania zależne od płaszczyzny polaryzacji światła. W konsekwencji światło padające na taki materiał rozdziela się na dwa promienie,

(a)  $\varphi = 0^\circ$ (b)  $\varphi = 180^\circ$ (c)  $\varphi = 90^\circ$ (d)  $\varphi = 270^\circ (-90^\circ)$ (e)  $\varphi = 45^\circ$ (f)  $\varphi = 135^\circ$ (g)  $\varphi = 0^\circ, A_y > A_x$ (h)  $\varphi = 0^\circ, A_y < A_x$ 

Rysunek 4. Złożenie dwóch fal (linie niebieskiej i zielonej) spolaryzowanych liniowo o tych samych amplitudach i częstotliwościach. Fala zielona (spolaryzowana w pionie) jest przesunięta w fazie względem fali niebieskiej (spolaryzowanej w poziomie) o podany na rysunkach kąt  $\varphi$ . W przypadku polaryzacji kołowej lub eliptycznej, gdy fala spolaryzowana w pionie wyprzedza falę spolaryzowaną w poziomie, mamy polaryzację prawoskrętną, a gdy spóźnia się, mamy polaryzację lewoskrętną. Na rysunkach (g) i (h) fale są zgodne w fazie, ale ich amplitudy są różne.

tw. promień zwyczajny i promień nadzwyczajny, przy czym promień zwyczajny spełnia prawo załamania Snelliusa [3], a promień nadzwyczajny nie spełnia tego prawa.

W materiałach dwójłomnych możemy wyróżnić dwie prostopadłe do siebie osie. Nazywamy je *osią szybką* i *osią wolną*. Nazwy wiążą się z faktem, że światło spolaryzowane wzdłuż osi szybkiej porusza się nieco szybciej niż światło spolaryzowane wzdłuż osi wolnej. Jeśli na materiał dwójłomny pada światło spolaryzowane liniowo wzdłuż osi szybkiej lub wzdłuż osi wolnej, to przejdzie ono przez materiał niezmienione (przejdzie tylko promień zwyczajny lub nadzwyczajny). Światło spolaryzowane liniowo w płaszczyźnie nierównoległej do osi szybkiej lub wolnej możemy złożyć z dwóch fal: fali spolaryzowanej wzdłuż osi szybkiej i fali spolaryzowanej wzdłuż osi wolnej o amplitudach będących rzutami amplitudy naszej fali na oś szybką i wolną. Pierwsza z tych fal składowych będzie poruszać się szybciej niż druga i na wyjściu z materiału będzie wyprzedzać drugą o pewną długość zależną od grubości warstwy i różnicy prędkości promienia szybkiego i wolnego. Różnica faz będzie wynosiła

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi d(n_n - n_z)}{\lambda},$$

gdzie  $d$  jest grubością warstwy,  $n_n$  współczynnikiem załamania promienia nadzwyczajnego,  $n_z$  współczynnikiem załamania promienia zwyczajnego, a  $\lambda$  długością fali.

Dla danej długości fali możemy tak dobrać grubość warstwy dwójłomnej, aby promień szybki wyprzedził promień wolny o  $\frac{1}{4}$  długości fali (czyli o  $\Delta\varphi = 90^\circ$ ). Z tak przygotowanego materiału wytwarzamy elementy optyczne nazywane *ćwierćfalówkami* [4]. Jeśli przesunięcie jest równe  $\frac{1}{2}$  długości fali, to mamy do czynienia z *półfalówką*.

Ustawmy naszą ćwierćfalówkę tak, że jej oś szybka będzie pionowa, a oś wolna pozioma. Skierujmy na nią światło spolaryzowane liniowo pod kątem  $45^\circ$  do poziomu. Taka fala będzie złożeniem dwóch fal o tych samych amplitudach i płaszczyznach polaryzacji pionowej i poziomej. Po wyjściu z ćwierćfalówki fala spolaryzowana pionowo będzie wyprzedzać falę spolaryzowaną poziomo o  $\frac{1}{4}$  długości fali. Złożeniem obu fal będzie fala pokazana na rysunku 4 (c). Będzie to fala spolaryzowana kołowo prawoskrętnie. Jeśli obrócimy ćwierćfalówkę o  $90^\circ$ , tak, że teraz oś wolna bę-

dzie w pionie, a oś szybka w poziomie, to na wyjściu dostaniemy falę przedstawioną na rysunku 4 (d). Będzie to fala spolaryzowana kołowo lewoskrętnie.

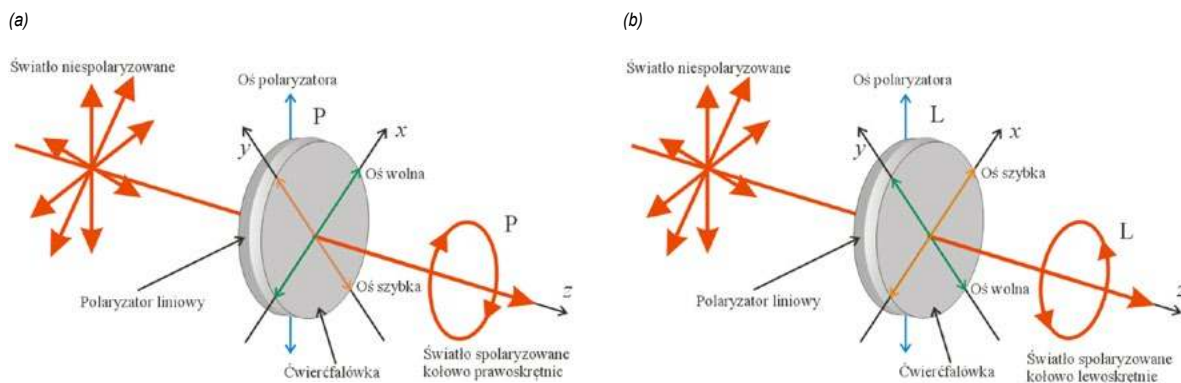
Gdybyśmy powtórzyli nasze eksperymenty z półfalówką zamiast ćwierćfalówki, to na wyjściu dostalibyśmy ponownie światło spolaryzowane liniowo, ale o płaszczyźnie polaryzacji prostopadłej do płaszczyzny polaryzacji światła padającego na półfalówkę, tak jak na rysunku 4 (a) lub (b).

Aby dostać światło spolaryzowane eliptycznie musielibyśmy zastosować materiał dwójłomny o innej grubości niż ćwierćfalówka lub półfalówka (wówczas przesunięcie fal będzie inne niż  $\frac{1}{4}$  lub  $\frac{1}{2}$  długości fali) lub rzucić na ćwierćfalówkę światło spolaryzowane liniowo pod innym kątem niż  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  lub  $90^\circ$ . W pierwszym przypadku, czyli wówczas, gdy grubość warstwy dwójłomnej jest inna niż ćwierćfalówki lub półfalówki, osie elipsy byłyby skierowane pod kątami  $45^\circ$  i  $135^\circ$  (jak na rysunkach 4 (e) i (f)). W drugim przypadku osie elipsy byłyby równoległe do osi szybkiej i wolnej (jak na rysunkach 4 (g) i (h)).

### Polaryzator kołowy

Korzystając z analizy przedstawionej w poprzednim punkcie widzimy, że polaryzator, który zmienia światło niespolaryzowane na spolaryzowane kołowo musi się składać z dwóch warstw. Pierwszą warstwą (tą na którą będzie padało światło) musi być polaryzator liniowy, który zamieni światło niespolaryzowane na spolaryzowane liniowo, a drugą płytka ćwierćfalowa z osią szybką lub wolną obróconą o kąt  $45^\circ$  względem osi polaryzacji polaryzatora liniowego. Jeśli ułożenie osi będzie takie jak na rysunku 5 (a), to na wyjściu otrzymamy światło spolaryzowane kołowo prawoskrętnie. Przy ułożeniu takim, jak na rysunku 5 (b) otrzymamy światło spolaryzowane kołowo lewoskrętnie.

Wyjaśnijmy dlaczego tak jest. Światło niespolaryzowane po przejściu przez warstwę polaryzatora liniowego stanie się światłem spolaryzowanym liniowo. W sytuacji z rysunku 5 będzie to polaryzacja pionowa. Po przejściu przez ćwierćfalówkę z rysunku 5 (a) składowa  $E_y$  pola elektrycznego będzie wyprzedzać składową  $E_x$  o  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ). W punkcie  $z = 0$ , położonym za ćwierćfalówką, obie składowe możemy opisać równaniami



Rysunek 5. (a) Polaryzator kołowy prawoskrętny. (b) Polaryzator kołowy lewoskrętny. Światło niespolaryzowane pada od strony warstwy polaryzatora liniowego. Na wyjściu dostajemy światło spolaryzowane kołowo prawoskrętnie lub lewoskrętnie zależnie od ułożenia osi szybkiej i wolnej względem osi polaryzatora liniowego. Skretność określono patrząc w kierunku źródła światła.

$$E_x(t) = E_0 \sin(\omega t),$$

$$E_y(t) = E_0 \sin(\omega t + \pi/2) = E_0 \cos(\omega t).$$

Koniec wektora natężenia pola elektrycznego w tym punkcie będzie poruszać się w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara, czyli prawoskrętnie, po okręgu

$$E_x^2 + E_y^2 = E_0^2.$$

W sytuacji z rysunku 5 (b) składowa  $E_x$  pola elektrycznego będzie wyprzedzać składową  $E_y$  o  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ). W punkcie  $z = 0$ , położonym za ćwierćfalówką, obie składowe możemy opisać równaniami

$$E_x(t) = E_0 \sin(\omega t + \pi/2) = E_0 \cos(\omega t),$$

$$E_y(t) = E_0 \sin(\omega t).$$

Koniec wektora natężenia pola elektrycznego w tym punkcie będzie poruszać się po tym samym okręgu co w przypadku (a), ale w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, czyli lewoskrętnie.

### Analizator polaryzacji kołowej

Do analizy polaryzacji kołowej stosujemy polaryzator kołowy, ale odwrócony o  $180^\circ$ , czyli tym razem światło pada od strony ćwierćfalówki, a nie od strony polaryzatora liniowego. Omówmy różne sytuacje.

a) Jeśli światło padające jest niespolaryzowane, to po przejściu przez ćwierćfalówkę będzie światłem spolaryzowanym eliptycznie. Każdą taką falę możemy rozłożyć na dwie fale przesunięte odpowiednio w fazie i spolaryzowane liniowo (jedną spolaryzowaną w płaszczyźnie równoległej do osi polaryzatora liniowego stojącego za ćwierćfalówką i drugą prostopadłą do tamtej). Polaryzator liniowy stojący za ćwierćfalówką przepuści jedynie składowe równoległe do swojej osi. I ostatecznie na wyjściu dostajemy światło spolaryzowane liniowo równoległe do osi polaryzatora. Ponieważ koniec wektora natężenia pola elektrycznego porusza się po elipsie, to rzut tego wektora na oś polaryzatora liniowego będzie się cyklicznie zmieniał z częstotliwością fali od wartości 0, gdy wektor jest prostopadły do osi polaryzatora, do jakiejś wartości maksymalnej zależnej od kształtu elipsy. Światło przejdzie przez polaryzator. Jego natężenie będzie zmieniało

się cyklicznie, ale ze względu na dużą częstotliwość fal świetlnych oko ludzkie tych zmian nie zarejestruje. Zobaczymy uśrednione światło o uśrednionym natężeniu.

- b) Jeśli światło padające jest spolaryzowane liniowo wzdłuż osi wolnej lub szybkiej, to przejdzie przez ćwierćfalówkę niezmiennie. Następnie pada na polaryzator liniowy, który przepuści tylko składową równoległą do osi polaryzatora. Na wyjściu dostajemy światło spolaryzowane liniowo równoległe do osi polaryzatora. Przy innych kątach polaryzacji, po przejściu przez ćwierćfalówkę światło zmieni polaryzację na eliptyczną (lub kołową, gdy kąt polaryzacji z osiami wolną i szybką będzie równy  $45^\circ$ ) i dalej będzie tak jak w punkcie a).
- c) Jeśli światło padające jest spolaryzowane kołowo prawoskrętnie i pada na ćwierćfalówkę odwróconego polaryzatora kołowego prawoskrętnego, to teraz składowa  $E_x$  wyprzedzi składową  $E_y$  o  $90^\circ$ , gdyż ze względu na obrót polaryzatora kołowego oś szybka będzie leżeć wzdłuż osi  $X$ , a oś wolna wzdłuż osi  $Y$  (patrz rysunek 6 (a)). W konsekwencji fazy obu fal składowych wyrównają się. Obie składowe możemy opisać równaniami

$$E_x(t) = E_0 \sin(\omega t + \pi/2), \quad E_y(t) = E_0 \sin(\omega t + \pi/2).$$

Koniec wektora natężenia pola elektrycznego w tym punkcie będzie drgać wzdłuż prostej

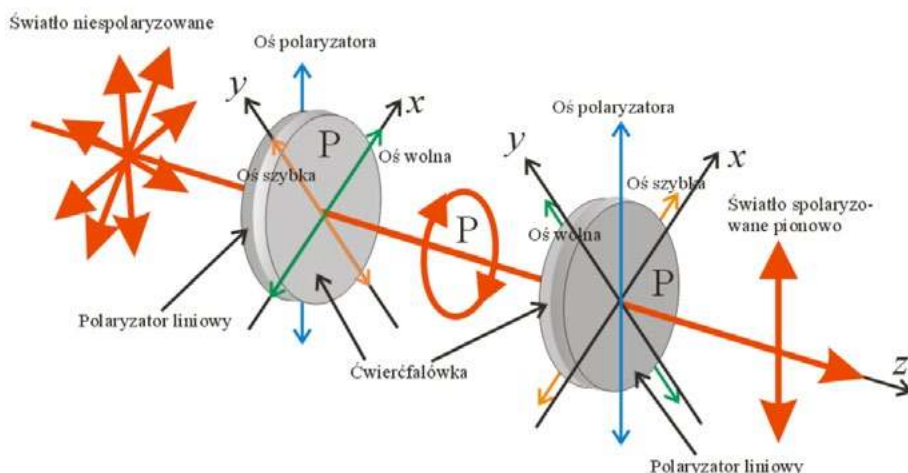
$$E_y(t) = E_x(t).$$

Czyli otrzymamy światło spolaryzowane liniowo w płaszczyźnie równoległej do osi polaryzatora stojącego za ćwierćfalówką (patrz rysunek 6). Wobec tego światło przejdzie przez analizator i będzie światłem spolaryzowanym liniowo.

- d) Jeśli światło padające jest spolaryzowane kołowo lewoskrętnie i pada na ćwierćfalówkę odwróconego polaryzatora kołowego prawoskrętnego, to przed ćwierćfalówką składowa  $E_x$  wyprzedza składową  $E_y$  o  $90^\circ$ . Ćwierćfalówka analizatora prawoskrętnego ma oś szybką wzdłuż osi  $X$ , więc ponownie przyspieszy tą składową o  $90^\circ$ . I teraz przesunięcie wyniesie już  $180^\circ$  ( $\pi$ ). Obie składowe możemy opisać równaniami

$$E_x(t) = E_0 \sin(\omega t + \pi) = -E_0 \sin(\omega t),$$

$$E_y(t) = E_0 \sin(\omega t)$$



Rysunek 6. Światło niespolaryzowane pada na polaryzator kołowy prawoskrętny. Po wyjściu z polaryzatora dostajemy światło spolaryzowane kołowo prawoskrętnie. Następnie światło pada na analizator prawoskrętny (polaryzator światła kołowego prawoskrętnego odwrócony ćwierćfalówką w kierunku źródła światła). Po przejściu przez ćwierćfalówkę analizatora światło zmieni się w światło spolaryzowane liniowo w płaszczyźnie równoległej do osi polaryzatora i wobec tego przejdzie przez analizator jako światło spolaryzowane liniowo. Skrętność określono patrząc w kierunku źródła światła.

Koniec wektora natężenia pola elektrycznego w tym punkcie będzie drgać wzdłuż prostej

$$E_y(t) = -E_x(t).$$

Czyli otrzymamy światło spolaryzowane liniowo w płaszczyźnie prostopadłej do osi polaryzatora stojącego za ćwierćfalówką (patrz rysunek 7). Wobec tego światło nie przejdzie przez analizator.

- e) Analogicznie będzie w przypadku lewoskrętnego analizatora. Przepuści on tylko światło spolaryzowane kołowo lewoskrętnie, a zablokuje światło spolaryzowane kołowo prawoskrętnie.

Opisane powyżej działanie polaryzatora kołowego i analizatora polaryzacji kołowej jest poprawne w przypadku konkretnej długości światła takiej, dla której warstwa dwójłonna jest ćwierćfalówką. Przypomnę, że grubość ćwierćfalówki ściśle zależy od długości fali. A zatem jeśli na taki polaryzator pada światło o innej długości, to przesunięcie fazowe będzie różne od  $90^\circ$  i polaryzator zmieni je na światło spolaryzowane eliptycznie.

