

# FIZYKA

## w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

385 (LXIV) indeks 35810X Nr 2 marzec/kwiecień 2023 CENA 40,00 zł (w tym 8% VAT)

**Jak interaktywnie uczyć  
o energii mechanicznej?**

**Za co Nobel 2022?**

Nierówność Bella  
Splątane fotony

**Zastosowanie metod  
spektrometrycznych**

**Mechanika nieba**  
Oddziaływanie planet  
i prędkości kosmiczne

**Współczesne zagrożenia  
w nauczaniu fizyki**



**Błażej Pascal**  
Matematyk, filozof, teolog,  
który trafił do układu SI



# PROMIENIOWANIE KOSMICZNE a ŻYCIE NA ZIEMI

# ROCZNIK 2022

## Teraz z 50% rabatem



**UWAGA!**  
Oferta ważna  
do wyczerpania zapasów!

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

eprasa.pl 20f4d87c0d

## Drodzy Czytelnicy!

**M**am przyjemność oddać w Państwa ręce drugi, wiosenny numer „Fizyki w Szkole”. Numer ten otwiera druga część artykułu – Jana Kurzyka „Za co Nobel 2022?”. Artykuł ten nie jest łatwy, ale stanowi on treściwy wykład współczesnej fizyki kwantowej.

W kolejnym artykule Tadeusz Wibig omawia wpływ promieniowania kosmicznego na życie na Ziemi. Ten artykuł jest dużo łatwiejszy w odbiorze, choć traktuje o kwestiach nie mniej ważnych. Autor przedstawia w nim nie tylko wpływ negatywny jakim jest powodowanie uszkodzeń DNA, ale przedstawia przykłady pozytywne takie jak wpływ kosmicznego promieniowania na ewolucję.

Energia stała się ostatnio jednym z najważniejszych tematów konwersacji, zwłaszcza w kontekście wzrostu cen. Oczywiście mamy tu na myśli głównie energię elektryczną lub chemiczną pochodzącą ze spalania benzyny czy gazu. Energia dla fizyka jest czymś innym, ale jak taką fizyczną energię poprawnie przedstawić, a w dodatku zrobić to w atrakcyjnej formie? Tego mogą się Państwo dowiedzieć z artykułu Grzegorza Karwasza i Andrzeja Karbowskiego – „Z górki na pazurki, czyli jak interaktywnie uczyć o energii mechanicznej”. Głównym jego bohaterem jest równia pochyła, ale nie jedynym. Równia pochyłą zajmował się sam Galileusz.

Innym wielkim naukowcem, który pozostawił swój trwały ślad w historii był Błażej Pascal. Zajmował się nie tylko ciśnieniem, ale też innymi dziedzinami wiedzy. Osobom zainteresowanym polecamy artykuł w naszym czasopiśmie poświęcony tej niezwykle postaci.

Oczywiście pozostałe artykuły też są warte uwagi. Kończąc życzę państwu udanej lektury.

W imieniu redakcji

Redaktor prowadzący  
Zbigniew Wiśniewski

## Fizyka wczoraj, dziś, jutro

### 4 Za co Nobel 2022? Część 2. Nierówność Bella. Eksperymenty ze splątanymi fotonami ■ Jan Kurzyk

W latach 30. ubiegłego wieku toczyła się gorąca debata pomiędzy Einsteinem i Bohrem o rozumienie mechaniki kwantowej, a właściwie o to, jakimi prawami rządzi się świat kwantowy.

### 11 Promieniowanie kosmiczne a życie na Ziemi ■ Tadeusz Wibig

Promieniowanie kosmiczne dochodzi do nas i w dzień, i w nocy, i latem, i zimą. Cały czas bombardują nas wysokoenergetyczne cząstki z kosmosu i odkąd udaje nam się je mierzyć, jest go zasadniczo tyle samo. Zasadniczo, ale nie do końca.



### 39 Magazyny ciepła nowym trendem w przechowywaniu energii

■ PAP – Nauka w Polsce

### 40 Niezwykła, pionierska, wynalazczyni i badaczka Hertha Ayrton w 100-lecie śmierci ■ Kazimierz Mikulski

## Z naszych lekcji

### 18 Z górki na pazurki, czyli jak interaktywnie uczyć o energii mechanicznej

■ Grzegorz Karwasz, Andrzej Karbowski

Równia pochyła to taka dydaktyczna tortura dla licealistów (i studentów również). Jedną siłą to sinus, druga cosinus, ale niedokładnie wiadomo, która jest która. Oczywiście, żartujemy: jeśli trzeba, to wiemy.



### 24 Zastosowanie metod spektrometrycznych ■ Andrzej Wasiak

### 28 Żyoty fizyków. Błażej Pascal (1623-1662) ■ Tadeusz Wibig

### 31 Prawda czy fałsz... (Impresja dydaktyczna) ■ Waldemar Reńda

### 34 Współczesne zagrożenia a nauczanie fizyki ■ Arleta Biegańska

### 37 Jak młodzi ludzie postrzegają fizykę?

■ Ewelina Kędzierska

## Astronomia dla każdego

### 44 Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba.

Cz. II ■ Marcin Wesołowski



**FIZYKA**  
w Szkole z Astronomią

NUMER 2 MARZEC/KWIECIEŃ 2023  
385 (LXIII) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 40,00 zł  
(w tym 8% VAT)

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

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

# Za co Nobel 2022?

## Część 2. Nierówność Bella, Eksperymenty ze splątanymi fotonami

W poprzedniej części artykułu [1] opisałem interpretację kopenhaską mechaniki kwantowej i paradoks Einsteina, Podolskiego i Rosena, który miał obalać tę interpretację. Wprowadziłem też pojęcie stanów splątanych. W tej części zajmę się nierównościami Bella, które wskazały drogę do eksperymentalnego rozstrzygnięcia sporu między Einsteinem i Bohrem oraz eksperymentami, które ten spór zakończyły.

Jan Kurzyk

### Paradoks EPR

Zanim przejdę do nierówności Bella przypomnę kilka zagadnień, które omawiałem w poprzedniej części artykułu. Zachęcam jednak do zapoznania się z poprzednim artykułem, gdyż wiele pojęć, które tam zaprezentowanych będę traktował tu jako znane czytelnikowi.

W latach 30. ubiegłego wieku toczyła się gorąca debata pomiędzy Einsteinem i Bohrem o rozumienie mechaniki kwantowej, a właściwie o to, jakimi prawami rządzi się świat kwantowy. Einstein nie zgadzał się z interpretacją kopenhaską mechaniki kwantowej, której głównym twórcą był Bohr. Zgodnie z tą interpretacją świat subatomowy jest niedeterministyczny. Własności obiektów kwantowych, których stany opisywane są funkcjami falowymi wynikającymi z równań kwantowych, nie są określone. A zatem w świecie kwantowym, inaczej niż w świecie klasycznym, pomiar nie stwierdza jedynie jaką wartość ma mierzona własność badanego obiektu, ale niejako kreuje tę wartość, gdyż zgodnie z interpretacją kopenhaską w wyniku pomiaru realizuje się jedna z możliwych wartości mierzonej wielkości. W konsekwencji w mechanice kwantowej pomiar nie dostarcza nam informacji o stanie układu przed pomiarem, lecz o stanie układu tuż po pomiarze.

W 1935 roku Einstein wraz z Podolskim i Rosenem opisał myślowy eksperyment zwany dziś eksperymentem lub paradoksem EPR [2]. Najczęściej ten eksperyment podawany jest w innej wersji, którą w 1957 roku zaproponował David Bohm wraz ze swoim studentem Yakirem Aharonovem. Bohm i Aharonov opisali pierwotny argument Einsteina, Podolskiego i Rosena wykorzystując pojęcie spinu. W eksperymencie tym dwie cząstki o spinie  $\frac{1}{2}$  tworzą układ w stanie singletowym. Oznacza to, że spin wypadkowy układu jest zerowy. Następnie rozdzielamy obie cząstki, nawet na bardzo dużą odległość i wykonujemy pomiary rzutów spinów obu cząstek na ten sam kierunek. Pomiar wykaże, że cząstki mają spiny przeciwne, czyli jeśli pierwsza ma spin skierowany „w górę” to druga ma spin skierowany „w dół” i *vice versa*. Nie byłoby w tym nic dziwnego, gdyby stany obu cząstek były ustalone już przed pomiarem, tak jak chciał tego Einstein i tak jak jest w przypadku obiektów klasycznych. Ale zgodnie z interpretacją kopenhaską mechaniki kwantowej jest inaczej. Dopiero pomiar „wymusza” na obiekcie wybór jednego z możliwych stanów. Jeśli tak jest, to według Einsteina, po wykonaniu pomiaru spinu jednej z cząstek druga z nich musiałaby „zostać poinformowana” o stanie spinowym tej pierwszej, żeby „wiedzieć” jak ma ustawić swój spin. Jednak, jeśli odległość między cząstkami będzie większa niż droga, jaką jest w stanie pokonać światło w próżni w czasie

między pomiarami spinów obu cząstek, to przekaz informacji między cząstkami musiałby odbywać się z prędkością większą niż prędkość światła w próżni co przeczy podstawie szczególnej teorii względności – zasadzie realizmu lokalnego. To tak jakby umieścić magnesy w różnych galaktykach i po obrocie jednego z nich natychmiastowo obrócił się ten drugi. Dla Einsteina był to dowód na niekompletność mechaniki kwantowej i niepoprawność interpretacji kopenhaskiej. Nazywał on tę sytuację „*upiornym działaniem na odległość*”. Schrödinger nadał temu zjawisku mniej dramatyczną nazwę *splątania kwantowego*.

Stan układu singletowego cząstek o spinie  $\frac{1}{2}$  jest stanem maksymalnie splątany [1], który możemy zapisać następująco

$$|\Psi_{AB}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B - |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B).$$

Pomiar spinu jednej z cząstek powoduje kolaps funkcji falowej i układ przechodzi z jednakowym prawdopodobieństwem  $\frac{1}{2}$  w jeden z dwóch stanów

$$|\Psi\rangle_{AB} = |\uparrow\rangle_A |\downarrow\rangle_B$$

lub

$$|\Psi\rangle_{AB} = |\downarrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B.$$

Ten stan nie jest już stanem splątany, gdyż jest iloczynem tensorowym stanów obu cząstek, które znajdują się teraz w czystych stanach

$$|\Psi\rangle_A = |\uparrow\rangle_A, \quad |\Psi\rangle_B = |\downarrow\rangle_B$$

lub

$$|\Psi\rangle_A = |\downarrow\rangle_A, \quad |\Psi\rangle_B = |\uparrow\rangle_B.$$

## Nierówność Bella

Aby rozstrzygnąć, czy rację miał Bohr, czy Einstein należałoby przeprowadzić realny, a nie myślowy eksperyment. Ale jak przeprowadzić eksperyment, który odpowie na pytanie, czy fakt, że spin drugiej badanej cząstki jest zawsze przeciwny do spinu tej pierwszej wynika z tego, że cząstki już przed pomiarem miały dobrze określone spiny, czy też dlatego, że znajdowały się one w stanie splątany? Odpowiedzi na to pytanie udzielił w 1964 roku północnoirlandzki fizyk John Stewart Bell<sup>1</sup> w artykule poświęconym paradoksowi EPR w wersji podanej przez Bohma [3].

Jedną z prób uniknięcia paradoksu EPR była teoria zmiennych ukrytych. Zgodnie z tą teorią istnieją niemierzalne *zmienne ukryte* decydujące o wartościach zmierzalnych. Bell próbował stworzyć model spinowego układu singletowego zawierający zmienne ukryte, który odtwarzałby przewidywania mechaniki kwantowej, a jednocześnie spełniał zasadę realizmu lokalnego. Następnie udowodnił, że jest to możliwe tylko w pewnych przypadkach. Opisuje się to jako twierdzenie Bella, które w skrócie można sformułować następująco: „Żad-

na lokalna teoria zmiennych ukrytych nie może opisać wszystkich zjawisk mechaniki kwantowej”.

Prześledźmy niektóre elementy rozumowania Bella. Niech  $A$  oznacza wynik pomiaru rzutu spinu pierwszej cząstki na kierunek wyznaczony przez wektor  $\vec{a}$ , a  $B$  wynik pomiaru rzutu spinu drugiej cząstki naszego układu singletowego na kierunek wyznaczony przez wektor  $\vec{b}$ . Przypiszmy zmiennym  $A$  i  $B$  wartości  $\pm 1$ , przy czym wartość  $+1$  odpowiada wynikowi pomiaru „spin w górę” [1] (czyli spin zgodny z kierunkiem pomiaru), a wartość  $-1$  odpowiada wynikowi pomiaru „spin w dół” (czyli spin przeciwnie skierowany do wybranego kierunku). Obie zmienne zależą od przypisanych sobie kierunków pomiaru oraz, zgodnie z teorią zmiennych ukrytych, od zmiennej ukrytej  $\lambda$ . Ważnym jest założenie, że zmienna  $B$  nie zależy od kierunku w jakim mierzymy rzut spinu pierwszej cząstki, a zmienna  $A$  nie zależy od kierunku w jakim mierzymy rzut spinu cząstki drugiej. Innymi słowy mamy do czynienia ze zmiennymi niezależnymi.

Założmy za Bellem, że zmienna ukryta opisująca nasz układ singletowy jest jednostkowym wektorem  $\vec{\lambda}$  takim, że

$$A(\vec{a}, \vec{\lambda}) = \text{sgn}(\vec{a} \cdot \vec{\lambda})$$

oraz

$$B(\vec{b}, \vec{\lambda}) = -\text{sgn}(\vec{b} \cdot \vec{\lambda}).$$

W powyższych wyrażeniach  $\text{sgn}$  jest funkcją znaku (łac. signum) przyjmującą wartość  $+1$  dla argumentów dodatnich,  $-1$  dla argumentów ujemnych i  $0$ , gdy argument jest zerowy (w naszych rozważaniach pominiemy ten trzeci przypadek przyjmując, że prawdopodobieństwo takiej sytuacji jest zerowe).

Bell analizował wartość oczekiwaną (wartość średnią) iloczynu zmiennych  $A$  i  $B$  i oznaczył tę wartość symbolem  $P$ . Ale takie oznaczenie może kojarzyć się z prawdopodobieństwem, dlatego oznaczmy ją symbolem  $E$  (ang. *Expected value*, wartość oczekiwana). Jeśli przez  $\rho$  oznaczmy gęstość prawdopodobieństwa zmiennej ukrytej, to średnia wartość iloczynu zmiennych  $A$  i  $B$  będzie równa

$$E(\vec{a}, \vec{b}) = \iint_S A(\vec{a}, \vec{\lambda}) B(\vec{b}, \vec{\lambda}) \rho(\vec{\lambda}) dS.$$

Całkowanie przeprowadzamy po powierzchni sfery  $S$  o promieniu  $1$ . Każdemu punktowi tej sfery przyporządkowujemy wektor zmiennej ukrytej  $\vec{\lambda}$  wychodzący ze środka sfery i wskazujący dany punkt na sferze. Założmy, że zmienna ukryta podlega jednorodnemu (we wszystkich kierunkach) rozkładowi gęstości prawdopodobieństwa. Ponieważ gęstość prawdopodobieństwa musi być unormowana do jedynki, to

$$\iint_S \rho(\vec{\lambda}) dS = \rho(\vec{\lambda}) \iint_S dS = \rho(\vec{\lambda}) 4\pi 1^2 = 1.$$

A zatem dla wszystkich wektorów  $\vec{\lambda}$

$$\rho(\vec{\lambda}) = \frac{1}{4\pi}.$$

<sup>1</sup> W 1935 roku Grete Herman wpadła na bardzo podobny pomysł, ale jej publikacja nie została doceniona przez współczesnych i odkryta została dopiero niedawno [4].