Polaryzatory w okularach używanych w kinach 3D na ogół mają warstwy dwójłonne będące ćwierćfalówkami dla fali świetlnej o długości 550 nm. Jest to światło o barwie zielonej, na którą najbardziej czułe jest ludzkie oko. Fale o innych długościach będą wówczas polaryzowane eliptycznie. Nie ma to znaczenia w przypadku takim jak na rysunku 6, gdyż po przejściu przez ćwierćfalówkę analizatora dla każdej długości fal fazy fali szybkiej i wolnej wyrównają się niezależnie od tego o jaką wartość fazy ćwierćfalówka przesunęła falę o danej długości. Ale w sytuacji z rysunku 7 będzie to miało duże znaczenie.

W przypadku płytki wykonanej z kwarcu będącej ćwierćfalówką dla fali o długości 550 nm przesunięcia fazowe będą zmieniać się od ok.  $59^\circ$  dla fali czerwonej do ok.  $186^\circ$  dla fali fioletowej. W tabeli 1 pokazano przesunięcia fazowe po przejściu przez taką ćwierćfalówkę dla pięciu wybranych barw. Odpowiadające tym przesunięciom kształty elips pokazano na rysunku 8 (a).

Jeśli wykonamy eksperyment przedstawiony na rysunku 7, to po przejściu przez ćwierćfalówkę analizatora fazy z tabeli 1 podwoją się. I teraz elipsy będą wyglądać tak jak na rysunku 8 (b). Jak widzimy dokładnie zablokowana będzie fala zielona, a najmniej fioletowa. Polaryzacja eliptyczna fali fioletowej jest już bardzo zbliżona do pola-

**Tabela 1. Przesunięcie fazowe między falą szybką i wolną w płytce kwarcowej będącej ćwierćfalówką dla fali od długości 550 nm dla pięciu wybranych długości fal.**

| Barwa        | długość [nm] | $\Delta\phi$ [ $^\circ$ ] |
|--------------|--------------|---------------------------|
| fioletowa    | 400          | 186                       |
| niebieska    | 475          | 139                       |
| zielona      | 550          | 90                        |
| pomarańczowa | 625          | 66                        |
| czerwona     | 700          | 59                        |

ryzacji liniowej w płaszczyźnie równoległej do osi polaryzatora liniowego znajdującego się za ćwierćfalówką analizatora, więc światło fioletowe będzie najintensywniejsze (patrz rysunek 10 (c)).

Takie działanie okularów 3D byłoby bardzo niekorzystne, ale wystarczy, że polaryzator kołowy z rysunku 7 obrócimy wokół osi Z o  $90^\circ$  tak jak pokazano na rysunku 9. Teraz po przejściu przez warstwę polaryzatora liniowego (pierwszego) czyli przed ćwierćfalówką składowe pola elektrycznego będą miały postać

$$E_x(t) = -E_0 \sin(\omega t), \quad E_y(t) = E_0 \sin(\omega t).$$

Po wyjściu z polaryzatora kołowego lewoskrętnego składowa  $E_y$  przesunie się o  $\Delta\phi$  w stosunku do składowej  $E_x$ , a po przejściu przez ćwierćfalówkę analizatora składowa  $E_x$  przesunie się o  $\Delta\phi$  i teraz będziemy mieć

$$E_x(t) = -E_0 \sin(\omega t + \Delta\phi), \quad E_y(t) = E_0 \sin(\omega t + \Delta\phi).$$

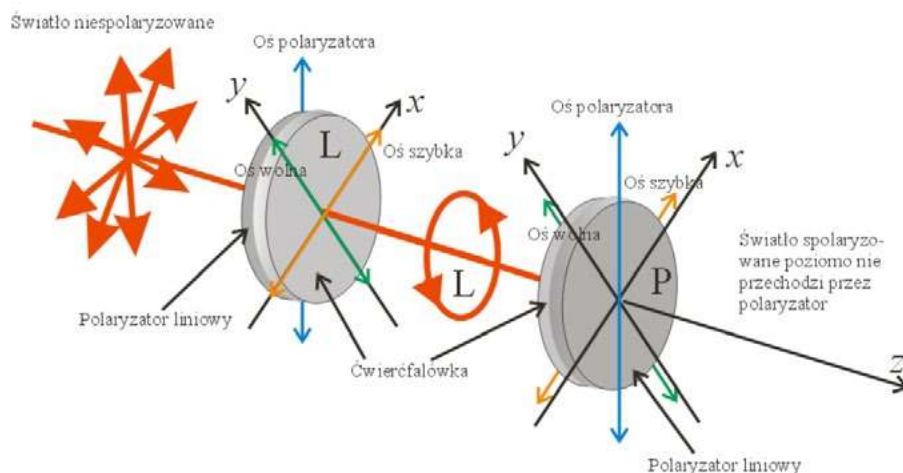
W ten sposób dostajemy falę spolaryzowaną liniowo wzdłuż prostej

$$E_y(t) = -E_x(t).$$

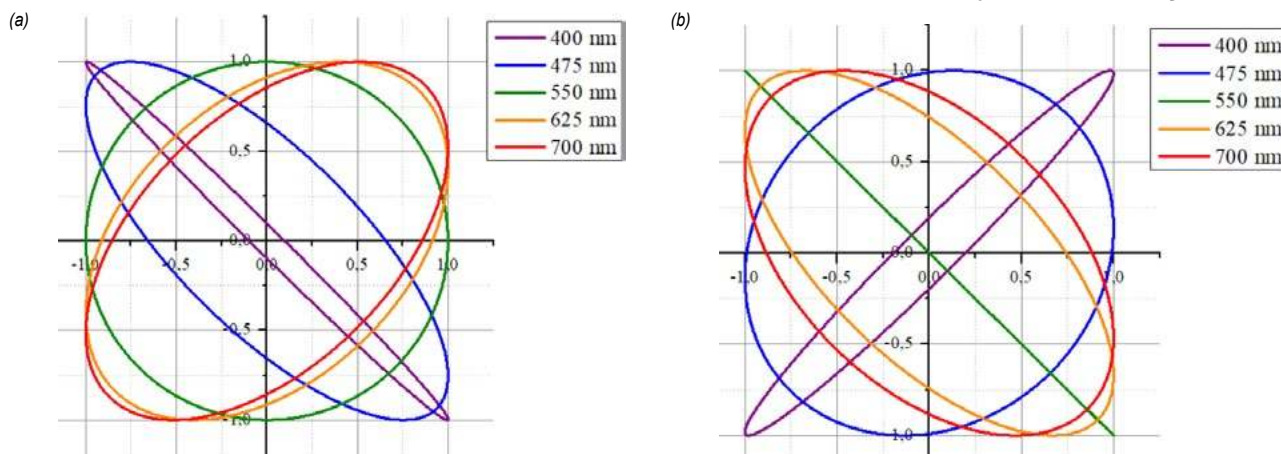
Jest ona prostopadła do osi polaryzatora liniowego w analizatorze niezależnie od długości fali i wynikających stąd przesunięć fazowych (różnych dla fal o różnych długościach), więc żadna z fal nie przejdzie. Analizator kołowy prawoskrętny nie przepuści światła spolaryzowanego lewoskrętnie. I podobnie polaryzator kołowy lewoskrętny nie przepuści światła spolaryzowanego prawoskrętnie.

## Zastosowanie światła spolaryzowanego

Światło spolaryzowane (liniowo lub kołowo) ma szerokie zastosowanie w różnych dziedzinach nauki, techniki i przemysłu. Oto tylko niektóre z zastosowań:



Rysunek 7. Światło niespolaryzowane pada na polaryzator kołowy lewoskrętny. Po wyjściu z polaryzatora dostajemy światło spolaryzowane kołowo lewoskrętnie. Następnie światło pada na analizator prawoskrętny (polaryzator światła kołowego prawoskrętnego odwrócony ćwierćfalówką w kierunku źródła światła). Po przejściu przez ćwierćfalówkę analizatora światło zmienia się w światło spolaryzowane liniowo w płaszczyźnie prostopadłej do osi polaryzatora i wobec tego analizator zablokuje to światło, ale tylko w przypadku fal, dla których warstwa dwójłonna jest ćwierćfalówką. Skrętność określono patrząc w kierunku źródła światła.



Rysunek 8. (a) Elipsy, po których porusza się koniec wektora natężenia pola elektrycznego po przejściu przez polaryzator kołowy z ćwierćfalówką kwarcową dla światła o długości 550 nm. (b) Elipsy, po których porusza się koniec wektora natężenia pola elektrycznego po przejściu przez ćwierćfalówkę analizatora w przypadku takim jak na rysunku 7. Jednostki na osiach są umowne.

### Mikroskopia polaryzacyjna

W badaniach naukowych zwłaszcza w biologii i mineralogii, używa się światła spolaryzowanego kołowo w tzw. mikroskopach polaryzacyjnych [5] do badania próbek, które mogą wykazywać dwójłomność. Polaryzacja kołowa pomaga w uzyskaniu lepszego kontrastu i w identyfikacji struktur wewnętrznych próbek.

### Komunikacja optyczna

W niektórych systemach komunikacji światłowodowej, a także bezprzewodowej komunikacji optycznej (*Free Space Optics*) stosuje się światło spolaryzowane kołowo [6]. Również fale radiowe stosowane w niektórych systemach komunikacji są polaryzowane kołowo. Pozwala to zminimalizować zakłócenia i poprawić jakość sygnału.

### Fotografia

W kamerach i aparatach fotograficznych używanych przez specjalistów stosowane są filtry polaryzacyjne kołowe (lub liniowe). Stosujemy je m.in. do redukcji odbłasków od powierzchni niemetalicznych takich jak woda czy szkło, zwiększenia nasycenia kolorów, zwiększenia kontrastu przy fotografowaniu chmur na niebie i wielu innych efektów poprawiających jakość zdjęć [7].

### Kinematografia 3D

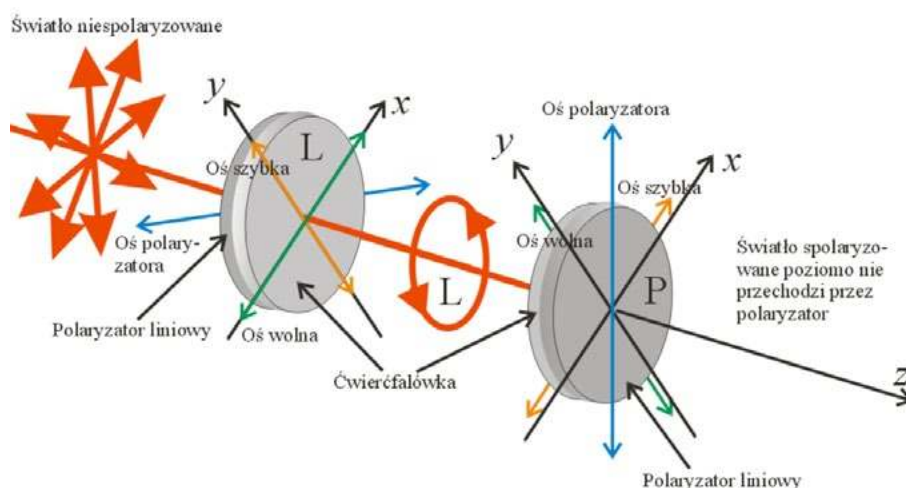
Światło spolaryzowane kołowo jest wykorzystywane w niektórych systemach kinematografii stereoskopowej.

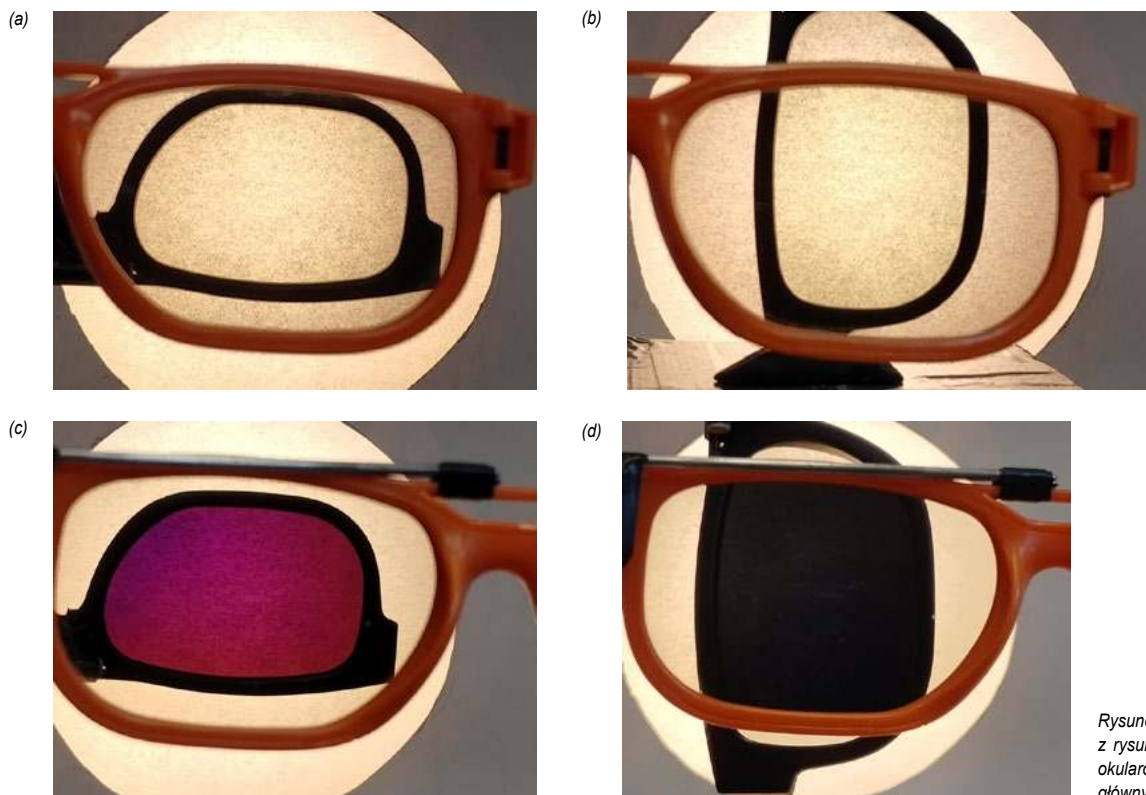
Dzięki niej możemy w kinach 3D oglądać filmy trójwymiarowe. Efekt trójwymiarowości wymaga dostarczania do lewego oka obrazu nieco przesuniętego w poziomie w stosunku do obrazu dostarczanego do oka prawego. Kamery rejestrujące obrazy trójwymiarowe wyposażone są w dwa obiektywy przesunięte względem siebie w poziomie. Projektor w kinie 3D wysyła na ekran, obraz zarejestrowany lewym obiektywem używając światła spolaryzowanego kołowo lewoskrętnie oraz obraz zarejestrowany prawym obiektywem używając światła spolaryzowanego kołowo prawoskrętnie. Widz wyposażony jest w okulary, w których szkło lewe przepuszcza tylko światło spolaryzowane kołowo lewoskrętnie, a szkło prawe prawoskrętnie.

### Doświadczenia z okularami 3D

Disponując parą okularów z kina 3D możemy przetestować sytuacje związane z rysunkami od 6 do 9. Szkła tych okularów składają się z dwóch warstw. Warstwą zewnętrzną (patrząc od strony oka) jest warstwa ćwierćfalówki (dla długości 550 nm), a warstwą znajdującą się od strony oka jest warstwa polaryzatora liniowego z odpowiednio ustawioną osią polaryzacji, tak aby lewe szkło przepuszczało światło spolaryzowane eliptycznie lewoskrętnie, a szkło prawe prawoskrętnie. A zatem będąc widzami używamy okularów 3D jako analizatorów polaryzacji eliptycznej. Jeśli odwrócimy je to staną się polaryzatorami zmieniającymi światło niespolaryzowane w światło spolaryzowane eliptycznie – lewoskrętnie

Rysunek 9. Światło niespolaryzowane pada na polaryzator kołowy lewoskrętny o innym ustawieniu niż na rysunku 8. Po wyjściu z polaryzatora dostajemy światło spolaryzowane kołowo lewoskrętnie. Następnie światło pada na analizator prawoskrętny (polaryzator światła kołowego prawoskrętnego odwrócony ćwierćfalówką w kierunku źródła światła). Po przejściu przez ćwierćfalówkę analizatora światło zmienia się w światło spolaryzowane liniowo w płaszczyźnie prostopadłej do osi polaryzatora i wobec tego analizator zablokuje to światło. I będzie tak niezależnie od długości fali. Skrętność określono patrząc w kierunku źródła światła.





Rysunek 10. Realizacja układów z rysunków 6, 7, 9 przy użyciu okularów kina 3D (opis w tekście głównym).

w przypadku lewego szkła i prawoskrętnie w przypadku szkła prawego.

Jeśli na prawe szkło takich okularów skierujemy, od strony folii polaryzacyjnej, światło białe niespolaryzowane, to na wyjściu dostaniemy mieszaninę fal spolaryzowanych eliptycznie prawoskrętnie o różnych kształtach elips, po których porusza się koniec wektora pola elektrycznego zależnie od długości fali (patrz rysunek 8 (a); dla fali o długości 550 nm będzie to polaryzacja kołowa). Ustawmy teraz na drodze tego światła prawe szkło drugiej pary okularów w taki sposób, żeby światło padało na nie od strony ćwierćfalówki (tak jak w kinie 3D). Realizujemy w ten sposób układ z rysunku 6. Jak opisano w punkcie c) światło będzie przechodzić przez taki układ i na wyjściu będzie spolaryzowane liniowo. Będzie tak niezależnie od tego jak będą skrócone względem siebie oba szkła (przedstawiono to na rysunku 10 (a) i (b)). Dlatego zastosowanie technologii opartej na świetle spolaryzowanym eliptycznie jest rozwiązaniem mniej podatnym na przechyłanie głowy przez widza. W systemach, w których wykorzystuje się polaryzację liniową przechyłanie głowy zakłóca prawidłowy odbiór 3D.

Zrealizujmy teraz układ z rysunku 7, na którym za polaryzatorem zmieniającym światło niespolaryzowane w światło spolaryzowane prawoskrętnie kołowo (dla wybranej długości i eliptycznie dla pozostałych) stoi analizator światła spolaryzowanego lewoskrętnie, przy czym osie szybkie (i wolne) obu elementów są do siebie równoległe. Pierwszym szkłem będzie ponownie prawe szkło okularów 3D ustawione jak poprzednio, ale na drodze tak otrzymanego światła spolaryzowanego eliptycznie prawoskrętnie ustawmy lewe szkło okularów skierowane ćwierćfalówką w stronę światła. Elipsy, po których porusza się wektor natężenia pola elektrycznego fal o różnych długościach, po przejściu przez ćwierćfalówkę drugiego szkła

zmieniają się w elipsy z rysunku 8 (b). Światło zielone stanie się światłem spolaryzowanym liniowo w płaszczyźnie prostopadłej do osi polaryzatora liniowego i zostanie zablokowane przez folię polaryzacyjną drugiego szkła. Ale inne fale przejdą, przy czym najintensywniejsze będzie światło fioletowe, które stanie się światłem spolaryzowanym eliptycznie o bardzo wąskiej elipsie z osią długą równoległą do osi polaryzatora liniowego drugiego szkła (patrz rysunek 8 (b)). Taką sytuację pokazano na rysunku 10 (c).

Na koniec dokonajmy jednej zmiany. Skręćmy o  $90^\circ$  względem osi optycznej pierwsze (lub drugie) szkło tak, żeby osie szybkie (i wolne) obu ćwierćfalówek tworzyły ze sobą kąt  $90^\circ$ . Realizujemy w ten sposób układ z rysunku 9. W konsekwencji, jak opisano wyżej, po przejściu przez ćwierćfalówkę drugiego szkła, wszystkie fale będą spolaryzowane liniowo w płaszczyźnie prostopadłej do osi polaryzatora liniowego drugiego szkła i światło zostanie zablokowane (patrz rysunek 10 (d)).

dr Jan Kurzyk

Katedra Fizyki Politechniki Krakowskiej

#### LITERATURA

- [1] Jan Kurzyk. *Polaryzacja liniowa światła*. Fizyka w szkole 2, 2025.
- [2] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Polaryzacja\\_fali](https://pl.wikipedia.org/wiki/Polaryzacja_fali). [Dostęp 21.01.2025].
- [3] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo\\_Snelliusa](https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Snelliusa). [Dostęp 21.01.2025].
- [4] [https://pl.wikipedia.org/wiki/P%C5%82ytka\\_%C4%87wier%C4%87falowa](https://pl.wikipedia.org/wiki/P%C5%82ytka_%C4%87wier%C4%87falowa). [Dostęp 21.01.2025].
- [5] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Mikroskop\\_polaryzacyjny](https://pl.wikipedia.org/wiki/Mikroskop_polaryzacyjny).
- [6] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Free\\_Space\\_Optics](https://pl.wikipedia.org/wiki/Free_Space_Optics).
- [7] <https://notopstryk.pl/na-czym-polega-magia-filtrow-polaryzacyjnych>.

**Sprostowanie:** W artykule „Polaryzacja liniowa światła” w nr 2/2025 „Fizyki w Szkole” na rysunku 3 (b) omyłkowo umieściłem zdjęcie Louisa de Broglie’a zamiast Heinricha Hertza.

# Rosalind Elsie Franklin

## Kulisy odkrycia struktury DNA

Czasem wkład naukowca jest niedoceniany, czasem ma pecha, a czasem jego praca jest przywłaszczana przez innych. Znaleźć się przecież takie przypadki i o jednym z nich piszemy poniżej. Nie wiemy w istocie, czy gdyby nie przedwczesna śmierć Rosalind Franklin nie dostałaby nagrody Nobla za swój cenny wkład do rozwoju nauki o DNA.

Kazimierz Mikulski

Dwaj naukowcy, Matthew Cobb i Nathaniel Comfort, zbierając materiały do biografii laureatów nagrody Nobla z 1953 r., za odkrycie modelu budowy przestrzennej podwójnej helisy DNA - Jamesa Watsona i Francis Cricka, w 2022 r. odwiedzili archiwum R.E. Franklin w Churchill College w Cambridge w Wielkiej Brytanii.

Przejrzeni notatki sporządzone przez uczoną **Rosalind Elsie Franklin** (1920-1958) i dokonali, jak sami piszą na łamach czasopisma *Natura* (2023), rekonstrukcji rozwoju jej idei badawczej dotyczącej budowy DNA.

Analiza znalezionych dokumentów pozwoliła im zasugerować ciekawszą wersję odkrycia podwójnej helisy niż funkcjonującą wówczas w świecie nauki. Otóż, jak piszą wspomniani badacze: „*Franklin nie omieszkala zrozumieć struktury DNA, ale jednocześnie wniosła równy wkład w jej rozwiązanie*.”<sup>1</sup> Te odkryte źródła pozwalają wskazać, że **R. E. Franklin** miała znaczący wkład w odkrycie

struktury DNA (**Kwas deoksyrybonukleinowy**, (ang. *deoxyribonucleic acid*), równy z Watsonem, Crickiem i Wilkinsem, których uznano za jedynych odkrywców i uhonorowano ich nagrodą Nobla w 1962 r. właśnie za odkrycie struktury kwasu deoksyrybonukleinowego (DNA).<sup>2</sup>

Nowe dane przesądają, że badaczka Franklin zdawała sobie sprawę, że kwas deoksyrybonukleinowy ma strukturę helisy. Jednak interpretacją wydarzeń sprzed 70. lat zawłaszczyli mężczyźni.<sup>3</sup> Przeoczony list i nieopublikowany artykuł prasowy, oba napisane w 1953 r., ujawniają, że była równym graczem w badaniach przyrody jako chemik fizyczny.

### Krótką historia poznania DNA

DNA zostało odkryte w 1869 r. przez Johanna Friedricha Mieschera, lecz przez prawie 100 lat jego struktura pozostawała zagadką.

Jednak w dniu 1 lutego 1944 r. w artykule z *Journal of Experimental Medicine* zespół Maca McCarty'ego wykazał po raz pierwszy, że DNA jest materiałem dziedziczenia, tak



Fotografia 1. Johann Friedrich Miescher, (1844-1895) szwajcarski badacz metabolizmu komórki oraz odkrywca kwasów nukleinowych. Źródło: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bc/Friedrich\\_Miescher.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/b/bc/Friedrich_Miescher.jpg)

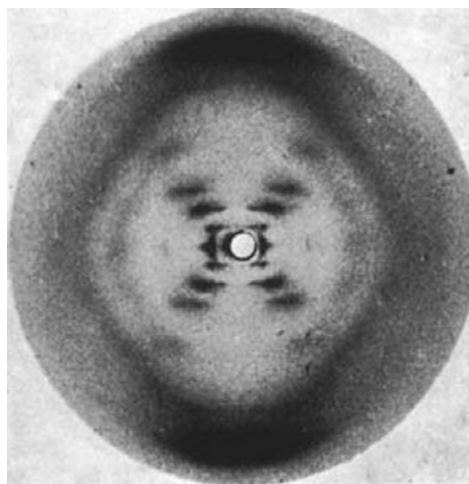
Fotografia 2. Praca badawcza w laboratorium Rosalind Elsie Franklin (1920-1958) w 1955 r. Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Rosalind\\_Franklin#/media:Plik:Rosalind\\_Franklin.jpg](https://pl.wikipedia.org/wiki/Rosalind_Franklin#/media:Plik:Rosalind_Franklin.jpg)

Fotografia 3. Raymond George Gosling (1926–2015) był brytyjskim naukowcem, który podczas studiów doktoranckich w King's College w Londynie pracował pod nadzorem Maurice'a Wilkinca i Rosalind Franklin. Źródło: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Raymond\\_Gosling.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Raymond_Gosling.jpg)

<sup>1</sup> Matthew Cobb, Nathaniel Comfort, What Rosalind Franklin truly contributed to the discovery of DNA's structure, *Jaki prawdziwy wkład w odkrycie struktury DNA wniosła Rosalind Franklin?* <https://www.nature.com/articles/d41586-023-01313-5> *Natura* 616, 657-660 (2023)

<sup>2</sup> Stanisławski A., *Co naprawdę wniosła Rosalind Franklin do odkrycia struktury dna? Czy rzeczywiście nie wiedziała, co odkryła?* <https://www.crazynauka.pl/co-naprawde-wniosla-rosalind-franklin-do-odkrycia-struktury-dna-czy-rzeczywiscie-nie-wiedziala-co-odkryla/>

<sup>3</sup> Kubiak J., *Rosalind Franklin ostatecznie wychodzi z cienia. Miała równorzędny wkład w odkrycie struktury DNA*, <https://www.projektpulsar.pl/czlowiek/2210848,1,rosalind-franklin-ostatecznie-wychodzi-z-cienia-miala-rownorzedny-wklad-w-odkrycie-struktury-dna.read>



Fotografia 4. Rosalind Franklin (1920-1958) i jej autorstwa dokładny rentgenogramu sodowej soli DNA, który był elementem pracy Watsona i Cricka. Źródło: <https://www.crazynauka.pl/co-naprawde-wniosla-rosalind-franklin-do-odkrycia-struktury-dna-czy-rzeczywiscie-nie-wiedziala-co-odkryla/>

zwaną materią życia. Do tego czasu biolodzy uważali, że „geny”, jednostki dziedziczenia, są zbudowane z białka.

### Jak to było z odkryciem struktury DNA?

Do 2022 r. istniała jednak kontrowersja dotycząca etyki zachowania w tamtym czasie dyrektora Cavendish Laboratory sir Williama Lawrence’a Bragga i Maurice’a Wilkina, którzy udostępnili rentgenogramy Franklin Crickowi i Watsonowi bez jej wiedzy.

Przytoczone wcześniej informacje i opublikowane artykuły, oba napisane w 1953 r., to dowody wskazujące na to, że Rosalind Franklin miała równorzędny udział w odkryciu struktury DNA. Niestety wcześniej przedstawiano ją jako nieświadomą znaczenia swoich badań ofiarę, której naukowe wyniki, w tym słynne „Zdjęcie 51” ukazujące podwójną helisę DNA, zostały jej po prostu ukradzione.

### Jeden z najważniejszych elementów w drodze do odkrycia DNA to „Zdjęcie 51”

Rosalind Franklin była specjalistką w dziedzinie analizy budowy cząsteczek chemicznych za pomocą rentgenografii strukturalnej, którą to technikę znacznie udoskonaliła. W Laboratorium Cavendisha na Uniwersytecie Cambridge prowadziła wraz ze swoim przełożonym, Maurice’em Wilkinsem, badania rentgenograficzne nad DNA.

To z jej laboratorium pochodziła słynna fotografia o nazwie „Zdjęcie 51”, która – jak głosi najbardziej znana wersja tej historii<sup>4</sup> – doprowadziła do przełomu w nauce i legła u podstaw pracy, badaczy pracujących w innym, konkurencyjnym zespole.

Słynne już „Zdjęcie 51” wykonane w 1952 r. to rentgenogram sodowej soli DNA. Bezpośrednim autorem był Raymond George Gosling (1926–2015), doktorant pracujący pod kierunkiem Franklin. Już po otrzymaniu nagrody Nobla

Crick i Watson potwierdzili, że bez wykonanych przez Franklin zdjęć, a zwłaszcza „Zdjęcie 51”, oraz ich opisów nie stworzyliby poprawnego modelu podwójnej helisy DNA.

R. G. Gosling wykonał jako pierwszy w historii badań naukowych obraz dyfrakcji rentgenowskiej skryształizowanego DNA. Jego komentarz do tego odkrycia brzmiał: „Muszę być pierwszą osobą, która kiedykolwiek doprowadziła do krystalizacji genów”, chociaż prawdopodobnie nie był świadomy wcześniejszych prac Florence Bell<sup>5</sup> i W. A. Astbury.

Chociaż Astbury zbudował swoją karierę na badaniu białek, to zainteresował się badaniem DNA, które w tamtym czasie uważano za niewiele więcej niż nudną, powtarzalną cząsteczkę niezdolną do spełnienia jakiegokolwiek ważnej roli.

W 1931 r. Astbury był również pierwszym, który zaproponował, że wiązania wodorowe między grupami amidowymi szkieletu przyczyniają się do stabilizacji struktur białkowych. Natomiast w 1937 r. Szwed Torbjörn Caspersson wysłał mu dobrze przygotowane próbki DNA z grasicy cielęcej. Fakt, że DNA dawało obraz dyfrakcyjny, wskazywał, że miało ono również regularną strukturę i możliwe było jej wywnioskowanie. Kiedy w 1937 r. Astbury napisał do Bragga, że szuka dobrego krystalografa rentgenowskiego, Bragg wskazał, że Bell będzie „doskonałym kandydatem”, który naprawdę wykona dobrze swoją pracę.

Astbury szybko rozpoznał talent Bell i powierzył jej reprezentowanie pracy badawczej swojego laboratorium na konferencji w 1939 r. Przedstawiła ona, że „początki życia [były] wyraźnie związane z interakcją białek i kwasów nukleinowych”. Bell i Astbury opublikowali badanie rentgenowskie DNA w 1938 r., w *Nature* 141, opisując nukleotydy jako „stos groszowy”.<sup>7</sup>

<sup>4</sup> więcej w: Attar N., Raymond Gosling: the man who crystallized genes, *Raymond Gosling: człowiek, który skryształizował geny*, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3663117/>

<sup>5</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Raymond\\_Gosling](https://en.wikipedia.org/wiki/Raymond_Gosling)

<sup>6</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Florence\\_Bell\\_\(scientist\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Florence_Bell_(scientist))

<sup>7</sup> Astbury, WT; Bell, Florence O., „Badanie rentgenowskie kwasu tymonukleinowego”. *Nature* 141 (3573): 747–748. <https://www.nature.com/articles/141747b0>



Fotografia 6. Florence Ogilvy Bell (1913–2000), późniejsza Florence Sawyer, była brytyjską badaczką, która przyczyniła się do odkrycia struktury DNA. Była krystalografem rentgenowskim w laboratorium Williama Astbury'ego. W 1938 r. opublikowali artykuł w *Nature*, w którym opisali strukturę DNA jako „stos monet”.<sup>6</sup> Praca Bell pomogła położyć podwaliny pod nową naukę „biologii molekularnej” i jedno z największych odkryć XX wieku – strukturę DNA. Źródło: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Florence\\_Bell\\_in\\_the\\_Yorkshire\\_Evening\\_News\\_in\\_23\\_March\\_1939.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6f/Florence_Bell_in_the_Yorkshire_Evening_News_in_23_March_1939.jpg)

Fotografia 7. William Thomas Astbury (1898–1961) był angielskim fizykiem i biologiem molekularnym. Przeprowadził pionierskie badania dyfrakcji rentgenowskiej cząsteczek biologicznych. W 1937 r. badał również strukturę DNA i wykonał pierwszy krok w kierunku wyjaśnienia jego struktury. [https://en.wikipedia.org/wiki/William\\_Astbury](https://en.wikipedia.org/wiki/William_Astbury). Źródło: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/2/27/William\\_Thomas\\_Astbury.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/2/27/William_Thomas_Astbury.jpg)

Praca Bell wykazała, że DNA ma regularną uporządkowaną strukturę, nadającą się do analizy za pomocą krystalografii rentgenowskiej. Dzięki intensywnym badaniom Bell była również w stanie podać kluczowe pomiary dotyczące wymiarów cząsteczki. Dane te dały J. Watsonowi i F. Crickowi ważny punkt zaczepienia, gdy rozpoczęli własną pracę nad DNA.