Podczas całkowania wyrażenia na  $E$  po górnej półsfery takiej jak na rysunku 1 (a) mamy

$A(\vec{a}, \vec{\lambda}) = +1$  dla wszystkich wektorów  $\vec{\lambda}$  wskazujących punkty na całej półsfery,

$B(\vec{b}, \vec{\lambda}) = +1$  dla wektorów  $\vec{\lambda}$  wskazujących punkty na zacienionej na rysunku części półsfery,

$B(\vec{b}, \vec{\lambda}) = -1$  dla wektorów  $\vec{\lambda}$  wskazujących punkty na pozostałej części półsfery.

Podczas całkowania wyrażenia na  $E$  po dolnej półsfery takiej jak na rysunku 1 (b) mamy

$A(\vec{a}, \vec{\lambda}) = -1$  dla wszystkich wektorów  $\vec{\lambda}$  wskazujących punkty na całej półsfery,

$B(\vec{b}, \vec{\lambda}) = -1$  dla wektorów  $\vec{\lambda}$  wskazujących punkty na zacienionej na rysunku części półsfery,

$B(\vec{b}, \vec{\lambda}) = +1$  dla wektorów  $\vec{\lambda}$  wskazujących punkty na pozostałej części półsfery.

Zacienione części półsfery z rysunku 1 mają powierzchnie

$$S_1 = 2\pi 1^2 \cdot \frac{\theta}{\pi} = 2\theta.$$

Pozostałe części półsfery mają powierzchnie

$$S_2 = 2\pi 1^2 - S_1 = 2\pi - 2\theta.$$

Zatem

$$E(\vec{a}, \vec{b}) = \frac{1}{4\pi} \cdot 2 \cdot (1 \cdot 1 \cdot 2\theta + (-1) \cdot 1 \cdot (2\pi - 2\theta)).$$

Ostatecznie

$$E(\vec{a}, \vec{b}) = -1 + \frac{2\theta}{\pi}.$$

Tymczasem wartość średnia iloczynu zmiennych  $A$  i  $B$  przewidywana przez mechanikę kwantową (w przypadku pomiaru rzutów spinów cząstek układu singletowego na kierunku tworzące kąt  $\theta$ ) wynosi

$$E(\vec{a}, \vec{b}) = -\cos(\theta).$$

Dla kątów  $\theta$  równych  $0$ ,  $\pi/2$  lub  $\pi$  oba wzory dają ten sam wynik:

$$E(\vec{a}, \vec{b}) = -1, \text{ gdy } \vec{b} = \vec{a} \text{ (pełna korelacja),}$$

$$E(\vec{a}, \vec{b}) = 0, \text{ gdy } \vec{b} \perp \vec{a} \text{ (brak korelacji),}$$

$$E(\vec{a}, \vec{b}) = +1, \text{ gdy } \vec{b} = -\vec{a} \text{ (pełna korelacja).}$$

Zarówno w przypadku modelu Bella, jak i z wzoru wynikającego z mechaniki kwantowej wyniki pomiarów w kierunkach  $\vec{b} = \vec{a}$  ( $\theta = 0$ ) lub  $\vec{b} = -\vec{a}$  ( $\theta = \pi$ ) są w pełni skorelowane. Wynik pomiaru rzutu spinu jednej z cząstek determinuje wynik rzutu spinu drugiej z nich. Zgodność obu wzorów dostajemy również w przypadku pomiaru w kierunkach prostopadłych ( $\theta = \pi/2$ ). Wynik pomiaru rzutu spinu jednej z cząstek w żaden sposób nie determinuje wyniku pomiaru dla drugiej cząstki. Na tym jednak podobieństwa kończą się. Dla kątów innych niż wymienione wyżej korelacje „klasyczne” różnią się od korelacji przewidywanych przez mechanikę kwantową. Pokazują to wykresy na rysunku 2.

Jak widzimy eksperymentalne wyznaczenie funkcji korelacyjnej  $E$  dla kątów różnych od  $0$ ,  $\pi/2$  i  $\pi$  pozwoliłoby na rozstrzygnięcie dylematu, czy istnieje kwantowe splątanie, czy też stany obiektów kwantowych są dobrze określone jeszcze przed pomiarem. Zwykle jednak w kontekście artykułu Bella mówi się o nierównościach Bella. Jedną z tych nierówności jakie wyprowadził Bell jest następująca

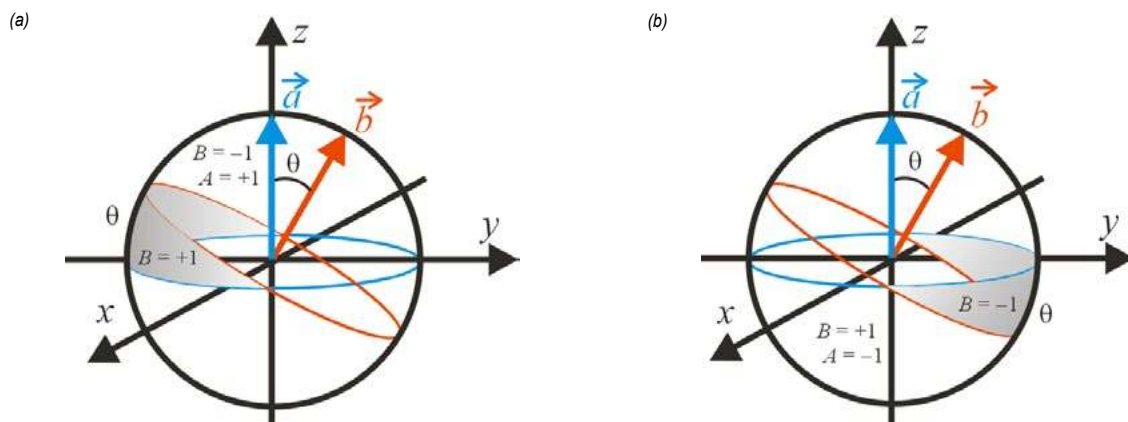
$$|E(\vec{a}, \vec{b}) - E(\vec{a}, \vec{c})| \leq 1 + E(\vec{b}, \vec{c}).$$

Nierówność Bella stanowi ważny i przełomowy wkład w sporze na temat rozumienia mechaniki kwantowej. Za swoje osiągnięcie Bell nominowany był do nagrody Nobla [4]. Niestety zmarł (w 1990 roku) zanim komisja podjęła decyzję, a jak wiadomo nagrody Nobla nie przyznaje się pośmiertnie.

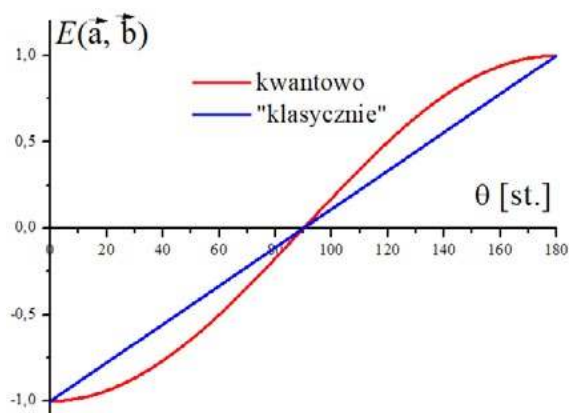
## Nierówność CHSH

Nierówność Bella jest trudna do weryfikacji eksperymentalnej. Praktyczniejszą wersję tej nierówności zaproponował w 1969 roku John Clauser i jego współpracownicy, Michael Horne, Abner Shimony i Richard Holt [5]. Ich nierówność nazywana jest nierównością CHSH (od pierwszych liter nazwisk) lub nierównością Bella-CHSH.

Tak jak poprzednio, założmy, że obie cząstki, które tworzą układ w stanie singletowym rozdzielamy i wysyłamy do dwóch oddległych laboratoriów wyposażonych



Rysunek 1. Wartości zmiennych  $A$  i  $B$  w przypadku wektorów zmiennej ukrytej skierowanych w kierunku górnej półsfery (a) i dolnej półsfery (b).