W swoim artykule Bell i Astbury podali, że struktura DNA powtarza się co 2,7 nanometra, a zasady leżą płasko, ułożone w stos, w odległości 0,34 nanometra od siebie. Na sympozjum w 1938 r. w badacze z *Cold Spring Harbor*<sup>8</sup> zauważyli, że odstęp 0,34 nanometra był taki sam, jak między aminokwasami w łańcuchach polipeptydowych. (Obecnie akceptowana wartość odstępów między zasadami w formie B DNA wynosi 0,332 nm.)

W 1946 r. Astbury stwierdził: „Biosynteza jest przede wszystkim kwestią dopasowania cząsteczek lub części cząsteczek do siebie, a jednym z największych osiągnięć biologicznych naszych czasów jest uświadomienie sobie, że prawdopodobnie najbardziej fundamentalną interakcją we wszystkich jest interakcja między białkami i kwasami nukleinowymi”. Powiedział również, że odstęp między nukleotydami, czyli odstęp między aminokwasami w białkach „nie były arytmetycznym przypadkiem”.

Praca zrealizowana przez Astbury'ego i Bella była znacząca. Para naukowców wykazała, że krystalografia rentgenowska może być używana do ujawniania regularnej, uporządkowanej struktury DNA. Oboje wykonali tę pracę w czasie, gdy większość naukowców uważała, że to białka są nośnikami informacji dziedzicznej.

W 1944 r. Astbury był jednym z niewielu naukowców, którzy docenili znaczenie pracy wykonanej przez mikrobiologa Oswalda Avery'ego i jego kolegów z Rockefeller Maclyn McCarty i Colina Macleoda. Avery i jego zespół wykazali, że kwas nukleinowy może przekazywać właściwość wirulencji u pneumokoków, a tym samym przedstawili pierwszy mocny dowód na to, że DNA może być materiałem dziedzicznym.<sup>9</sup>

Ważnym wydarzeniem była seria zdjęć rentgenowskich DNA w formie B, wykonanych w 1951 r. przez asystenta badawczego Astbury'ego, Elwyna Beightona. Historyk nauki Robert Olby, później nazwał „wyraźnie słynnym wzorem B znalezionym przez Rosalind Franklin i R. Goslinga”, które zostało wykonane rok później przez R. Franklin i jej doktoranta J.R. Goslinga, a które stało się znane jako „Zdjęcie 5I” i które dostarczyło Watsonowi i Crickowi jednej z kilku ważnych wskazówek.

Odpowiedź Astbury'ego na bardzo podobne zdjęcia rentgenowskie DNA Beightona nie mogła być bardziej dziwna. Nigdy nie opublikował ich w czasopiśmie ani nie przedstawił na spotkaniu naukowym. Biorąc pod uwagę, że Astbury był tak znanym ekspertem w badaniach rentgenowskich cząsteczek biologicznych, to pozorne zaniedbanie tak ważnej wskazówki może wydawać się zaskakujące.

Jednym z wyjaśnień jest to, że chociaż Astbury uznawał znaczenie DNA, nie rozumiał, że informacja biologiczna znajdowała się w subtelnych i skomplikowanych wariantach w jej trójwymiarowej strukturze.

Inaczej mogłaby potoczyć się historia DNA, gdyby Astbury pokazał zdjęcie Beightona swojemu przyjacielowi i koledze, wybitnemu amerykańskiemu chemikowi i laureatowi Nagrody Nobla, Linusowi Paulingowi, gdy odwiedził go w jego domu w 1952 r. Pauling był w tym czasie rywalem Watsona i Cricka w próbach rozwiązania struktury DNA i desperacko pragnął uzyskać dobrej jakości obraz dyfrakcji rentgenowskiej tej substancji.

W 1952 r. zaproponował już niepoprawny model DNA oparty na wczesnej pracy Astbury'ego i Bella, ale gdyby Astbury pokazał Paulingowi te nowe obrazy wykonane przez Beightona, to prawdopodobnie Caltech w Pasadena, a nie Cambridge w Wielkiej Brytanii, byłoby znane jako miejsce odkrycia podwójnej helisy.

Pomimo tej zmarnowanej szansy Astbury wraz z Florence Bell wnieśli znaczący wkład, wykazując, że metody krystalografii rentgenowskiej można wykorzystać do ujawnienia regularnej, uporządkowanej struktury DNA.

## Odkrycie na miarę pokolenia i Nagrody Nobla

Chwała za odkrycie struktury DNA spłynęła na Watsona, Cricka oraz szefa Rosalind Franklin, Maurice'a Wilkinsa, ale nie na samą Franklin. **Powód?**

Obowiązująca do niedawna (do 2022) wersja wydarzeń głosiła, że Wilkins przekazał Watsonowi i Crickowi

<sup>8</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Cold\\_Spring\\_Harbor\\_Laboratory](https://en.wikipedia.org/wiki/Cold_Spring_Harbor_Laboratory)

<sup>9</sup> Avery, OT, MacLeod, MD i McCarty, MD (1944). „Badania nad naturą chemiczną substancji indukującej transformację typów pneumokoków: indukcja transformacji przez frakcję kwasu dezoksyrybonukleinowego wyizolowaną z pneumokoków typu III”. *Journal of Experimental Medicine* 79 (2): 137–158. <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC2135445/>



Photo from the Nobel Foundation archive.

**Francis Harry Compton Crick**

Prize share: 1/3



Photo from the Nobel Foundation archive.

**James Dewey Watson**

Prize share: 1/3



Photo from the Nobel Foundation archive.

**Maurice Hugh Frederick Wilkins**

Prize share: 1/3

Fotografie 8,9,10. Laureaci Nagrody Nobla w 1962 r. Źródło: <https://www.nobelprize.org/prizes/medicine/1962/ceremony-speech/>

ów słynny rentgenogram o numerze 51 oraz wiele innych zdjęć i wyników badań bez wiedzy i zgody ich autorki. Czyli po prostu ukradł je Franklin.

„Co więcej, samą Franklin przedstawiano jako badaczkę, która nie uświadomiła sobie prawdziwego znaczenia tego, co widziała na wykonanych w swoim laboratorium fotografiach, w tym na „Zdjęciu 51”, oraz nie była w stanie rozszyfrować, co jej własne dane mówiły jej o DNA. Podobno miesiącami siedziała nad „Zdjęciem 51”, nie zdając sobie sprawy z jego znaczenia, a dopiero James Watson w błysku geniuszu zrozumiał to na pierwszy rzut oka.”

Taką właśnie wersję tej historii utrwalił sam Watson w swojej wydanej w 1968 r. książce pt. „**Podwójna helisa**”. Opisał w niej Franklin jako osobę, z którą trudno się pracowało, bo była kłótliva i niechętna innym ludziom. W dodatku była sceptycznie nastawiona do idei helikalnej budowy DNA. Kwestionowanie jej roli w jednym z największych odkryć naukowych XX wieku nie da się w żaden sposób uzasadnić ani usprawiedliwić. Wykorzystywanie przy tym faktu, iż dana osoba nie żyje, więc nie może się obronić, było naprawdę nieprzyzwoite, delikatnie rzecz ujmując.

#### **A ile było prawdy w stwierdzeniu o wykorzystaniu badań „we właściwy sposób”?**

Dwaj naukowcy, Matthew Cobb i Nathaniel Comfort, pisząc w swoim artykule (z 2022 r.), że ze szkicu artykułu do „Time” wynika, iż Franklin wcale nie uważała, że została okradziona. Co więcej, od początku była pełnoprawną członkinią grupy badawczej składającej się z dwóch zespołów: w jednym z nich byli Franklin i Maurice Wilkins, w drugim – Crick i Watson. Oba zespoły postawiły pytanie naukowe, podjęły kroki w kierunku poszukiwania na nie odpowiedzi, dostarczyły kluczowe dane i zweryfikowały wynik.

Autorzy artykułu, Cobb i Comfort, dodają, że w innym dokumencie z archiwum w Cambridge, czyli listu

od współpracownika Franklin do Cricka, sugeruje, że badaczka nie tylko omówiła swoje dane z przełożonym Cricka (Watsonem), ale zakładała, że ten podzieli się tą wiedzą z samym Crickiem. Cobb i Comfort dotarli również do programu uroczystości w Royal Society w czerwcu 1953 r., podczas której wystawiano eksponat dotyczący proponowanej struktury DNA. Został on wówczas przypisany obu zespołom badawczym, przy czym Franklin została wymieniona jako pierwsza.

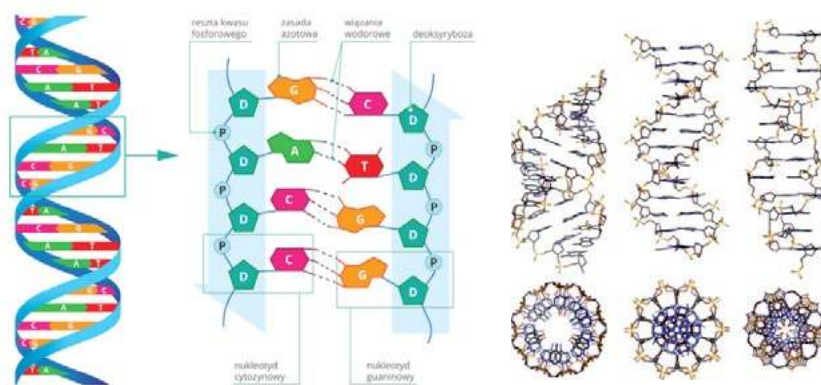
#### **„Zdjęcie 51” nie było przełomowe?**

Nowo odkryte dokumenty jasno pokazują również to, że Franklin zdawała sobie sprawę z tego, iż na swoich rentgenogramach widzi strukturę DNA. Kolejne ustalenie, które Cobb i Comfort poczynili na podstawie dokumentów znalezionych w archiwum w Cambridge, jest prawdziwie rewolucyjne. Otóż okazuje się, że „**Zdjęcie 51**” nigdy nie było kluczem do określenia struktury DNA. Zamiast tego sukces Watsona i Cricka sprowadzał się do podjęcia wielu prób w obliczeniach (*i popelnienia w nich równie wielu błędów*) oraz wykorzystania różnego rodzaju modeli kartonowych do ustalenia, jak DNA miałoby wyglądać w przestrzeni. Znaczenie „**Zdjęcia 51**” jako „przełomowego” zostało wskazane dopiero przez Watsona w jego książce „**Podwójna helisa**” – wszystko po to, żeby dodać dramatyzmu do tej opowieści i ukazać geniusz samego Watsona.

#### **Czy znano strukturę DNA?**

Od tego powinniśmy zacząć, że cząsteczka DNA była bardzo tajemniczą substancją. Dziś już dziecko z podstawówki wie, że nić DNA to skręcona drabinkowata struktura. Czytelnicy pamiętają ze szkoły, że zasady w DNA parują się komplementarnie A-T, G-C.

Każdy nukleotyd w DNA zawiera jedną z czterech możliwych zasad azotowych: adeninę (A), guaninę (G), cytozynę (C) i tyminę (T). Adenina i guanina są purynami,



Fotografia 11. Skręcona drabinkowata struktura nici DNA i parujące się komplementarnie zasady A-T, G-C. Źródło: <https://www.flynerd.pl/2019/01/rosalind-franklin-niezwykla-historia-jednego-zdjecia.html>

Fotografia 12. Najczęściej spotykane typy podwójnej helisy, od lewej: A, B i Z. Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Podw%C3%B3jna\\_helisa](https://pl.wikipedia.org/wiki/Podw%C3%B3jna_helisa)

co znaczy, że ich struktura zawiera dwa połączone ze sobą pierścienie węglowo-azotowe. Natomiast cytozyna i tymina są pirymidynami i mają pojedynczy węglowo-azotowy pierścień.

### Co naprawdę zrobiła Franklin?

Podsumowując artykuł o Franklin, Cobb i Comfort piszą o wniesieniu przez uczoną kilku kluczowych spostrzeżeń do odkrycia podwójnej helisy. Zwracają uwagę, że „Wyraźnie rozróżniła formy A i B, rozwiązując problem, który dezorientował poprzednich badaczy. (Eksperymenty z dyfrakcją rentgenowską w latach 30. XX wieku nieumyślnie wykorzystywały mieszanke form A i B DNA, co dawało mętne wzory, których nie dało się w pełni rozszyfrować). Jej pomiary wykazały, że komórka jednostkowa DNA była ogromna; określiła również symetrię C2 wykazywaną przez tę komórkę jednostkową.”

Dodają w dalszej części artykułu: „Franklin nie doceniła jej znaczenia nie dlatego, że była tępa, ale dlatego, że nie była z nią zaznajomiona. Według jej kolegi Aarona Kluga, Franklin powiedziała później, że „mogła się kopnąć” za to, że nie zdała sobie sprawy z implikacji strukturalnych. Crick zdał sobie sprawę z implikacji, ponieważ tak się złożyło, że intensywnie studiował symetrię C2. Ale nawet on nie wykorzystał ustaleń tej symetrii przez

Franklin podczas budowania modelu; raczej dostarczyło ono silnego potwierdzenia, gdy ich model był kompletny.”

W marcu 1953 r. Franklin przeniosła się do Birkbeck lab, jak pisze Rita Łyczywek, gdzie pracowała i z sukcesami – publikowała na temat wirusa mozaiki tytoniu. Mimo wszystkich zawirowań Franklin korespondowała z Watsonem i Crickiem. Regularnie wymieniali listy od 1954 r. do jej śmierci. Komentowali wzajemnie swoje prace i aktualne doniesienia naukowe, ich kontakt był bardzo przyjacielski. W 1958 r. zmarła w wieku 37 lat na raka jajnika wywołanego prawdopodobnie przez stały kontakt z promieniowaniem.

„Została zapamiętana dzięki swojej pracy nad DNA, a to zaledwie dwa lata jej krótkiego życia!” – pisze Rita Łyczywek i dodaje: „Miała wiele innych naukowych wyróżnień (publikacji w Paryżu i później z prac nad mozaiką tytoniu). Czas nauki dzieliła też czas na zainteresowania – uwielbiała podróże, kochała góry i spędzała wolny czas w gronie przyjaciół. Jestem jej fanką (RL) jako kobiety naukowca, która swoją drogę wybrała już w wieku 15 lat!”

I z pewnością, gdyby żyła dłużej, znalazłaby się w gronie laureatów Nagrody Nobla.

dr Kazimierz Mikulski  
Maksymilianowo

### Start misji Ax-4 z polskim astronautą

Gdy kończyliśmy redagowanie tego wydania na 29 maja zaplanowano start misji Ax-4 na ISS z polskim kosmonautą Sławoszem Uznańskim-Wiśniewskim. Na orbicie będą trwały prace nad ponad 60 eksperymentami, m.in. z USA, Indii, Polski i Węgier (skąd pochodzą członkowie załogi Ax-4) oraz innych krajów europejskich, a także z Arabii Saudyjskiej, Brazylii, Nigerii i Zjednoczonych Emiratów Arabskich.

W ramach polskiej misji Ignis na orbicie zostanie przeprowadzonych 13 eksperymentów, które dotyczą m.in. medycyny, biologii, biotechnologii i nauk inżynierskich.

Szefowa Departamentu Badań i Innowacji Polskiej Agencji Kosmicznej (POLSA) Monika Banaszek-Cymerman wśród polskich eksperymentów wymieniła „Leopar-

diss” – zakładający wykorzystanie specjalnego procesora, który umożliwi zastosowanie sztucznej inteligencji na pokładach satelitów i w misjach kosmicznych. Z kolei w ramach eksperymentu „Space Volcanic Algae” naukowcy sprawdzą, jak mikroglony, które mogą być źródłem pożywienia i tlenu, znoszą warunki kosmiczne. Autorzy badania „Neurofeedback EEG” chcą sprawdzić, jak izolacja i mikrogravitacja wpływają na poziom stresu astronautów.

Jednym z ciekawszych eksperymentów będzie badanie sposobów leczenia w warunkach mikrogravitacji cukrzycy insulinozależnej a także leku zapobiegającego klonowaniu się komórek nowotworowych.

Nauka w Polsce, Anna Bugajska (PAP)



# Zjeżdżalnie duże i małe

Foto – Adobe Stock

Przedstawiamy Państwu drugi artykuł dotyczący PED (prostych eksponatów dydaktycznych, potocznie zwanych „zabawkami fizycznymi”). Jest to z kolei trzeci tekst z naszej serii dotyczącej Energii w ujęciu interdyscyplinarnym [1]. Tym razem ograniczymy się do fizyki, a dokładniej – do energii kinetycznej oraz potencjalnej (wysokości i sprężystości).