Rysunek 2. Wartość oczekiwana iloczynu zmiennych  $A$  i  $B$  w funkcji kąta między kierunkami bramek Sterna-Gerlacha. Czerwona linia reprezentuje wynik przewidywany przez mechanikę kwantową, a niebieska przewidywany przez teorię ze zmiennymi ukrytymi.

w bramki Sterna-Gerlacha, które możemy przed pomiarem ustawiać pod różnymi kątami. W laboratorium A będziemy przed pomiarem losowo wybierać jeden z dwóch kierunków pomiarów  $\vec{a}_1$  lub  $\vec{a}_2$ , a w laboratorium B niezależnie od tego co wybrano w laboratorium A będziemy wybierać losowo jeden z kierunków  $\vec{b}_1$  lub  $\vec{b}_2$ . Oznaczmy wynik pomiaru w laboratorium A symbolem  $A_1$ , gdy bramka Sterna-Gerlacha była ustawiona w kierunku  $\vec{a}_1$  i symbolem  $A_2$ , gdy kierunkiem był kierunek  $\vec{a}_2$ . W laboratorium 2 będziemy mieć wyniki pomiarów oznaczone odpowiednio symbolami  $B_1$  i  $B_2$ . Każda z tych zmiennych może przyjmować tylko dwie wartości  $+1$  (dla spinu w górę) i  $-1$  (dla spinu w dół).

Zastanówmy się jakie wartości może przyjmować następujące wyrażenie (teraz do oznaczenia wartości średnich będziemy używać nawiasów trójkątnych  $\langle \rangle$  zgodnie z tzw. notacją Diraca)

$$S = |\langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_2 B_2 \rangle|.$$

Aby formalnie wyliczyć wartość powyższej formy musimy w wyrażeniu na wartości średnie uwzględnić to, że prawdopodobieństwa poszczególnych iloczynów zależą również od zakładanej przez Bellę zmiennej ukrytej i wykonać uśrednienie zakładając jej rozkład. Żeby nie komplikować naszych rozważań, zamiast formalnego rachunku, podejźmy do tego intuicyjnie. Zauważmy, że zachodzi następująca równość

$$A_1 B_1 + A_1 B_2 + A_2 B_1 - A_2 B_2 = (A_1 + A_2) B_1 + (A_1 - A_2) B_2.$$

W wyrażeniu znajdującym się po prawej stronie tego równania znika zawsze jedno z wyrażeń albo  $(A_1 - A_2) B_2$ , gdy  $A_1 = A_2$ , albo  $(A_1 + A_2) B_2$ , gdy  $A_1 = -A_2$ . Z kolei gdy znika jedno z tych wyrażeń, to drugie przyjmuje wartość  $-2$  lub  $+2$ . Licząc wartość średnią zmiennej losowej mnożymy poszczególne wartości przez prawdopodobieństwa ich wystąpienia, a prawdopodobieństwa są liczbami z przedziału  $[0,1]$ , więc średnia wartość wyrażenia po lewej stronie musi mieścić się w przedziale  $[-2, +2]$ .

Teraz skorzystajmy z tego, że kierunki pomiaru w obu laboratoriach wybieramy losowo i niezależnie od siebie. Wiemy, że średnia sumy zdarzeń niezależnych jest równa sumie ich średnich, więc

$$\begin{aligned} \langle A_1 B_1 + A_1 B_2 + A_2 B_1 - A_2 B_2 \rangle \\ = \langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_2 B_2 \rangle. \end{aligned}$$

W konsekwencji otrzymujemy następującą nierówność

$$|\langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_2 B_2 \rangle| \leq 2.$$

Jest to nierówność CHSH wyprowadzona przez Clausera i jego współpracowników<sup>2</sup>. Nie jest to nierówność Bella, choć bardzo często właśnie ta nierówność nazywana jest błędnie nierównością Bella.

Podkreślmy, że zarówno nierówność Bella, jak i jej zmodyfikowana wersja – nierówność CHSH – wynika z zastosowania klasycznej statystyki bazującej na założeniu, że stan cząstek układu jest określony jeszcze przed pomiarem, a redukcja funkcji falowej następuje już w momencie rozdzielania cząstek, a nie dopiero w wyniku pomiaru spinu jednej z nich.

Prześledźmy konkretny przykład. Ustawmy kierunki pomiarów w obu laboratoriach w płaszczyźnie  $xz$ . Niech w laboratorium A kierunki  $\vec{a}_1$  i  $\vec{a}_2$  tworzą z osią  $x$  kąty odpowiednio  $\alpha_1 = 0$  i  $\alpha_2 = \pi/2$ . Zaś w laboratorium B kierunki pomiaru  $\vec{b}_1$  i  $\vec{b}_2$  tworzą z osią  $x$  kąty, odpowiednio,  $\beta_1 = \pi/4$  i  $\beta_2 = 7\pi/4$  (jak na rysunku 3). Wówczas kąty między kierunkami  $\vec{a}_1$  i  $\vec{b}_1$ ,  $\vec{b}_2$  i  $\vec{a}_1$ ,  $\vec{a}_2$  i  $\vec{b}_1$  są równe  $\pi/4$ , a kąt między kierunkami  $\vec{a}_2$  i  $\vec{b}_2$  jest równy  $3\pi/4$ .

Korzystając z wzoru na wartość średnią iloczynu zmiennych  $A$  i  $B$  jaki uzyskaliśmy w poprzednim punkcie dostajemy w naszym przypadku

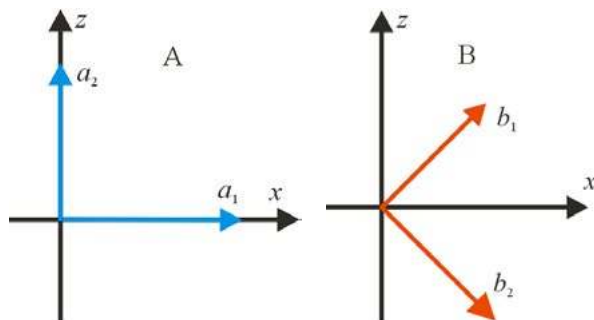
$$\begin{aligned} A_1 B_1 &= -1 + \frac{2\pi}{\pi} = -\frac{1}{2}, & A_1 B_2 &= -1 + \frac{2\pi}{\pi} = -\frac{1}{2}, \\ A_2 B_1 &= -1 + \frac{2\pi}{\pi} = -\frac{1}{2}, & A_2 B_2 &= -1 + \frac{2\pi}{\pi} = \frac{1}{2}. \end{aligned}$$

Ostatecznie

$$|\langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_2 B_2 \rangle| = 2.$$

Czyli dostaliśmy maksymalną wartość przewidzianą przez nierówność Bella-CHSH.

Teraz przeprowadźmy analogiczne rachunki, ale na gruncie mechaniki kwantowej. Jak już podawałem w poprzednim punkcie (stosując inne oznaczenia) wartość średnia iloczynu zmiennych  $A_j$  i  $B_k$  wynosi



Rysunek 3. Kierunki pomiarów spinu cząstek w laboratorium A i B.

<sup>2</sup> W oryginalnym artykule [5] miała ona nieco inną postać, ale aktualnie podaje się ją najczęściej w zaprezentowanej tu postaci.

$$\langle A_j B_k \rangle = -\cos(\alpha_j - \beta_k).$$

A zatem dostajemy

$$A_1 B_1 = -\cos\left(-\frac{\pi}{4}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2},$$

$$A_1 B_2 = -\cos\left(-\frac{7}{4}\pi\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2},$$

$$A_2 B_1 = -\cos\left(\frac{\pi}{4}\right) = -\frac{\sqrt{2}}{2},$$

$$A_2 B_2 = -\cos\left(-\frac{5}{4}\pi\right) = \frac{\sqrt{2}}{2}.$$

Ostatecznie

$$|\langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_2 B_2 \rangle| = 2\sqrt{2} \approx 2,828 > 2.$$

Jak widzimy mechanika kwantowa łamie nierówność Bella-CHSH. Korelacje kwantowe są silniejsze niż klasyczne!

### Eksperyment Alaina Aspecta

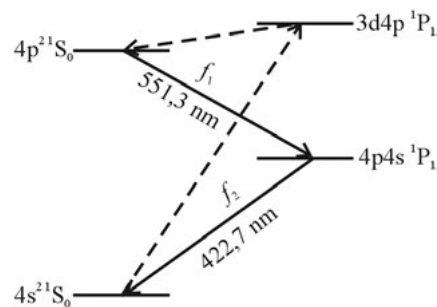
Pierwsze testy nierówności CHSH przeprowadzono w 1972 roku na uniwersytetach w Harvardzie i Berkeley. Zamiast cząstek o spinie  $\frac{1}{2}$ , w eksperymencie wykorzystano liniowo spolaryzowane fotony. Eksperymenty te były mało dokładne i dawały sprzeczne wyniki. W Harvardzie uzyskano zgodność z nierównościami Bella, a w Berkeley Stuart Freedman i John Clauser uzyskali wyniki zgodne z przewidywaniami mechaniki kwantowej [6].

Przełomowym był eksperyment wykonany w 1982 roku przez francuskiego fizyka Alaina Aspecta i jego współpracowników [7]. Podobnie jak we wcześniejszych eksperymentach tego typu, Aspect wykorzystał liniowo spolaryzowane fotony emitowane przez atomy wapnia w tzw. kaskadowej emisji fotonów. Atomy wapnia były wzbudzane przez dwa lasery jednomodowe do stanu  $4p^2\ ^1S_0$  (patrz rysunek 4). Z tego stanu atomy wapnia przechodzą do stanu  $4p4s\ ^1P_1$  emitując foton o długości 551,3 nm a następnie przechodzą natychmiast do stanu  $4s^2\ ^1S_0$  emitując foton o długości 422,7 nm. Jest to tzw. kaskadowa emisja fotonów. Źródło emitowało 50 mln par fotonów w ciągu sekundy.

Oba fotony emitowane przez atomy wapnia są w stanie maksymalnie splątany, który możemy opisać funkcją

$$|\Psi\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B + |\rightarrow\rangle_A |\rightarrow\rangle_B).$$

Sytuacja jest nieco inna niż w przypadku jaki opisywałem w wcześniej. W tamtym przypadku, ponieważ układ znajdował się w stanie singletowym, pomiary rzutów spinów na ten sam kierunek wykazywały, że spiny są do siebie przeciwnie skierowane. Natomiast z naszymi fotonami będącymi w stanie splątany podany wyżej jest nieco inaczej. Mierzając polaryzację fotonu możemy z jednakowym prawdopodobieństwem dostać polaryzację „pionową” ( $\uparrow$ ) lub „poziomą” ( $\rightarrow$ ). Ale jeśli zmierzmy polaryzację pierwszego fotonu w wybranym kierunku, a następnie polaryzację drugiego mierzoną w tym samym



Rysunek 4. Pierwsze 4 poziomy energetyczne atomu wapnia. Linie przerywane wskazują drogę wzbudzenia atomu ze stanu podstawowego  $4s^2\ ^1S_0$  do stanu  $4p^2\ ^1S_0$ .

kierunku, to okaże się, że oba mają taką samą polaryzację. Pomiar polaryzacji jednego z fotonów powoduje kolaps funkcji falowej i układ przechodzi z jednakowym prawdopodobieństwem  $\frac{1}{2}$  w jeden z dwóch stanów

$$|\Psi\rangle_{AB} = |\uparrow\rangle_A |\uparrow\rangle_B$$

lub

$$|\Psi\rangle_{AB} = |\rightarrow\rangle_A |\rightarrow\rangle_B.$$

Ten stan nie jest już stanem splątany, gdyż jest iloczynem tensorowym stanów obu fotonów, które znajdują się teraz w czystych stanach

$$|\Psi\rangle_A = |\uparrow\rangle_A, \quad |\Psi\rangle_B = |\uparrow\rangle_B$$

lub

$$|\Psi\rangle_A = |\rightarrow\rangle_A, \quad |\Psi\rangle_B = |\rightarrow\rangle_B.$$

Z mechaniki kwantowej wynika, że jeśli po pomiarze polaryzacji  $p_1$  pierwszego fotonu zmierzmy polaryzację drugiego fotonu w kierunku obróconym względem pierwszego o kąt  $\alpha$ , to prawdopodobieństwo, że polaryzacja  $p_2$  drugiego fotonu będzie taka jak pierwszego wyniesie

$$P(p_1 = p_2) = \cos^2(\alpha).$$

Zauważmy, że prawdopodobieństwo to tłumaczy prawo Malusa [8] odkryte przez francuskiego badacza Étienne-Louis Malusa żyjącego na przełomie XVIII i XIX wieku.

Do pomiaru polaryzacji obu fotonów Aspect użył metody, która pozwalała na wybór kierunków pomiaru dopiero wtedy, gdy fotony są już w locie. Oba pomiary wykonywane były w odstępie czasu, który uniemożliwiał „porozumiewanie się” między fotonami. Polaryzatorami były sześcienny polaryzacyjne zbudowane z dwóch szklanych pryzmatów z odpowiednią cienką warstwą dielektryczną znajdującą się na sklejonach ścianach pryzmatów. Dielektryk przepuszczał fotony jednej polaryzacji, a odbijał te drugie. Dzięki temu można było rejestrować fotony o obu polaryzacjach. We wcześniejszych eksperymentach stosowano polaryzatory jednokanałowe, które przepuszczały fotony o danej polaryzacji, a absorbowwały drugie. W związku z tym, w przypadku polaryzatorów jednokanałowych pojawiał się dylemat: czy brak zarejestrowanego fotonu oznacza jego poprzeczną polaryzację, czy też, że foton „zgubił” się (nie dotarł do polaryzatora).

W eksperymencie z fotonami liczymy nieco inną funkcję korelacji niż użyta w opisanym wyżej przykładzie ze spinami, a mianowicie

$$S = |\langle a_1 b_1 \rangle - \langle a_1 b_2 \rangle + \langle a_2 b_1 \rangle + \langle a_2 b_2 \rangle|$$

Znak minus pojawia się tu przed średnią  $a_1 b_2$ , a nie  $a_2 b_2$ , jak poprzednio. Różnica wynika z przyjętych w eksperymencie kątów polarymetrów. Kąty pomiędzy kierunkami pomiarów  $\vec{a}_1$  i  $\vec{b}_1$ ,  $\vec{b}_1$  i  $\vec{a}_2$ ,  $\vec{a}_2$  i  $\vec{b}_2$  wynosiły  $22,5^\circ$ , a kąt pomiędzy kierunkami  $\vec{a}_1$  i  $\vec{b}_2$   $67,5^\circ$  np. ( $\alpha_1 = 0^\circ$ ,  $\alpha_2 = 45^\circ$ ,  $\beta_1 = 22,5^\circ$ ,  $\beta_2 = 67,5^\circ$ ).

Jak już pisałem wyżej, zgodnie z przewidywaniami mechaniki kwantowej prawdopodobieństwo uzyskania tej samej polaryzacji ( $\uparrow\uparrow$ ) lub ( $\rightarrow\rightarrow$ ) na polaryzatorach ustawionych pod kątami  $\alpha$  i  $\beta$  odpowiednio wynosi

$$P(\uparrow\uparrow) = P(\rightarrow\rightarrow) = \frac{1}{2} \cos^2(\alpha - \beta).$$

W powyższym wzorze  $\frac{1}{2}$  wynika stąd, że mierząc polaryzację pierwszego fotonu możemy z jednakowym prawdopodobieństwem dostać polaryzację pionową lub poziomą. Dla kątów przyjętych w eksperymencie funkcja korelacji występująca po lewej stronie nierówności CHSH wyliczona na gruncie mechaniki kwantowej jest największa i wynosi w idealnym przypadku

$$S = 2\sqrt{2} \approx 2,828 > 2.$$

Trzeba jednak mieć na uwadze, że aparatura pomiarowa nie jest idealna. Dla przykładu odpowiednie współczynniki transmisji i odbicia dla polarymetrów, które dla danych typów polaryzacji w idealnym przypadku byłyby równe 1 wynosiły 0,950 dla jednego z polaryzatorów i 0,930 dla drugiego z nich, a te które w idealnym przypadku powinny być zerowe wynosiły dla obu polaryzatorów 0,007. Po uwzględnieniu niedoskonałości aparatury, wyliczona teoretyczna wartość funkcji korelacji  $S$  wyniosła 2,70 z niepewnością standardową 0,05, a wartość uzyskana eksperymentalnie była równa 2,697 z niepewnością standardową 0,015.