Grzegorz Karwasz, Katarzyna Wyborska

Jak zwykle w naszym kognitywistycznym ujęciu dydaktyki – zaczynamy od zabawy, zrozumiałej dla wszystkich, poprzez minimum dydaktyki, a kończymy na ujęciu uniwersyteckim, zgodnie z naszą zasadą 9:1 - nauczyciel powinien wiedzieć 9 razy więcej niż ma do nauczenia studenta. Obecny tekst dotyczy ruchu na równi, o którym już kiedyś pisaliśmy [2].

## „E pur si muove”

„A jednak się porusza” – według legendy to miał wymamrotać po cichu Galileusz, kiedy na procesie Inkwizycji kazano mu odwołać tezy o ruchu Ziemi. Oczywiście, jest to legenda. Galileusz pisał swoje dialogi po włosku, a więc każdy mógł je zrozumieć, w odróżnieniu od niesamowicie matematycznego „De Revolutionibus” – podobno najmniej czytanego dzieła naukowego w historii. Wspomnijmy, że Galileusz na starość stracił wzrok – oglądając bez filtra słońce przez swoją lunetę. A wyrok polegał na obowiązku odczytywania raz w tygodniu siedmiu psalmów, którą to „pokutę” wykonywała za niego córka, zakonnica. Ale wróćmy do tematu energii.

Ruch jest zjawiskiem przykuwającym uwagę. Podobno ptaki reagują właśnie na ruch, tak więc żuk czy polny konik nieruchomieją, jeśli zauważą w pobliżu ptaka. Ba! badania fizjologiczne wskazują, że poruszanie głową, tak charakterystyczne dla ptaków, służy do „wyostrenia” percepcji [3]. U ssaków, to oko bezustannie porusza się, ale cel jest podobny.

Zjeżdżalnię, jak my je tu nazywamy, a w zasadzie równi pochyłych, jak się to mówi na lekcjach fizyki, jest nieskończona różnorodność: to każde „urządzenie”, które korzysta z zamiany energii potencjalnej grawitacji, na energię kinetyczną. Piszemy „energii grawitacji”, bo słowo *potencjalny*, wcale nie musi oznaczać  $E=mgh$ , o ile nie chcemy monopolizować języka polskiego. I tak, do „zjeżdżalni” zakwalifikujemy również, np. tzw. wahadło Maxwella, czyli krążek na osi i dwóch niciach, popularne yo-yo, fot. 1a. Ten krążek jest nazywany wahadłem, mimo że porusza się w pionie. Ale, jeśli dokładnie przygotujemy to doświadczenie, krążek będzie spadał i ponownie wznosił się – nicie będą się rozciągać i ponownie nawijać na osie. „Zjeżdżalnią” jest też ludzik na zębatej równi pochyłej: schodzi w dół, ale jakby krokami. Pozornie zatrzymuje się na chwilę, jakby się zastanawiał. W rzeczywistości, w pustym korpusie ludzika, w kształcie kinder-jajka, znaj-



Fot. 1. Tematem artykułu jest zamiana energii kinetycznej w potencjalną, jak w tzw. wahadle Maxwella (a), albo w kulce przetaczającej się wewnątrz „ludzika” schodzącego po schodach (b). Foto: Szymon Wierzejski.

duje się ciężka metalowa kulka, która przetacza się w dół, przechylając ludzika do następnego kroku. Przy odrobinie umiejętności do majsterkowania – można „zabawkę” wykonać samodzielnie.

Wahadło Maxwella wprowadza nas w zagadnienie zachowania energii mechanicznej, ale od razu w wersję bardziej skomplikowaną. W spadku swobodnym energia potencjalna  $E_p = mgh$  zamienia się w całości w energię kinetyczną – dodajmy – ruchu postępowego, czyli  $E_k = \frac{1}{2}mv^2$ . Krążek w wahadle Maxwella spada powoli – z przyspieszeniem znacznie mniejszym od  $g$ . Oczywiście, jego energia kinetyczna ma dwa składniki – ruchu postępowego i ruchu obrotowego. Znając promień  $R$  krążka i osi  $r$  możemy obliczyć, z jakim przyspieszeniem „spada” ten krążek. Szkolne rozwiązanie przedstawione jest na stronach „zadań czeskich”, opracowanych przez zaprzyjaźnioną Katedrę Dydaktyki Fizyki Uniwersytetu w Pradze [4]. Aby znaleźć przyspieszenie należy rozważyć działające siły – naciągu nici i ciężkości, i zapisać równanie Newtona dla przyspieszenia kąowego. Rozwiązanie z wykorzystaniem koncepcji energii wychodzi z założenia, że początkowa energia potencjalna,  $mgh$  zamienia się na energię kinetyczną „spadku”  $\frac{1}{2}mv^2$  oraz energię kinetyczną wirowania krążka  $\frac{1}{2}I\omega^2$ , gdzie  $I$  jest jego momentem

bezwładności. Dla pełnego krążka moment  $I$  wynosi  $I = \frac{1}{2}mR^2$  (zakładamy, że masa osi jest zanedbywalna w porównaniu z masą  $m$  krążka). Prędkość kąowa  $\omega$  wirującego cylindra jest związana z prędkością liniową  $v$  jego „spadku” zależnością  $v = \omega r$ .

Z zasady zachowania energii mamy więc

$$Mgh = \frac{1}{2}mv^2 + \frac{1}{4}mR^2(v^2/r^2). \quad (1)$$

Z powyższego wyznaczamy energię ruchu liniowego (tj. „spadku”):

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgh / (1 + \frac{1}{2}R^2/r^2). \quad (2)$$

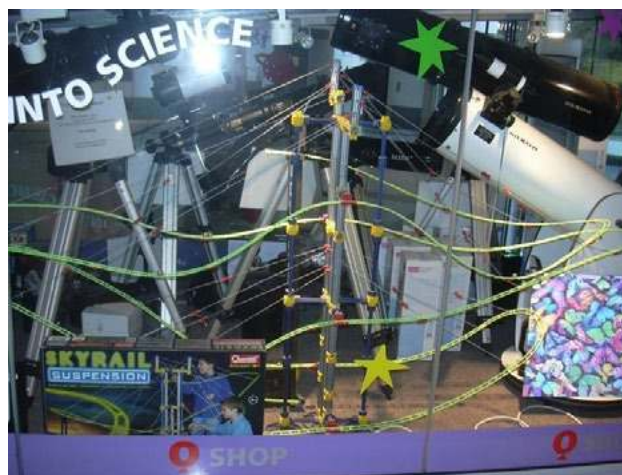
Energię tę zyskuje wahadło po spadku z wysokości  $h$ , ale z przyspieszeniem mniejszym niż  $g$ , nazwijmy je  $a$ . Pisząc więc

$$\frac{1}{2}mv^2 = mah = mgh / (1 + \frac{1}{2}R^2/r^2) \quad (3)$$

możemy wyznaczyć przyspieszenie spadku

$$a = g / (1 + \frac{1}{2}R^2/r^2) \quad (4)$$

Im większy stosunek promieni  $R$  do  $r$ , tym przyspieszenie „spadku” wahadła Maxwella mniejsze. Dla  $R = r$  (nić nawinięta na duży cylinder) przyspieszenie wynosi  $a = 2/3g$ . I w tym przypadku energia końcowa zawiera



Rys. 2. Zjeżdźalnie są „żelaznymi” eksponatami w każdym centrum nauki. (a) skomplikowana, wielopiętrowa i wielotorowa zjeżdźalnia przy wejściu do „Questacom” w Canberze, w Australii. (b) W tym samym centrum, w sklepie na wystawie – lekki plastikowy (i giętki) tor: trudność polega na takim jego wyprofilowaniu, aby kulka stoczyła się na sam dół, nie wypadając przy tym na zakrętach. Jak widać, tor nie musi być pochylony w dół na całej swej długości: działa prawo zamiany energii potencjalnej w kinetycznej i na odwrót. Foto: Maria Karwasz



Rys. 3. Proste do wykonania doświadczenia, takie jak (a) eksperyment z poziomą a następnie pochyloną ławką szkolną i toczącą się kulą (słuchamy z zamkniętymi oczyma) lub (b) zjeżdżające samochodziki (jeden lżejszy, drugi podwójny, czyli cięższy) pozwalają uczniom samodzielnie przewidywać wyniki doświadczenia, obserwować rzeczywiste zjawiska, a następnie wyciągać wnioski. Nauka staje się bardziej angażująca, a zdobyta wiedza lepiej zapada w pamięć (Dąbrowa Biskupia, foto KW).

zarówno człon związany z ruchem liniowym w dół krążka jak z jego obrotem. Dla dodatkowych wyjaśnień jeszcze raz odwołujemy Czytelnika do stron „zadań czeskich” [4].

Duże zjeżdżalnie są na wejściu do każdego, liczącego się Centrum Nauki. W Berlinie, w Muzeum Nauki, jeszcze z czasów NRD, był to wielki lejek grawitacyjny, gdzie z fascynacją można było się przyglądać, jak powoli w jego czeluściach znika 2 euro (1 euro są trochę za małe i nie dają tego efektu). Zresztą, lejki grawitacyjne, do zbierania na cele charytatywne drobnych monet są również na bramce wylotów na lotnisku Stansted (i pewno wielu innych też).

W „Questacom” w Canberze jest na wejściu gigantyczna konstrukcja zaczynająca się na trzecim piętrze a kończąca na parterze: szyny prowadzące w dół staczające się kule, rys. 2a. Rozjazdy po drodze zapewniają, że nigdy nie wiadomo, którą drogą polecą spuszczone kule, stąd bezustanne zainteresowanie wszystkich zwiedzających.

### Najpierw dydaktycznie

Opisywane przez nas obiekty mogą robić wrażenie „bajki o żelaznym wilku” – autorzy to mają i się tym przechwalają. Bynajmniej! Różnego rodzaju drewniane tory dla samochodzików pojawiają się średnio raz w roku, za kilkadziesiąt złotych, w niektórych sieciach supermarketów. My pokazujemy różne realizacje tej samej koncepcji fizycznej, aby zachęcić do własnych realizacji. A nie ma

nic prostszego (i dydaktycznie przydatnego) jak równia pochyła. Bo służy ona do praktycznej realizacji dwóch dydaktycznych „tortur”: ruchu jednostajnego i jednostajnie przyspieszonego. Nazywamy te zjawiska torturami, bo takimi pozostają w podręcznikach. W rzeczywistości, jak to podkreślał Newton, są to *modele* ruchu, ich idealne (czyli nieistniejące w rzeczywistości) przypadki.

Dydaktycznie, zjeżdżalnie, a w zasadzie pochyły stół powinien znaleźć się na drugiej lekcji fizyki, zaraz po omówieniu czym są zjawiska fizyczne (o tym napiszemy następnym razem). Bo dwa rodzaje ruchu, jednostajny i jednostajnie przyspieszony, w (polskiej) dydaktyce są pierwszymi zagadnieniami omawianymi w szkole. Wprowadzany jest natychmiast „wykres prędkości od czasu” i inne tego rodzaju skomplikowane, a abstrakcyjne dla ucznia koncepcje.

W rzeczywistości dwa modele są niezwykle proste do pokazania: szkolna ławka i szklana lub metalowa kulka. Uczniowie zamykają oczy, jeden tylko łapie kulkę na końcu ławki (rys. 3a). Najpierw toczy się „równo”, czyli jednostajnie, a kiedy pochylimy ławkę, wszyscy słyszą, że „przyspiesza”. Koniec lekcji! A kolejny eksperyment, rys. 3b, z dwoma podobnymi wózkami – jeden pojedynczy wagonik, drugi – podwójny, pokazują, że czas zjazdu nie zależy od masy wózka. „Czyli i rower i samochód ciężarowy na końcu zjazdu będą miały tę samą prędkość. Uważaj na rowerze!”

Rys. 4. „Mała zjeżdżalnia” czyli układ czterech równi, plus dwa geometrycznie identyczne wózki, ale o różnej masie (np. z mosiądzu i z aluminium) to znakomita zabawa w wyścigi samochodów, ale też poważna lekcja o powtarzalności eksperymentów w fizyce i stałości przyspieszenia ziemskiego. (a) Wystawa interaktywna „W czasie deszczu dzieci się nudzą”, Sopot, 2004; (b) dwa wózki złapanie „w biegu”: początkowy dystans, około jednego segmentu, pozostaje do końca (foto GK).



Rys. 5. „Embodiment”, czyli próbowanie praw fizyki na własnym ciele (tu długa ślizgawka w Questacom w Canberze) vs. modele komputerowe „Energia w skate-parku” (<https://phet.colorado.edu>). Interaktywne modele komputerowe pokazują, że energia całkowita (przy założeniu braku tarcia) się nie zmienia, ale jej dwie składowe – tak. Bez ryzyka połamania nóg.



## Zjeżdżalnie duże i małe

Są to nasze niezbywalne pomoce dydaktyczne na lekcjach o grawitacji, o Galileuszu, ba! nawet o ogólnej teorii względności. Bo wyjaśnić, dlaczego ciężki kamień i lekki, jak w doświadczeniu myślowym (*Gedankenexperiment*) Galileusza, spadają z tym samym przyspieszeniem, wcale nie jest łatwo. Ekspozat z rys. 4, z dwoma wózkami, zauważyliśmy na wystawie z przedmiotami zbędnymi, tzw. gadżetami, w sklepie w Trento. Jeden z drewnianych wózków obciążyliśmy metalowym wypełnieniem: z zamkniętymi oczyma można stwierdzić, że się różnią masą. Mimo że zjeżdżalnia składa się z czterech segmentów, czyli wózki „odbijają się” na końcu każdego kawałka toru i zwracają, z matematyczną dokładnością ani wózek cięższy nie dogania lżejszego, ani na odwrót. A jest przy tym mnóstwo zabawy. O „zjeżdżalni dużej” – za chwilę.

Dziecko zjeżdżające ze ślizgawki (fot. 5a) – to kolejny doskonały przykład przemian energii. Na szczycie zjeżdżalni dziecko ma maksymalną energię potencjalną grawitacji, ponieważ znajduje się na pewnej wysokości nad ziemią. W momencie rozpoczęcia zjazdu energia ta stopniowo zamienia się w energię kinetyczną, a prędkość dziecka wzrasta. Ruch nie jest jednak idealnie swobodny – działają na niego siły tarcia oraz opór powietrza, które częściowo pochłaniają energię. Mimo to, gdy dziecko dociera na dół, prawie cała energia potencjalna przekształca się w kinetyczną.

Kolejną matematyczną etiudę o zachowaniu energii ilustruje „snapshot” z naszej wizyty w Questacom: ślizgawka, o długim segmencie poziomym. Zakładając, że siła tarcia (o współczynniku  $f$ ) działa tylko na części poziomej, jak daleko zajędzie pokazane na zdjęciu dziecko? Prawo zachowania energii daje odpowiedź natychmiastową: początkowa energia potencjalna  $mgh$  zamienia się w pracę siły tarcia (na odcinku poziomym) – a ta jest iloczynem siły tarcia  $mgf$  i przebytej drogi  $s$ . Odpowiedź:  $s = h/f$ . Jeśli część pozioma jest gładka (założymy  $f = 0,5$ ), przebyta droga jest dwukrotnie większa niż wysokość początkowa. Ot, twórcy Questacom na fizyce się znali!

## Ruskie góry

Ale pierwowzorem zjeżdżalni dla kulek z centrów nauki są różnego rodzaju „prawdziwe” zjeżdżalnie i kolejki dla dzieci, i nie tylko. W zależności od przeznaczenia, mogą to być pociągi dla maluchów, stylizowane np. na zieloną gąsienicę (rys. 6a) albo, dla ryzykantów – czerwone tory, jak w „EnergyLandii”, rys. 6b.

„Roller coaster” z rys. 6b nosi po włosku nazwę „ruskie góry”. Rosja jest krajem równinnym, ale zimą mroźnym. Drewniane zjeżdżalnie, polewane wodą (czytaj: pokryte lodem), były ulubioną zimową zabawą rosyjskiej arystokracji już w czasach Katarzyny II. Zjeżdżano na sankach lub na kawałkach lodu [5]. Tor kończył się na pryzmie piachu, działającej jako hamulec. W Paryżu, w 1812 roku



Rys. 6. Dwie wersje zjeżdżalni jako „embodiment” fizyki: (a) kolejka-gąsienica dla dzieci na letnim jarmarku w Trento, (b) roller-coaster w parku rozrywki EnergyLandia w Zatorze. ([https://energylandia.pl/wp-content/uploads/2017/02/formula\\_2024\\_9-1-450x300.jpg](https://energylandia.pl/wp-content/uploads/2017/02/formula_2024_9-1-450x300.jpg))



Rys. 7. (a) „Pętla śmierci” to proste, ale bardzo dydaktyczne zadanie na prawo zachowania energii. (b) Wyścigi elektrycznych samochodzików też zawierają pętlę śmierci, ale zaraz za nią pochylony w lewo zakręt: trzeba właściwie dobrać prędkość, aby siła odśrodkowa dostatecznie dociskała samochodzik do toru na szczycie pętli, ale nie „wyrzuciła” samochodzika z zakrętu (gra Pasza, 2003 rok).

zbudowano pierwszą konstrukcję z wózkami zjeżdżającymi po torze. Pierwszy tor z pętlą „do góry nogami” powstał 1846 roku. Na początku XX wieku „Montagnes russes” stały się główną atrakcją powstających parków rozrywki.