Jak widzimy wyniki eksperymentów Aspecta nie tylko naruszają nierówność Bella-CHSH, ale z bardzo dużą dokładnością zgadzają się z przewidywaniami mechaniki kwantowej!

W artykule Aspecta i współpracowników znajdziemy również wykres wartości oczekiwanej iloczynu zmiennych  $A$  i  $B$  polaryzacji fotonów w funkcji względnego kąta między polarymetrami (patrz rysunek 5). Jest to wykres analogiczny do wykresu na rysunku 2, tylko bez wykresu wynikającego z teorii zmiennych ukrytych. Podkreślimy



Oddział Gdański Polskiego Towarzystwa Fizycznego,  
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej  
Politechniki Gdańskiej

Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego  
serdecznie zapraszają do Gdańska na

### **48 Zjazd Fizyków Polskich,**

który odbędzie się w dniach 1-7.09.2023.

Aktualne i szczegółowe informacje na temat 48 ZFP znajdują się na stronie: <http://ftims.pg.edu.pl/48zfp>

Zjazd objęty jest honorowym patronatem Prezydenta Miasta Gdańska, Wojewody Województwa Pomorskiego, Związku Uczelni w Gdańsku im. Daniela Fahrenheita (FarU), Rektora Politechniki Gdańskiej, Rektora Uniwersytetu Gdańskiego i Pomorskiego Kuratora Oświaty oraz stację telewizyjną Telewizji Polskiej TVP Nauka.

W czasie Zjazdu odbędzie się osiem dwugodzinnych sesji plenarnych, dziewięć dwugodzinnych sesji równoległych, wykład otwarty, sesja plakatowa, zebranie delegatów PTF, panel dyskusyjny *Kondycja nauczania fizyki w polskich szkołach - szanse i ryzyko*, pokazy z fizyki oraz bazar dobrych praktyk dla nauczycieli fizyki, wykłady i pokazy doświadczeń z fizyki dla młodzieży szkolnej. Sesje plenarne, a także różne aktywności towarzyszące Zjazdowi odbywać się będą na terenie kampusu Politechniki Gdańskiej, za wyjątkiem wykładu otwartego, który odbędzie się na Uniwersytecie Gdańskim.

Zjazd Fizyków Polskich jest najstarszą cykliczną konferencją, integrującą środowisko fizyków polskich. Pierwszy taki zjazd odbył się 100 lat temu, w kwietniu 1923 roku w Warszawie. Celem ZFP jest promocja fizyki, z podkreśleniem dotychczasowych osiągnięć naukowych i dydaktycznych w tej dziedzinie. Wydarzenie jest skierowane do szeroko rozumianego środowiska fizyków. W Zjeździe przewidujemy udział około 500 uczestników w tym naukowców zarówno o ugruntowanej pozycji w środowisku, jak i młodych fizyków, a także nauczycieli fizyki oraz ich uczniów. W ramach działań promocyjnych przewidujemy różnego rodzaju wystawy, instalacje popularyzujące fizykę i konkursy dla młodzieży szkolnej. Ważnym wydarzeniem towarzyszącym Zjazdowi będzie doroczny Rejs Fizyków (<https://www.ptf.net.pl/rejsy/rejs-fizykow>) kończący się w Gdańsku w dniu rozpoczęcia Zjazdu.

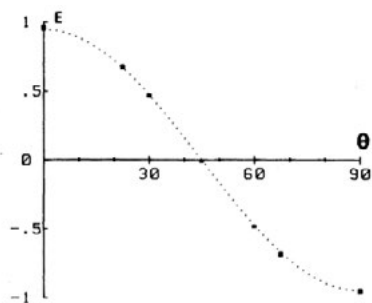


FIG. 3. Correlation of polarizations as a function of the relative angle of the polarimeters. The indicated errors are  $\pm 2$  standard deviations. The dotted curve is not a fit to the data, but quantum mechanical predictions for the actual experiment. For ideal polarizers, the curve would reach the values  $\pm 1$ .

Rysunek 5. Wykres z artykułu Alaina Aspecta i współpracowników [7]. Wykres przedstawia wartość oczekiwaną iloczynu zmiennych A i B określających polaryzację fotonów w funkcji względnego kąta między polarymetrami. Czarne punkty są punktami pomiarowymi, zaś linia kropkowana, podkreślmy za autorami, nie jest linią dopasowaną do punktów pomiarowych lecz linią jaką przewiduje mechanika kwantowa po uwzględnieniu własności użytych polarymetrów (m.in. współczynników transmisji i odbicia polaryzatorów).

za autorami, że linia kropkowana na wykresie nie jest linią dopasowaną do punktów pomiarowych (czarne kropki), lecz linią przedstawiającą przewidywania mechaniki kwantowej z uwzględnieniem własności użytych polarymetrów (m.in. współczynników transmisji i odbicia dla obu typów polaryzacji).

W eksperymencie Aspecta odległość między polaryzatorami wynosiła 12 metrów. Rekord udało się poprawić w 1998 roku przez szwajcarski zespół Nicolsa Gisina, który uzyskał stan splątania fotonów oddalonych od siebie o 30 kilometrów. Do przesłania fotonów użyto światłowodu sieci telekomunikacyjnej. W przypadku doświadczenia Aspecta szybkość ewentualnego przesłania informacji o swojej polaryzacji między fotonami musiałaby być dwukrotnie większa od szybkości światła w próżni. W doświadczeniu Gisina szybkość ta musiałaby wynosić 10 milionów c!

W 2007 roku austriacki zespół Antona Zeilingera uzyskał jeszcze lepszy wynik. Badał on stan splątania fotonów znajdujących się w odległości 144 km od siebie, na dwóch wyspach archipelagu kanaryjskiego – La Palma i Teneryfa. Ale na tym nie koniec. W roku 2017 chiński zespół fizyków (Juan Yin i współpracownicy) zarejestrował splątanie fotonów tworzonych w stacji kosmicznej krążącej na wysokości 500 km od powierzchni Ziemi. Jeden foton z każdej pary wysyłany był do miasta Delingha w zachodniej części Chin, a drugi do miasta Lijiang. Odległość między tymi miastami wynosi 1200 km! Z powodu oddziaływania fotonów z cząsteczkami atmosfery tylko jedna para na 6 milionów jakie wysyłane były przez urządzenie na satelicie docierała do detektorów w nienaruszonym stanie.

W 2015 roku Aspect opublikował w czasopiśmie Physics artykuł pod tytułem „Closing the Door on Einstein and Bohr’s Quantum Debate” („Zakończenie kwantowego sporu Einsteina z Bohrem”). W tym samym roku w New York Times’ie ukazał się artykuł pod tytułem „Sorry, Einstein. Quantum Study Suggests ‘Spooky Action’ Is Real” („Przepraszam, Einsteinie. Badania kwantowe sugerują, że ‘upiorne działanie na odległość’ jest prawdziwe”).

Eksperymenty ze splątanymi fotonami świadczą o tym, że to Bohr miał rację w sporze z Einsteinem. Cząstki nie mają z góry określonych stanów, jak sądził Einstein, a mimo to w niewiadomy i skoordynowany sposób decydują o swoim stanie nawet jeśli dzieli je ogromna odległość. Nikt nie wie jak to się dzieje. Ale nawet jeśli cząstki mają swoje sposoby, aby wymieniać informacje o swoich stanach w sposób natychmiastowy, to nie łamie to szczególnej teorii względności, gdyż nie da się tego wykorzystać do przesyłania innych informacji czy energii. Zauważmy, że w obu detektorach odbieramy losowe ciągi sygnałów. To, że między nimi występują odpowiednie korelacje możemy stwierdzić dopiero wtedy, gdy zbierzemy w jednym miejscu oba ciągi i informacje o poszczególnych kierunkach pomiarów, a następnie porównamy je ze sobą. Jednak taka operacja wymaga korzystania z tradycyjnych kanałów komunikacji, w których przesyłanie danych odbywa się z prędkościami zgodnymi ze szczególną teorią względności.

Nie oznacza to jednak, że badanie stanów splątanych jest sztuką dla sztuki i jedyną ich wartością jest wykazanie, że Einstein się mylił. W rzeczywistości stany splątane znajdują coraz więcej zastosowań, z których wiele jest już używanych komercyjnie. Tym zajmę się w następnych częściach artykułu.

dr Jan Kurzyk

Katedra Fizyki Politechniki Krakowskiej

#### LITERATURA

- [1] J.Kurzyk, *Za co Nobel. Część 1. Interpretacja kopenhaska, paradoks EPR, stany splątane*. Fizyka w Szkole nr 1, 2023.
- [2] A.Einstein, B.Podolski, N.Rosen, *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?*, Phys. Rev. 47, 1935.
- [3] J.S.Bell (1964). „On the Einstein Podolsky Rosen paradox”. Physics 1 (3): 195–200. doi:10.1103/PhysicsPhysiqueFizika.1.195. wersja elektroniczna [https://cds.cern.ch/record/111654/files/vol1p195-200\\_001.pdf](https://cds.cern.ch/record/111654/files/vol1p195-200_001.pdf) [Dostęp 24.11.2022].
- [4] Tim James, *Fundamentalne. Prószyński i Słodka* 2020.
- [5] J. F. Clauser, M. A. Horne, A. Shimony, and R. A. Holt, *Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories*. Phys. Rev. Lett. vol. 23, no. 15, (1969).
- [6] S.J.Freedman, J.F.Clauser. *Experimental Test of Local-Hidden Variables Theories*. Phys. Rev. Lett. v. 28, no.14 (1972)
- [7] A.Aspect, P.Grangier, G.Roger. *Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell’s Inequalities*. Phys. Rev. Lett. American Physical Society (APS), vol. 49, no. 2 (1982).
- [8] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo\\_Malusa](https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Malusa). [Dostęp 28.11.2022].

#### Errata

W poprzednim odcinku popełniłem błąd w odnośniku 1 na stronie 16.

Zamiast:

<sup>1</sup> Funkcja falowa może być funkcją zespoloną. Jej moduł liczymy mnożąc funkcję przez jej sprzężenie zespolone. Moduł funkcji zespolonej jest liczbą rzeczywistą, której znak może być zarówno dodatni, jak i ujemny.

Powinno być:

<sup>1</sup> Funkcja falowa może być funkcją zespoloną. Jej moduł liczymy mnożąc funkcję przez jej sprzężenie zespolone. Moduł liczby zespolonej jest liczbą rzeczywistą nieujemną.



# Promieniowanie kosmiczne a życie na Ziemi

Artykuł ten jest czwartym tekstem z serii poświęconej projektowi „Kosmos widziany z łodzi”, który jest realizacją szerokiej akcji udostępniania młodzieży nowoczesnej aparatury naukowej mającej w końcowym efekcie pokazać, a może i nauczyć młodych, ciekawych świata ludzi metod, jakimi posługuje się współczesna nauka w poszukiwaniu praw rządzących Wszechświatem. Dostarczane szkołom zestawy do monitorowania promieniowania kosmicznego stają się istotnym rozwinięciem projektu CREDO (Cosmic Ray Extremely Distributed Observatory) i wszyscy, którzy przyłączą się do nas, staną się uczestnikami niezwyklej podróży w nieznane zakamarki Kosmosu.<sup>1</sup>

Tadeusz Wibig

Doskonale wiemy, że promieniowanie kosmiczne dochodzi do nas i w dzień, i w nocy, i latem, i zimą. Cały czas bombardują nas wysokoenergetyczne cząstki z kosmosu i odkąd udaje nam się je mierzyć, jest go zasadniczo tyle samo. Zasadniczo, ale nie do końca. Jego strumień (czyli liczba cząstek przechodząca z określonego kąta bryłowego, przez jednostkę powierzchni w jednostce czasu) jest od lat monitorowany przez różne aparatury ustawione w różnych punktach globu i stwierdzono, że waha się on. Raz jest większy, raz mniejszy. Badania tych zmian wciąż trwają i choć z grubsza je rozumiemy, to nie możemy powiedzieć, że wiemy o nich wszystko.

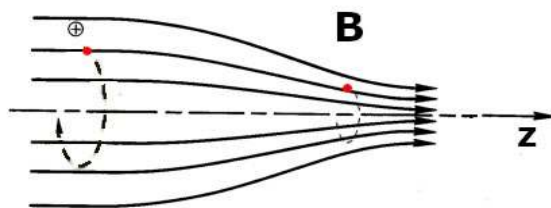
Cząstki promieniowania kosmicznego są zasadniczo naładowane (nie będziemy mówić o neutrinach, bo to osobna bajka na inną okazję) i jako takie poruszając się w polach magnetycznych Układu Słonecznego zakrzywiają swe tory i poruszają się ogólnie w bardzo skomplikowany sposób.

Cząstka w polu magnetycznym doznaje działania siły Lorentza  $\vec{F} = q(\vec{v} \times \vec{B})$ . To wszyscy wiedzą i właściwie na tym kończy się nasza wiedza w tym temacie – i słusznie. Zgodnie z drugą zasadą dynamiki Newtona siła ta powo-

duje powstanie przyspieszenia  $\vec{a} = \vec{F} / m$  i to wszystko. Najprostszy przypadek pola magnetycznego to pole jednakowe w każdym punkcie i niezmiennie w czasie. Znałe jest ze szkoły i nazywane jest polem jednorodnym (i stałym w czasie).

Analiza ruchu cząstki w tym polu prowadzi ilościowo do prostego wzoru na promień Larmora  $r_L = (v, m) / (qB)$  i obrazka ruchu po spirali, a ściślej rzecz biorąc po helisie, i wydawać by się mogło, że wiemy wszystko, ale diabeł, jak zwykle, tkwi w szczegółach, o których w szkole nawet się nie wspomina – bo są za trudne!

Zadajmy jednak to pytanie, co dzieje się, gdy pole magnetyczne nie jest wszędzie takie samo? Nie jest to specjalnie rzadkie zjawisko, a wprost przeciwnie, to pola jednorodne są w przyrodzie wyjątkiem. Na przykład w pobliżu „biegunów” magnesu mamy do czynienia z polem, które



<sup>1</sup> Ponieważ mamy nadzieję, że na tym się nie skończy, prosimy i zachęcamy zaciekawione, a może nawet i zainteresowane osoby, nauczycieli o kontakt z nami. Im więcej nas będzie, tym łatwiej będzie zrobić następny krok i podjąć kolejne wyzwania

jest bardzo niejednorodne. Znający się na rzeczy mówią, że mamy tam duży gradient pola. Przyjmijmy, że pole staje się silniejsze w kierunku  $z$ , jak na obrazku na poprzedniej stronie pokazującym linie sił.