Pętla śmierci to kolejne ćwiczenie matematyczne korzystające z prawa zachowania energii. Zakładając, że pętla ma kształt okręgu, z jakiej wysokości  $H$  należy spuścić kulkę, aby nie spadła z toru? Oznaczamy  $R$  jako promień pętli. Aby kulka nie wypadła w najwyższym punkcie, siła odśrodkowa  $mv^2/R$  musi równoważyć siłę grawitacji, czyli wynosić co najmniej  $mg$ .

$$mv^2/R = mg \quad (5)$$

Nie musimy wyznaczać  $v$ , wystarczy  $v^2$ , a tę wartość znajdziemy z zachowania energii. W najwyższym punkcie pętli energia potencjalna kulki wynosi  $2mgR$ , a kinetyczna  $\frac{1}{2}mv^2$ . Z prawa zachowania energii otrzymujemy równość

$$2mgR + \frac{1}{2}mv^2 = mgH \quad (6)$$

gdzie  $H$  jest wysokością, z jakiej spuszczone kulkę.

Z równania (5) wyznaczamy  $\frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}mgR$  i wstawiając do równania (6) otrzymujemy

$$2mgR + \frac{1}{2}mgR = mgH \quad (7),$$

czyli

$$H = 5/2 R.$$

Rysunek 7a znakomicie to pokazuje: wysokość początkowa musi przewyższać wysokość pętli ponad 2,5 razy. Nie uwzględniliśmy, że część początkowej energii potencjalnej

kulki zamienia się na energię jej ruchu obrotowego – ale byłoby to zadanie, i to dość trudne – dla studentów fizyki.

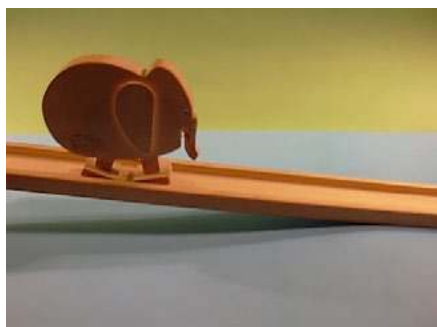
Zjeżdżalnie, niekoniecznie takie z pętlą śmierci, są warte osobistego, ucieleśnionego (ang. embodiment) spróbowania. Każda z nich zapewnia krótki moment dla doświadczenia stanu nieważkości, czyli swobodnego spadku. Oczywiście, opadająca część toru nie daje wrażenia zerowej grawitacji. Do tego są potrzebne albo specjalnego rodzaju wieże jak w parkach rozrywki albo skok na gumie – bee-jumping, którego ze względów zdrowotnych nie polecamy: co prawda przez moment jesteśmy w stanie swobodnego spadku, czyli nieważkości, ale końcowy fragment to niebezpieczne przeciążenie, jak pilota w samolocie myśliwskim. I jeszcze uwaga dotycząca pętli na rys. 6b: nie jest ona kolistą, ale ma kształt litery alfa ( $\alpha$ ). Jak to pięknie wyjaśnił prof. Krzysztof Ernst w „Fizyce sportu” – promień krzywizny musi być jak najmniejszy w najwyższym punkcie pętli, gdzie prędkość jest najmniejsza a siła odśrodkowa musi zrównoważyć przeciwnie działającą siłę grawitacji, ale w przy wyjściu (i wejściu) z pętli promień ten jest większy, dzięki czemu przeciążenia nie są tak ekstremalne.

## Kroczące kaczki

Zwierzaki na rys. 8 schodzą po równi, ale nie poruszają się ruchem przyspieszonym, jak kulki na stole w doświadczeniu szkolnym, rys. 3. Mają po dwie nogi, a każda z nich zakończona jest zaokrągloną stopą (z kawałkiem papieru ściernego pod spodem). Zwierzaki, stawiając nieporadne kroki schodzą w dół, kołysząc się raz do przodu, raz nieco do tyłu. Podczas ruchu zmienia się położenie ich środka ciężkości a nie ześlizgują się dzięki sile tarcia „stóp” z powierzchnią równi. Schodzą rytmicznie, aby nie powiedzieć – jednostajnie. Kroczące zwierzątka są więc prawie anty-edukacyjne: ruch na równi, a jednostajny.

Te zabawki też obrazują zasadę zachowania energii; ich początkowa energia potencjalna zostaje zamieniona na energię kinetyczną (niewiele), a reszta w tarcie. Wykonanie zabawki nie jest trywialne: środek ciężkości słonika musi być właściwie dobrany, krok nóg również, nie mówiąc o pochyleniu równi. W każdym kroku uzysk energii kinetycznej (z utraty energii potencjalnej) równy jest dyssypacji energii w procesach tarcia.

„Kroczące zwierzęta” wskazują, że ruch jednostajnie przyspieszony, jakiego oczekujemy dla równi pochyłej, jest jedynie tylko pewnym modelem. W rzeczywistości, jak już zauważył Newton, w każdym ruchu występują siły dyssypacyjne (tarcia, lepkości, oporu powietrza) i ruch,



Rys. 8. (a) „Kroczące zwierzęta” to nasz sposób na wprowadzenie pojęcia ruchu jednostajnego. Wbrew pozorom ich konstrukcja nie jest prosta: środek ciężkości, moment bezwładności i krok zwierzątek musi być ściśle dobrany do pochylenia równi. (b) Wyścigi kaczek to super zabawa, w doping, na dużej sali pełnej dzieci (foto GK).

Rys. 9. „Fizyka to zabawa”, taki był tytuł naszego projektu EU: celem PEDów nie jest nauczanie fizyki, ale rozbudzenie pasji badawczych. Dziś Julia (a) skończyła Politechnikę, a Zosia (b) studiuje filozofię.



który bez tych sił powinien być przyspieszony, staje się, w warunkach stacjonarnych, ruchem jednostajnym.

Możemy obliczyć, ile ciepła wydziela się przy każdym kroku. Jeśli słonik waży 200 g, i schodzi z wysokości 10 cm w 20 krokach, to w każdym kroku traci zaledwie 10 mJ.

W interaktywnych wykładach dla dzieci wykorzystujemy równomierny stukot kaczek do wprowadzenie pojęcia „jednostajny”. Dla dużych, mieszanych grup robimy zawody w doping: „Kaczka gazu!” vs. „Kaczor gazu!”. Oczywiście, obie kaczki dochodzą do mety w tym samym czasie: wygrywa grupa, która głośniej krzyczała. I wreszcie, kiedy zrozumieliśmy że: (1) na równi pochyłej wózki ciężkie i lekkie zjeżdżają ruchem przyspieszonym, i że przyspieszenie to nie zależy od masy wózków, oraz (2) że nie zawsze tak jest, bo w prawdziwym świecie działają siły utraty energii na ciepło, czyli dyssypacyjne, możemy pokazać „dużą zjeżdżalnię”, rys. 9a. Łączy ona ruch postępowy z ruchem obrotowym, w sposób jeszcze bardziej skomplikowany niż „wahadło” Maxwella.

Na dużej zjeżdżalni, w odróżnieniu od małej, drewniane krążki o dziwnych kształtach czynią wiele kaprysów. Najpierw staczają się gładko (tj. ruchem przyspieszonym), a na końcu każdego kawałka toru zatrzymują się, jakby w zastanowieniu. Małe, krępe „miny podwodne” są zdecydowanie szybsze niż delikatne koła rowerowe. To te koła najbardziej niechętnie się zatrzymują i zawracają. Możemy więc zaplanować kolejny eksperyment, jak z małą zjeżdżalnią. Najpierw scenariusz: „Kiedy ten płaski a szeroki krążek dotoczy się do końca segmentu, ty puścisz tę krępą minę. Gotowi?”

Doświadczenie jest wręcz rewelacyjne: mimo, że ruch jest pozornie nieprzewidywalny, „mina podwodna”, o małym momencie bezwładności, dogania płaskie koło dokładnie w tym samym miejscu zjeżdżalni (zazwyczaj na skrzyżowaniu czwartego i piątego segmentu). Studentom

powiemy o zjawisku pseudo-chaotycznym, ale w pełni podlegającym prawom mechaniki klasycznej oraz o różnej partycji energii między kinetyczną ruchu postępowego i obrotowego (co już, intuicyjnie, zrozumieliśmy w wahadle Maxwella). Oczywiście, przedszkolakom nie możemy mówić o momencie bezwładności. Powiemy więc, jak na stronach Fizyki zabawek: „Może dlatego prawdziwe koła rowerowe są właśnie „puste” w środku? Aby podążać zawsze na wprost?”

W szkole powiemy: „Prawdziwe obliczenia pokazują, że staczając się po pochyłości najszybciej na dole znajdzie się kulka (moment bezwładności  $I = 2/5 mR^2$ ), później pełny walec ( $I = 1/2 mR^2$ ), a na końcu koło rowerowe ( $I = mR^2$ ). A prościej: „Mówimy, że koło rowerowe ma największy moment bezwładności - najtrudniej je rozpędzić.”

### Karmienie energią

Kroczące zwierzątka pokazują, jak energia mechaniczna jest zużywana na tarcie. Mamy inny, ornitologiczny przykład na potwierdzenie tej tezy – karmik dla ptaszków, rys. 10a. Kulki są wrzucane w otwór w dachu karmika, a ptaszki przekazują je sobie z dziobu do dziobu (znów szczegóły konstrukcji są precyzyjnie dobrane). „Czym nakarmiłem ptaszki? Szklaną kulką? Nie! Kulka została. Energią!” Dwa miśki schodzące po drzewie (rys. 10c) spełniają bardziej funkcję zabawową niż dydaktyczną, ale tu też możemy urządzić im wyścigi, pokazujące matematyczną ścisłość pozornie chaotycznych zjawisk fizycznych.

Natomiast zaba-wrzutka (rys. 10b), kupiona w Karlsruhe, za całe 55 euro, warta była tej ceny. To genialny w swej prostocie kalkulator energii kinetycznej zamieniającej na potencjalną. Nie jest trudno uderzyć bardzo silnie w dźwignię (żółtą, umieszczoną z niewidocznej strony) tak, aby kulka wpadła na najwyższą półkę (50 mJ), ale trudno dobrać siłę uderzenia (a w zasadzie popęd tej siły)



Rys. 10. Dalsze „wariacje” na temat prawa zachowania energii. (a) Karmik z ptaszkami. (b) Drewniany kalkulator zamieniający energię kinetyczną czerwonej kulki na jej energię potencjalną na odpowiednio ponumerowanej półce. (c) Schodzące miśki służą bardziej zabawie niż dydaktyce: ot! czasem trzeba się (kognitywistycznie) odprężyć.

tak, aby wpadła na półkę, np. 30 mJ energii potencjalnej. Trochę, oczywiście, żartujemy.

### Naj-krótszy-czas

Jednym z eksponatów w Centrum Nauki Kopernik, Centrum „Hevelianum” w Gdańsku, „La Vilette” w Paryżu, i wielu, wielu innych jest zjeżdżalnia z trzema kulkami i różnymi trasami, rys. 11a. Dziecko może przewidzieć, która kulka zjedzie najszybciej, a następnie zwolnić je jednocześnie i obserwować ich ruch. Okazuje się, że intuicyjne przewidywania nie zawsze są trafne – choć najkrótsza trasa wydaje się najszybsza, w rzeczywistości kulka poruszająca się po odwróconej cykloidzie dociera na dół jako pierwsza.

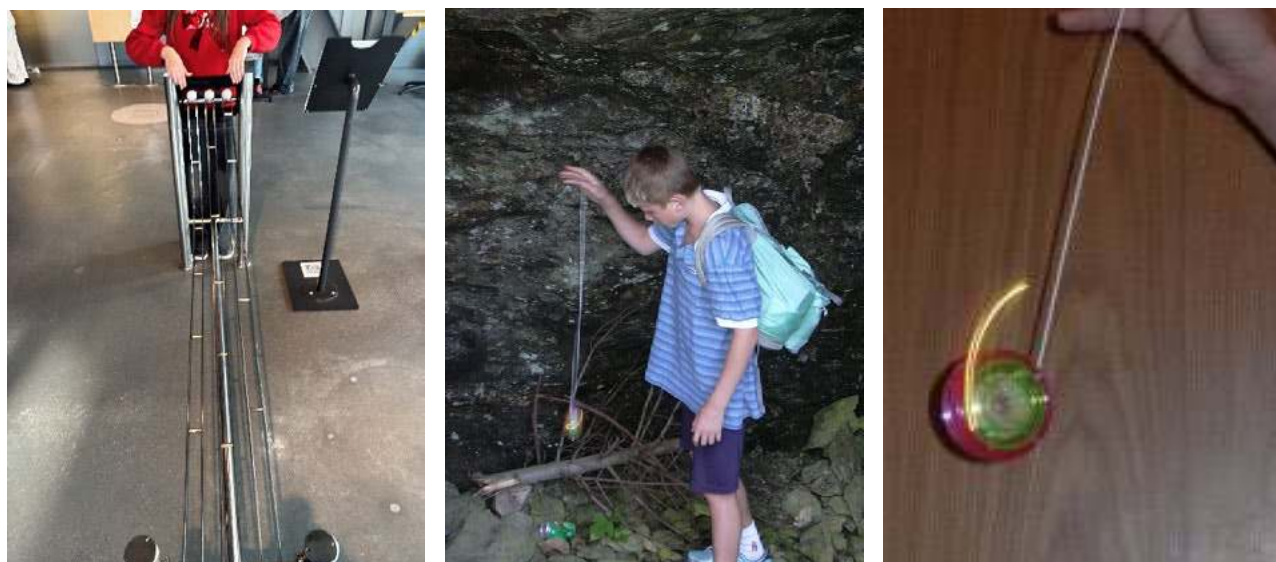
Trasa ta zapewnia najkrótszy czas zjazdu i jest nazywana brachistochroną (od greckiego *brachistos* – najkrótszy i *chronos* – czas). Dzięki specyficznemu kształtowi ruch odbywa się w optymalnym czasie, zgodnie z zasadami fizyki opisanymi przez Johanna Bernoulliego. To doskona-

ły przykład na to, jak matematyka i mechanika wpływają na rzeczywisty świat i mogą być sprawdzane w interaktywnych eksperymentach.

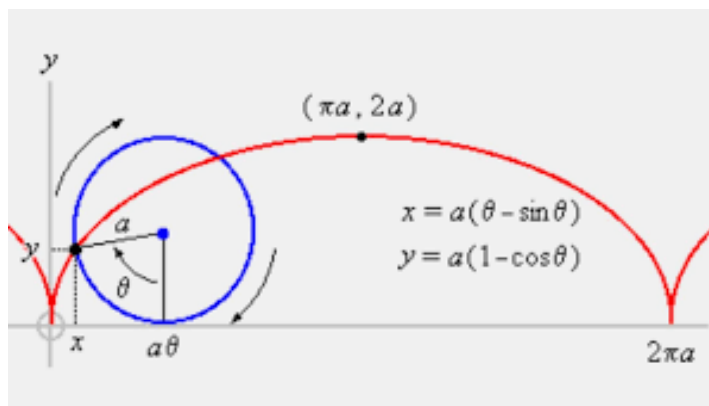
Dla matematyków jest to cykloida, czyli krzywa, którą zakreśla wentyl toczącego się koła samochodowego.

Cykloida jest pięknym ćwiczeniem matematycznym. Obrazowo można ją pokazać nie tylko rejestrując ruch wentyla w kole rowerowym, ale też zapalając się diodę w yo-yo, które na końcu trajektorii w dół podlega przecięciu, co włącza tę LED, rys. 11 b i c.

Cykloida jest matematycznie piękna, bo pokazuje, jak parametryczny zapis krzywej może być znacznie prostszy. Ruch koła, o promieniu  $R$ , po poziomej szosie (czyli wzdłuż osi  $x$ ) jest bardzo prosty – jest to ruch jednostajny, z prędkością  $v$ . Ale jednocześnie koło się kręci, czyli wentyl zatacza okrąg. A ruch po okręgu, to złożenie ruchu „typu” sinus wzdłuż osi  $x$  i cosinus wzdłuż osi  $y$ , zob. rys. 12b. Możemy więc zapisać zmiany położenia wzdłuż osi  $x$  i osi  $y$  w funkcji czasu postaci równań:



Rys.11. „Naj-szybsza-zjeżdżalnia”, czyli bra-chisto-chrona w Centrum Nauki Kopernik w Warszawie (foto KW). (b) Pasza, dziś buduje rurociągi gazowe i elektrownie jądrowe. W 2004 roku pozornie bawił się yo-yo. (c) W rzeczywistości, pozował, aby uwiecznić cykloidę, zataczaną przez LED w naszym PED.



Rys. 12. (a) Snapshot staczania się kulek po brachistochronie – kulki starowały z prawej strony, ta na torze prostym wyraźnie się spóźnia, foto GK. (b) Definicja i równanie parametryczne cykloidy, źródło: <https://www.youtube.com/watch?v=KCZjoCJZ89A>

$$x(t) = vt - \cos \theta(t) \quad (8)$$

$$y(t) = R - \sin \theta(t)$$

gdzie uwzględniliśmy, że koło opiera się na drodze, czyli położenie  $y$  osi koła to  $R$ . Musimy tylko „zgrać” kąt  $\theta$  z upływem czasu  $t$ . Otóż, w układzie równań (8) kąt obrotu jest związany z prędkością  $v$  poprzez zależność  $\theta = (v/r) t$ , bo  $v/r$  to prędkość kątowa. Równania (8) przyjmują więc postać

$$x(t) = vt - \cos [(v/R) t] \quad (9)$$

$$y(t) = R - \sin [(v/R) t]$$

Matematycy wolą jako zmienną kąt  $\theta$ , stąd równanie parametryczne cykloidy na rys. 12b.

$$x(\theta) = R (\theta - \cos \theta) \quad (9)$$

$$y(\theta) = R (1 - \sin \theta)$$

Równanie cykloidy we współrzędnych kartezjańskich jest przerażająco skomplikowane

$$x = r \arccos \frac{r-y}{r} - \sqrt{2ry - y^2} \quad (10)$$

Brachistochrona odegrała epokową rolę we współczesnej mechanice kwantowej. Newton, poprzez wprowadzenie pojęcia pochodnej, podał sposób na znalezienie maksymalnej (lub minimalnej) wartości funkcji: np.

w równaniu położenia, gdzie zmienną jest czas. Zagadnienie brachistochrony jest jakby odwrócone: położenie końcowe jest zadane, a należy znaleźć trajektorię, która minimalizuje czas.

To zagadnienie otworzyło nowy dział matematyki, który nazywa się „rachunek wariacyjny”: jak zmieniać trajektorię, aby uzyskać minimum czasu przelotu. Prawo załamania światła jest właśnie przykładem takiego wyniku: trajektoria światła po dwóch, załamanych względem siebie odcinkach, minimalizuje czas podróży promienia między dwoma zadanymi punktami.

Problem brachistochrony został postawiony w 1696 roku przez Johanna Bernoulliego z Uniwersytetu w Bazylei – chciał sprawdzić, czy jego starszy brat, Jakob, też matematyk, znajdzie rozwiązanie. Ale Newton był szybszy. Uściślając zagadnienie, mamy znaleźć krzywą  $y(x)$  taką, że czas staczania się między dwoma punktami A i B będzie najkrótszy. Wyrażając ten czas jako całkę, mamy zminimalizować wielkość  $T(y)$  między A i B. Czas przelotu to stosunek przebytej drogi  $s$  do czasu  $t$ , scałkowany chwila po chwili. Długość krzywej między A i B to  $L$

$$L = \int_{x_A}^{x_B} \sqrt{1 + (y')^2} dx \quad (11)$$



Fot. 13. (a) Spontaniczna zabawa dzieci na Festiwalu Nauki w Warszawie, 2002. Dzieci samodzielnie ustaliły kolejność gry, i podzieliły między siebie role. W dzisiejszym, ministerialnym slangu nazywa się to „kształtowanie kompetencji społecznych”. (b) Nieodżałowany mistrz jednego z nas (GK) wyjaśnia działanie lejka grawitacyjnego własnym wnukom. Obok – miska „niegrawitacyjna”, w której trajektorie kulek nie są elipsami (Credits: dr Helena Nowakowska).



Fot. 14. Dwa fascynujące zegary ze staczającymi się kulkami, wskazującymi upływ minut i godzin. Foto GK.

a więc czas przelotu

$$T(y) = \int_{x_A}^{x_B} \frac{\sqrt{1+(y')^2}}{v} dx \quad (12)$$

Dla wyznaczenia  $v$  korzystamy (znow) z prawa zachowania energii

$$\frac{1}{2}mv^2 = mgy \quad (13)$$

tak więc

$$T(y) = \frac{1}{\sqrt{2g}} \int_{x_A}^{x_B} \frac{\sqrt{1+(y')^2}}{y} dx \quad (14)$$

Dla sprawdzenia, że krzywa minimalizująca czas przelotu to cycloida, odsyłamy do literatury [6, 7]. Oj, znow zapędziliśmy się na poziom uniwersytecki, i to wyższy...

Mechanikę klasyczną, optykę, a może i całą fizykę – można sprowadzić do rachunku wariacyjnego. Ale prawdziwą potęgę pokazuje on we współczesnych aplikacjach mechaniki kwantowej. Otóż opis „oczywisty” (ang. *explicite*) np. atomu helu wymaga uwzględnienia oddziaływania dwóch elektronów z jądrem oraz między nimi. Opis wymaga podania położenia (w trzech wymiarach) i prędkości. W atomie neonu elektronów już jest dziesięć. A rozkład gęstości chmury elektronowej rozciąga się – hen, hen! Ktoś stwierdził, że ilość danych do opisu położenia i pędu elektronów w atomie Ne wymagałaby komputera o pamięci przekraczającej ilość atomów we Wszechświecie. Ale – mechanika kwantowa pozwala projektować „in silicio” nie tylko skomplikowane cząsteczki ale też barwniki do zastosowań fotowoltaicznych i leki. W jaki sposób?

Otóż nie musimy znać położenia poszczególnych elektronów, ale jedynie „całkowite” własności atomu. Jakież? Przede wszystkim jego całkowitą energię oddziaływania elektrycznych i magnetycznych elektronów i jądra. Energia ta, w stanie podstawowym jest *minimalna*: stosujemy rachunek wariacyjny. Metoda, za którą została przyznana nagroda Nobla w chemii w 1998 roku, nazywa się DFT

(*Density Functional Theory*). Ot, do czego doprowadziła zwykła cycloida!

### Neverending play

Powinno być „Neverending story”, jak powieść (i film) o przygodach nieśmiałego chłopca, Bastiana. Ale zjeżdżalnie, ślizgawki, lejki, pochylone tory to niekończąca się zabawa, jak pokazują zdjęcia z naszych wystaw w ramach Festiwalu Nauki na Politechnice Warszawskiej w 2008 roku i na Uniwersytecie Gdańskim w 2009 roku, rys. 13. Ale nie są to tylko „zabawki”. Każdy eksponat spełnia rolę kształtowania kompetencji społecznych: podziału ról w grupie rówieśników, lub spełniania roli mistrza, w wykładzie dla wnuków.

Wersji zjeżdżalni z windami dla kulek też jest nieskończona ilość. Na rys. 14 przedstawiamy dwa zabawkowe zegary (jeden z sklepu z gadżetami, drugi z Science Museum w Londynie), w których czas odmierzany jest przez przetaczające się kulki. Oczywiście, gdzieś w środku ukryte jest zwykłe, mechaniczne, Galileusza wahadło, które otwiera bramki dla kulek. Fascynujące!

Najbardziej ciekawe są zjeżdżalnie własnej konstrukcji, po włosku *fai-da-te*. a tych znajdziemy na youtube nieskończoną ilość: wszystkie pokazują prawa zachowania energii [8].

Reasumując drugi artykuł z serii Prosty Eksponatów Dydaktycznych: obiekt, zabawka, sytuacja, równanie – to nie cel sam w sobie, ale kognitywistyczny [9] pretekst to podjęcia trzech funkcji edukacyjnych: ludycznej (zabawowej), dydaktycznej, naukowej.

#### LITERATURA:

- [1] G. Karwasz, O energii interdyscyplinarnie, *Fizyka w Szkole*, 6/2022, s. 16.
- [2] G. Karwasz, A. Karbowski, Z górki na pazurki, czyli jak interaktywnie uczyć o energii mechanicznej, *Fizyka w Szkole* 2/2023, s. 28.
- [3] <https://pigeon.psy.tufts.edu/avc/ditrich/discrim.htm>
- [4] „Zadania czeskie” <https://physicstasks.eu/4321/yo-yo>
- [5] <https://www.ilpost.it/2024/09/19/montagne-russe-storia-origine/>
- [6] [https://www.ucl.ac.uk/~ucahmt/latex\\_html/chapter2\\_latex2html/node7.html](https://www.ucl.ac.uk/~ucahmt/latex_html/chapter2_latex2html/node7.html)
- [7] F. W. Byron, R. W. Fuller, *Matematyka w fizyce klasycznej i kwantowej*, t.1, PWN 1975
- [8] Zob. np. Purdue University, [https://www.youtube.com/watch?v=r8d1g\\_YCrE4](https://www.youtube.com/watch?v=r8d1g_YCrE4)
- [9] G. Karwasz, K. Wyborska, *Dydaktyka kognitywistyczna*, *Fizyka w Szkole*, 6/2024, s. 28

# Teleskop Hubble'a – 35 lat na orbicie<sup>1</sup>

Krzysztof Kowalczyk

24.04.2025 minęło 35 lat od wyniesienia na orbitę Kosmicznego Teleskopu Hubble'a, którego historia, szczególnie na początku, nie była łatwa. Jeszcze w lutym 1990 r. magazyn „Sky & Telescope” donosił: „Zapowiadana już od kilku lat nowa era w astronomii – umieszczenie na orbicie dużego teleskopu optycznego im. E. Hubble'a – jakoś nie może nadejść, choć wszystko wskazuje na to, że będzie miała wreszcie swój początek wiosną 1990 r. Ale astronomowie już teraz zastanawiają się, co dalej, oceniając czas pracy Kosmicznego Teleskopu Hubble'a na 15 lat.”

Ostatecznie 24 kwietnia 1990 r. prom kosmiczny Discovery wyniósł na orbitę okołozemską Kosmiczny Teleskop Hubble'a, który mimo zapowiadanych mu 15 lat działa do dziś dzięki naprawom i renowacjom dokonywanym na orbicie. Wcześniej start był planowany na październik 1986 r., ale katastrofa Challengera w styczniu 1986 r. spowodowała wstrzymanie lotów wszystkich pozostałych wahadłowców, co miało wpływ też na opóźnienie wystrzelenia długo oczekiwanego teleskopu.

Wkrótce po wyniesieniu na orbitę okazało się jednak, że zwierciadło główne teleskopu ma wadę optyczną wynikającą z błędów polerowania głównego zwierciadła jeszcze na Ziemi. Kształt zwierciadła nie był więc taki jak początkowo zakładano i miało to wpływ na jakość obrazu. W styczniu 1991 r. „Sky & Telescope” donosił: „Kosmiczny Teleskop Hubble'a od pół roku prowadzi już systematyczne obserwacje. Z powodu kłopotów z optyką obrazy trzeba jednak rekonstruować za pomocą komputera: usuwa się w ten sposób rozmycie wywołane aberracją sferyczną zwierciadła teleskopu”.

Naprawa wadliwego zwierciadła na orbicie nie wchodziła w grę, podobnie jak ponowne sprowadzenie teleskopu na Ziemię i naprawa na Ziemi, co początkowo też rozważano. Można jednak było zapewnić Teleskopowi Hubble'a coś w rodzaju okularów korekcyjnych, dzięki czemu z tym samym zwierciadłem mógł wkrótce zacząć dawać znacznie ostrzejsze obrazy. Aby to zrealizować NASA przystąpiła do opracowania zestawu optyki korekcyjnej COSTAR (ang. Corrective Optics Space Telescope Axial Replacement), modułu przeznaczonego do zainstalowania w Kosmicznym Teleskopie Hubble'a korygującego wadę zwierciadła głównego teleskopu. Już w maju 1991 r. można było przeczytać o wyznaczonym na grudzień 1993 r. terminie misji serwisowej do Teleskopu Hubble'a, którą NASA ostatecznie przeprowadziła razem z Europejską Agencją Kosmiczną (ESA).

Claude Nicollier, szwajcarski fizyk, pilot i astronauta ESA brał udział w ćwiczeniach w basenach symulujących

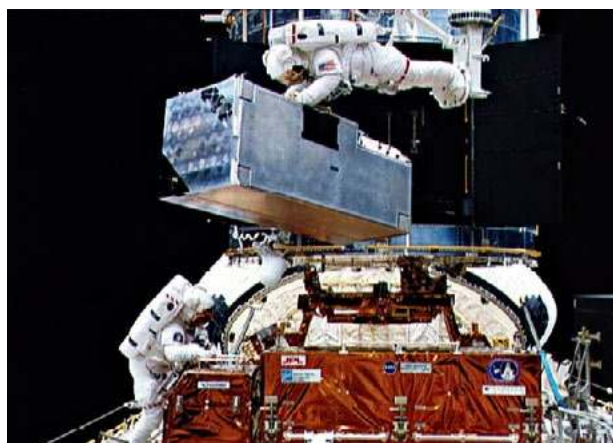


Teleskop Hubble'a podczas wynoszenia na orbitę w 1990 r. Fot. NASA

stan nieważkości przy makiecie Teleskopu Hubble'a oraz w pierwszej misji naprawczej do Kosmicznego Teleskopu Hubble'a razem z astronautami NASA. ESA dostarczyła też dla NASA nowych baterii słonecznych, które pozwoliły rozwiązać inny problem z Teleskopem Hubble'a, o którym tak pisał w maju 1991 r. „Sky & Telescope”: „Okazało się również, że za każdym razem, gdy teleskop przekracza granicę cienia Ziemi, skrzydła z bateriami słonecznymi wpadają w wibracje, wywołane najprawdopodobniej termicznymi naprężeniami we wspornikach baterii. Przez pewien czas uniemożliwia to utrzymanie czujników odpowiedzialnych za orientację teleskopu według wybranej gwiazdy”.

By oddać choć trochę radość naukowców po udanej misji naprawczej z grudnia 1993 r., podczas której zainstalowano moduł korekcyjny COSTAR, nową kamerę szerokokątną WFPC-2 i nowe baterie słoneczne, przytoczmy jeszcze inne cytaty z archiwaliów astronomicznych tamtych czasów (za: „Świat Nauki”, maj 1994 r., str. 8-9): „Naprawa Teleskopu Hubble'a wywołała euforię i poprawiła reputację NASA. Mała korekta zwierciadła, a ogromny zysk dla astronomii – tak Christopher J. Burrows ze Space Telescope Science Institute wyraził uczucia zachwyconych astronomów, którzy w styczniu dumnie pokazali pierwsze, imponująco wyraźne zdjęcia wykonane za pomocą Kosmicznego Teleskopu Hubble'a [...]. Przed naprawą sądzono, że R 136 (gromada w mgławicy 30 Doradus) zawiera kilkaset gwiazd. Obecnie zaobserwowano ich ponad 4000.”

Krzysztof Kowalczyk



Astronauci z modulem optyki korekcyjnej COSTAR podczas misji serwisowej Kosmicznego Teleskopu Hubble'a w grudniu 1993 r. Fot. NASA/ESA

<sup>1</sup> Tekst ukazał się pierwotnie na profilu Planetarium Centrum Nauki Kopernik, którego Autor jest pracownikiem.

# Częściowe zaćmienie Słońca

## – astronomiczne wydarzenie wiosny 2025 roku

Na początku tego artykułu zwracamy się z apelem do naszych czytelników o przestrzeganie zasad bezpiecznej obserwacji tarczy Słońca i zachowaniu szczególnych środków ostrożności. Obserwacje tarczy słonecznej bez odpowiednich filtrów lub teleskopów zaopatrzonych w te filtry grożą poważnym uszkodzeniem lub nawet utratą wzroku. Kilka sekund nieuwagi może doprowadzić do utraty wzroku na całe życie!

Marcin Wesołowski, Aleksandra Bis, Joanna Banachyk

W dniu 29 marca 2025 roku po ponad dwuletniej przerwie ponownie będziemy świadkami częściowego zaćmienia Słońca. Zjawisko to zaliczane jest do najbardziej spektakularnych zjawisk, które zachodzą w ciągu dnia na niebie. W ogólności zjawisko zaćmienia polega na przesłonięciu fragmentu lub całej tarczy Słońca przez Księżyc. Aby doszło do tego zjawiska to trzy ciała niebieskie Słońce, Ziemia i Księżyc muszą ustawić się w linii prostej co oznacza, że zaćmienie może wystąpić tylko podczas nowiu.

To jaka część Słońca zostanie przesłonięta przez Księżyc zależy od tego, gdzie względem cienia Księżyca znajduje się obserwator (Rys. 1). Jeżeli obserwator znajduje się w stożku cienia to jest świadkiem całkowitego zaćmienia Słońca (obszar 1 na Rys. 1). Natomiast jeżeli obserwator znajduje się w półcieniu stożka to jest świadkiem częściowego zaćmienia Słońca (obszar 2 na Rys. 1). Im obserwator bardziej zbliży się do cienia stożka tym większa część tarczy Słońca zostanie przed nim zakryta. W takim przypadku możemy mówić o wielkości zaćmienia Słońca, czyli ułamku średnicy tarczy Słońca, która została zakryta przez Księżyc. Jeśli obserwator znajduje się poza półcieniem i cieniem stożka nie będzie świadkiem zjawiska zaćmienia.

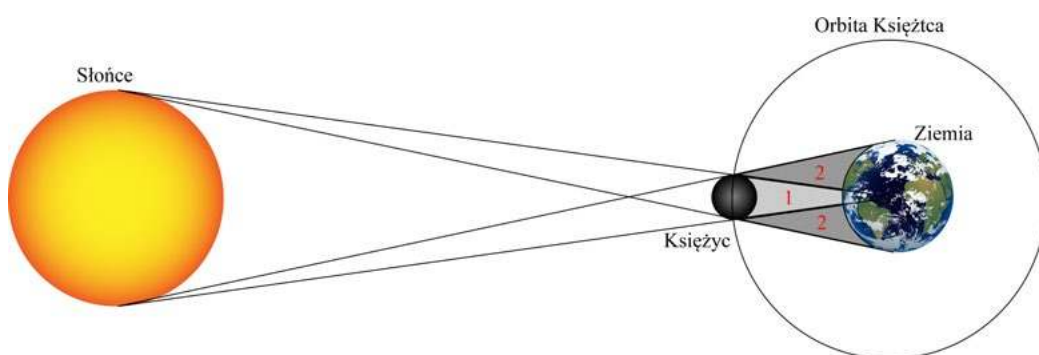
Szczegółowe omówienie zaćmienia Słońca, czyli geometrii układu Słońce – Ziemia – Księżyc można znaleźć między innymi w naszych artykułach (Gronkowski i Wesołowski, 2015a, 2015b; Wesołowski i Gronkowski 2021). W tym artykule ograniczamy się tylko do krótkiego raportu z obserwacji częściowego zaćmienia Słońca z Obserwatorium Astronomicznego Uniwersytetu Rzeszowskiego.

### Metody obserwacyjne

Obserwacje tarczy Słońca wymagają zachowania należytej ostrożności, ze względu na dużą jego jasność wizualną wynoszącą – 26.74 magnitudo. Aby móc w sposób bezpieczny dla naszego wzroku obserwować Słońce i zjawiska widoczne na jego tarczy (plamy, pochodnie, protuberancje oraz granulację powierzchni, która przypomina strukturę plastra miodu) należy wykorzystać jedną z czterech metod.

Pierwszą i najprostszą metodą obserwacji tarczy słonecznej jest metoda projekcyjna (metoda A). Polega ona na rzutowaniu obrazu tarczy słonecznej na ekran. Teleskop należy ustawić w taki sposób, aby jego soczewka była zwrócona w stronę Słońca, a okular skierowany w stronę ekranu. W takiej konfiguracji światło słoneczne pada na soczewkę, przechodząc przez teleskop przez jego okular i padając na ekran. Aby uzyskać ostry obraz tarczy słonecznej na ekranie, musimy skupić promienie słoneczne, odpowiednio manipulując ich odległością od okularu teleskopu. Przy stosowaniu metody projekcyjnej zabrania się patrzenia na tarczę słoneczną od strony okularu dla bezpieczeństwa naszego wzroku.

Drugą metodą bezpiecznej obserwacji i fotografowania jest użycie aparatu cyfrowego na obiektywie, na który należy nałożyć filtr Baadera (metoda B). Oznacza to, że filtr musi znajdować się w najbardziej zewnętrznej części naszego układu obserwacyjnego. Ponadto filtr ten musi być ściśle przymocowany do obiektywu aparatu. Głównym zadaniem tego filtra jest redukcja światła słonecznego poniżej 1/100 000 jego normalnej jasności, czyli do poziomu nieszkodliwego dla oczu obserwatora. Ten sam filtr można również zastosować w teleskopie przeznaczonym do obserwacji nocnego nieba, pod warunkiem, że średnica soczewki jest taka sama.



Rys. 1. Schemat geometryczny obrazujący zaćmienie Słońca. Na rysunku przyjęto następujące oznaczenia: 1 – to obszar (pas), w którym następuje całkowite zaćmienie Słońca, a 2 – to obszar (pas), w którym następuje częściowe zaćmienie Słońca.



Foto 1. Początkowa faza częściowego zaćmienia Słońca – fotografia wykonana metodą projekcji rzutowej.

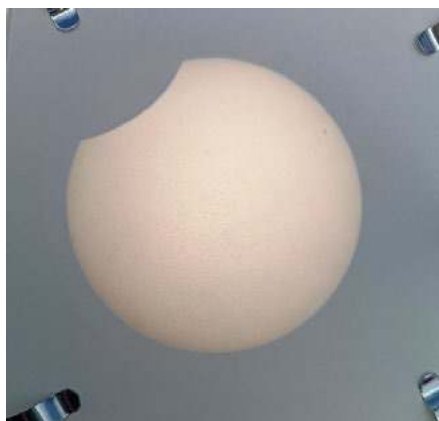


Foto 2. Maksymalna faza częściowego zaćmienia Słońca – fotografia wykonana metodą projekcji rzutowej.



Foto 3. Końcowa faza częściowego zaćmienia Słońca – fotografia wykonana metodą projekcji rzutowej.

Trzecia metoda to wykorzystanie refraktora Coude (150/2250), który został wyposażony w filtr szklany (metoda C) do bezpiecznej obserwacji zjawisk widocznych na tarczy Słońca. Dodatkowym udogodnieniem podczas obserwacji jest to, że refraktor ten posiada automatyczny mechanizm zegarowy, który umożliwia śledzenie danego ciała niebieskiego.

Obecnie najpopularniejszą metodą obserwacji tarczy Słońca jest wykorzystanie profesjonalnych teleskopów słonecznych (metoda D). Teleskopy tego typu są fabrycznie wyposażone w filtry redukujące natężenie światła słonecznego, np. Coronado SolarMax II 40 mm. Teleskop ten umożliwia szczegółową obserwację tarczy Słońca w wąskim paśmie H-alfa. Teleskop ten pozwala również na automatyczne śledzenie pozornego ruchu Słońca na niebie.

## Przebieg zjawiska

Częściowe zaćmienie Słońca dla Rzeszowa w dniu 29 marca 2025 roku rozpoczęło się o godzinie 11:56. W tym samym czasie nastąpił pierwszy kontakt Słońca z Księżycem. Maksymalna faza zaćmienia Słońca nastąpiła o godzinie 12:27. Koniec częściowego zaćmienia Słońca dla Rzeszowa miał miejsce o godzinie 12:58. Był to moment drugiego i ostatniego kontaktu Słońca z Księżycem podczas tego zaćmienia. Oznacza to, że zjawisko zaćmienia trwało nieco ponad godzinę. Warunki atmosferyczne



Foto 4. Początkowa faza częściowego zaćmienia Słońca – fotografia wykonana przy użyciu cyfrowego aparatu fotograficznego zaopatrzonego w filtr wykonany z foli Baadera.



Foto 5. Maksymalna faza częściowego zaćmienia Słońca – fotografia wykonana przy użyciu cyfrowego aparatu fotograficznego zaopatrzonego w filtr wykonany z foli Baadera.



Foto 6. Początkowa faza częściowego zaćmienia Słońca – fotografia wykonana przy użyciu refraktora Coude i smartfonu.



Foto 7. Maksymalna faza częściowego zaćmienia Słońca – fotografia wykonana przy użyciu refraktora Coude i smartfonu.



Foto 8. Końcowa faza częściowego zaćmienia Słońca – fotografia wykonana przy użyciu refraktora Coude i smartfonu.

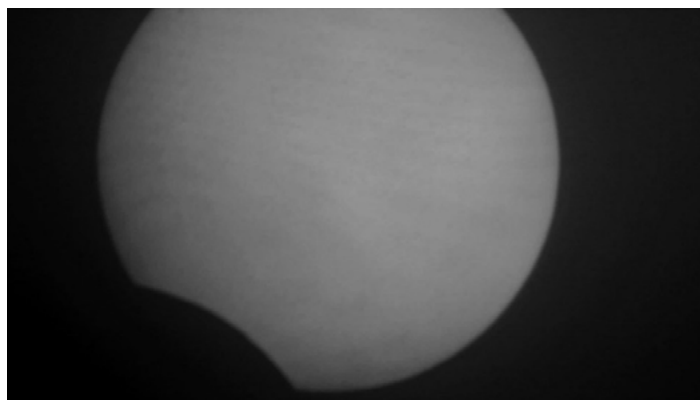


Foto 9. Przykładowa fotografia częściowego zaćmienia Słońca w fazie maksymalnej wykonano za pomocą teleskopu Coronado SolarMax II 40 połączonego z kamerą okularową Bresser MikrOkular Full HD.

w czasie zaćmienia charakteryzowały się umiarkowanym zachmurzeniem. W maksymalnej fazie częściowego zaćmienia Słońca wielkość zaćmienia (ułamek średnicy Słońca, który został zasłonięty przez Księżyc) dla Rzeszowa wynosiła 0,0962. Oznacza to, że zaćmienie obserwowane z okolic Rzeszowa było bardzo płytkie, o czym świadczy stosunkowo niewielka wartość parametru  $k$  (wielkość zaćmienia). Do wykonania zdjęć Słońca w metodach A i B wykorzystano cyfrowy aparat fotograficzny Cannon PowerShot SX70 HS, w metodzie C wykorzystano kamerę w smartfonie, a w metodzie D wykorzystano cyfrową kamerę okularową Bresser MikrOkular Full HD. Stosując metody bezpiecznej obserwacji tarczy słonecznej na fotografiach (Foto 1-9) przedstawiono galerię zdjęć z przebiegu częściowego zaćmienia Słońca.

### Subiektywny spadek jasności Słońca

W maksymalnej fazie częściowego zaćmienia Słońca wielkość zaćmienia dla Rzeszowa była równa 0,0962. Wykorzystując prawo Pogsona można wyprowadzić prostą zależność, na podstawie której można obliczyć spadek jasności Słońca w czasie zaćmienia. W tym miejscu podkreślimy wyraźnie, że „spadek jasności” to jest tylko odczucie obserwatora, gdyż w rzeczywistości jasność wizualna Słońca w czasie zaćmienia nie zmienia się.

Spadek jasności możemy obliczyć na podstawie zależności:

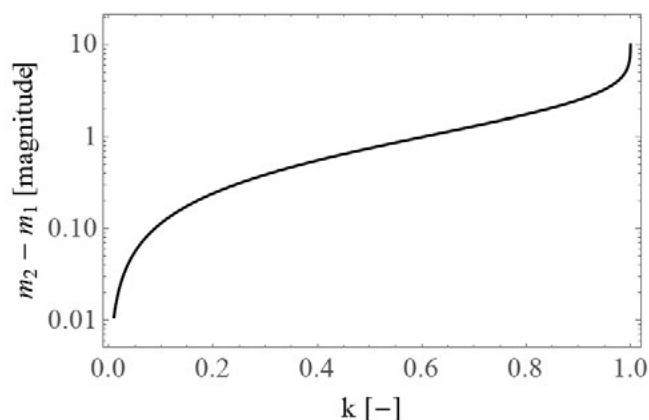
$$m_2 - m_1 = -2.5 \log(1 - k), \quad (1)$$

gdzie  $m_1$  to jasność wizualna Słońca,  $m_2$  to jasność wizualna Słońca w czasie zaćmienia, a  $k$  to wielkość zaćmienia. Przekształcając równanie (1) można na jego podstawie obliczyć jasność Słońca w czasie zaćmienia:

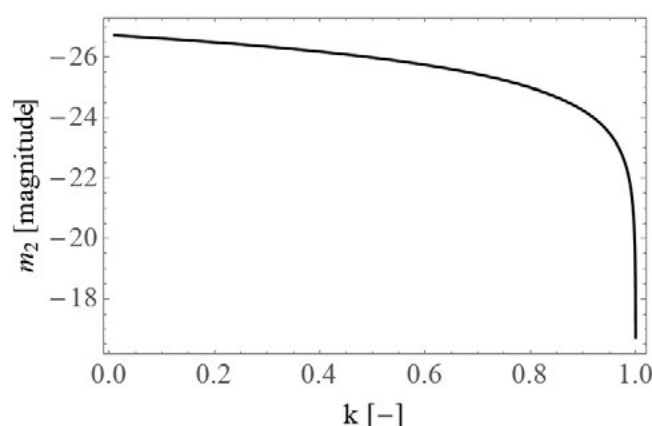
$$m_2 = -2.5 \log(1 - k) + m_1. \quad (2)$$

Wykorzystując równania (1) i (2) oraz program Mathematica wygenerowano dwa rozkłady odpowiednio dla spadku jasności (rys. 2) oraz jasności Słońca w czasie zaćmienia (rys. 3).

Dokonując analizy otrzymanych wyników obliczeń, które zostały przedstawione na rysunkach (2-3) łatwo można zauważyć, że głównym czynnikiem mającym



Rys. 2. Spadek jasności Słońca w czasie zaćmienia jako funkcja parametru wielkości zaćmienia.



Rys. 3. Rozkład jasności Słońca w czasie zaćmienia jako funkcja parametru wielkości zaćmienia.

wpływ na spadek jasności i jasność Słońca w czasie zaćmienia jest wielkość zaćmienia.

Biorąc pod uwagę wielkość zaćmienia w fazie maksymalnej dla Rzeszowa ( $k = 0,0962$ ) łatwo można zobaczyć, że subiektywny spadek jasności wyniósł zaledwie 0.11 magnitudo, co przekłada się na jasność wizualną Słońca w czasie zaćmienia równą  $-26.63$  magnitudo. Oznacza to, że gdybyśmy nie wiedzieli, że w dniu 29 marca 2025 roku wystąpiło zaćmienie Słońca to moglibyśmy po prostu przeoczyć ten kosmiczny taniec w wykonaniu Słońca, Ziemi i Księżyca.

dr hab. Marcin Wesołowski, prof. UR<sup>1,2</sup>  
Aleksandra Bis<sup>3</sup>, Joanna Banaczyk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Uniwersytet Rzeszowski, Wydział Nauk Ścisłych, Instytut Nauk Fizycznych,

<sup>2</sup>Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy Techniczno-Przyrodniczej

Uniwersytetu Rzeszowskiego,

<sup>3</sup>Studentki kierunku Optometria, Instytut Nauk Fizycznych, Uniwersytet Rzeszowski.

#### LITERATURA:

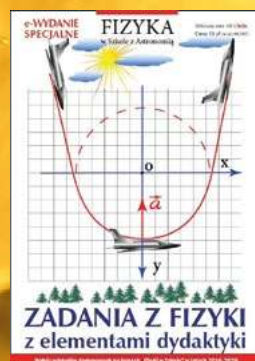
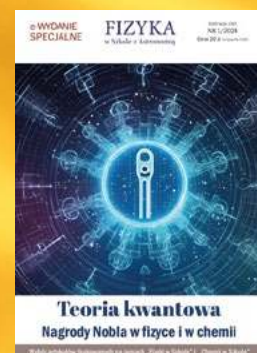
- [1] Harrington, P., S., 1999, Zaćmienie! Co, gdzie, kiedy, dlaczego i jak? Prószyński i S-ka, Warszawa.
- [2] Rybka, E., 1976, Astronomia ogólna, PWN, Warszawa.
- [3] Borkowski, K. M., 1991, Astronomiczne obliczenia nie tylko dla geografów, UMK Toruń.
- [4] Artymowicz, P., 1995, Astrofizyka układów planetarnych, Wyd. Naukowe PWN.
- [5] Gronkowski P., Wesołowski M., 2015, Zaćmienia Słońca – fakty i mity, cz. I: Teoria, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 5, str. 32 – 37.
- [6] Gronkowski P., Wesołowski M., 2015, Zaćmienia Słońca – fakty i mity, cz. II: Zadania, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 6, str. 29 – 31.
- [7] Wesołowski M., Gronkowski P., 2021, Częściowe zaćmienie Słońca – 10.06.2021 – astronomiczne wydarzenie czerwca, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 4, str. 48– 50.

# Cyfrowe wydania specjalne

## Fizyki w Szkole

### Tylko w wersji PDF!

Już od 10 zł!  
Wysyłamy na adres  
mailowy!



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

eprasa.pl 4f21a3cd74

# WYDANIE SPECJALNE FIZYKI W SZKOLE

WERSJA ELEKTRONICZNA – PLIK PDF

- ✓ Jak to się zaczęło?
- ✓ Co to są wielkie pęki?
- ✓ Promieniowanie kosmiczne a fizyka cząstek elementarnych
- ✓ Promieniowanie kosmiczne a życie na Ziemi
- ✓ Zapomniani odkrywcy
- ✓ W poszukiwaniu Wyspy Stabilności



**Cena  
25 zł**

(w tym 8% VAT)

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

eprasa.pl 4f21a3cd74