Załóżmy, że mamy cząstkę, która po helisie porusza się powoli (to ważne!) od lewej ku prawej w kierunku osi  $z$  kręcąc kółka w płaszczyźnie  $xy$ . Kierunek kręcenia opisuje oczywiście reguła śruby prawoskrętnej albo dla wtajemniczonych, kierunek iloczynu wektorowego we wzorze Lorentza. Patrząc na ten obraz z innego punktu widzenia, można by zauważyć, że mamy jakby prąd płynący w okrągłym przewodzie, który powoli się przemieszcza. Prąd płynący przez okrągłą ramkę jest z magnetycznego punktu widzenia opisywany, jako moment magnetyczny (ramki z prądem)  $\mu = IA$ . Jest to oczywiście wektor, a jego kierunek i zwrot określa znowu reguła śruby, albo, co na jedno wychodzi, odpowiedni iloczyn wektorowy.

No i mamy moment magnetyczny w polu magnetycznym, które nie jest stałe. Moment magnetyczny, to jakby taki abstrakcyjny malutki magnesik i jako taki oczywiście oddziałuje z polem. Po pierwsze pole magnetyczne stara się go obrócić. Szczęśliwie w sytuacji naszej naładowanej cząstki jest on już obrócony w kierunku pola (tak działają wszystkie śruby prawoskrętne, których używaliśmy wyżej) i dalsze obracanie nie jest możliwe, moment jest w stanie równowagi stabilnej. I dopóki pole magnetyczne nie zmienia się, nic ciekawego się nie dzieje, ale gdy cząstka w swoim ruchu po helisie wpadnie w obszar, gdzie pole zacznie rosnąć zaczął się dziać naprawdę ciekawe rzeczy.

Cząstka oglądana, jako zamknięta pętla z prądem obejmuje sobą pewien strumień pola magnetycznego i jeśli pole to zacznie się zwiększać, strumień ten rósł będzie także. Zgodnie z regułą Lenza pojawić się muszą siły przeciwdziałające „wkręcaniu się” cząstki w obszar rosnącego pola. Siły te zależą oczywiście od „szybkości” zmian pola w kierunku  $z$ , czyli tego, co nazywa się gradientem pola  $B$  pomnożonego skalarnie przez w miarę stały moment magnetyczny  $\mu$ :  $\vec{F} = -\nabla(\vec{\mu} \cdot \vec{B})$ .

Oczywiście w silniejszym polu mniejszy jest promień Larmora, po jakim kręci się cząstka. Można pokazać, acz jest to trochę skomplikowane, że jeśli tylko zmiany pola są powolne, moment magnetyczny kręcącej się w polu  $B$  cząstki w jej ruchu nie zmienia się pod wpływem oddziaływania z polami magnetycznymi niezależnie, czy są one stałe w przestrzeni i czasie. Wielkość ta jest tak zwanym pierwszym niezmiennikiem adiabatycznym (istnieją jeszcze drugi i trzeci, ale o tym zamilczmy).

Prąd, jeśli traktować tak dalej kręcącą się cząstkę, jest odwrotnie proporcjonalny do czasu obiegu jednego okrążenia  $I \sim v_r / (2\pi r_L)$  i jeśli moment magnetyczny  $\mu \sim v_r / (2\pi r_L) (\pi r_L^2)$  ma być stały, to  $v_r \sim 1/r_L$ , czyli prędkość radialna cząstki musi maleć.

Ale rzeczy naprawdę ciekawe zaczynają się dopiero teraz.

Z tego, co powiedzieliśmy wyżej wynika, że cząstka wpadając w zwiększające się ciągle wzdłuż osi  $z$  pole magnetyczne musi zacząć kręcić się ( $v_r$ ) coraz szybciej i szybciej. Z drugiej strony wiemy przecież, że siła oddziaływania pola magnetycznego na cząstkę jest zawsze prostopadła do prędkości (wzór Lorentza!) i zatem nie

może wykonywać jakiegokolwiek pracy, a więc całkowita energia kinetyczna cząstki w stałym polu nie może ulec zmianie. Jeśli tak, a ustaliliśmy, że prędkość w ruchu po okręgu Larmora rośnie, to prędkość jej ruchu wzdłuż osi

$z$  (aby  $\frac{mv^2}{2} = \frac{mv_z^2}{2} + \frac{mv_r^2}{2}$  było stałe) musi maleć.

Alte to jeszcze nie koniec! Najciekawsze będzie dopiero teraz.

I tak, jeśli tylko pole wzrastać będzie dostatecznie i długo, to w końcu cząstka przestanie się wzdłuż osi  $z$  poruszać w ogóle. I co wtedy? Pętla ze swoim momentem magnetycznym (który ciągle pozostaje taki sam!) będzie dalej oddziaływać z gradientem pola i zacznie być wypychana z obszaru silniejszego pola. Cały ruch z lewa na prawo powtórzy się, ale tym razem w przeciwnym już kierunku. Promień Larmora cząstki wypychanej z silniejszego pola będzie wzrastał, a prędkość rotacji będzie stopniowo maleć. Efekt ten nazywa się zwierciadłem magnetycznym i jest bardzo ważny. Korzystając z niego buduje się pułapki magnetyczne na cząstki plazmy w rozmaitych urządzeniach, które mają produkować w przyszłych elektrowniach energię w procesach termojądrowych. Jest on też przyczyną istnienia pasów van Allena, obszarów uwięzienia cząstek promieniowania kosmicznego rozciągających się od tysiąca do kilkudziesięciu tysięcy kilometrów nad naszą planetą. Skąd one się biorą i czym są, to znowu temat na osobną historię.

Jak widać ruch cząstek naładowanych w polach magnetycznych zmieniających się od punktu do punktu jest dość skomplikowany. Dodajmy jeszcze do tego, że cząstki promieniowania kosmicznego zazwyczaj poruszają się z prędkościami bliskimi prędkości światła i do ich opisu trzeba używać szczególnej teorii względności. Nie należy też zapominać, że w ogólności pola magnetyczne w przestrzeni kosmicznej zmieniają się też w czasie czyniąc los naładowanych cząstek w przestrzeni kosmicznej jeszcze ciekawszym.

## Pole magnetyczne Ziemi i Słońca

Wokół Ziemi pole magnetyczne jest zasadniczo złożeniem tego, co produkuje sam nasz glob i tego, co pochodzi od Słońca.

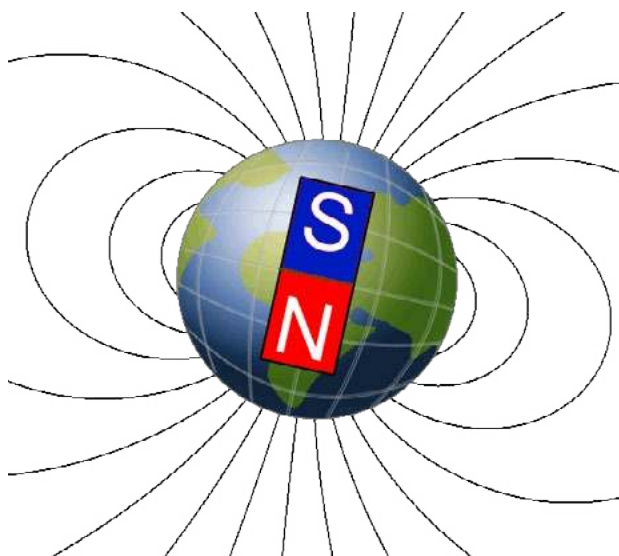


Foto – Dreamstime



Pole magnetyczne Ziemi znane było już starożytnym Chińczykom. Jest słabe, ale silne jednak na tyle, aby ustawić igłę kompasu w odpowiednim kierunku. Kierunek ten z grubsza odpowiada geograficznej północy. Bliższe studia pokazały, że pole to pasuje do obrazka, jaki otrzymalibyśmy umieszczając w środku Ziemi zwykły solidny stały magnes.

Oczywiście w środku Ziemi nie ma magnezu. Nie wnioskując w szczególności możemy powiedzieć, że pole magnetyczne Ziemi na jej powierzchni ma wartość mierzoną w dziesiątkach  $\mu\text{T}$  (mikro-tesli) i oczywiście maleje z wysokością. W polu tym naładowane cząstki doznają działania siły Lorentza. Gdyby wziąć sobie typowy powolny (nierelatywistyczny) proton o energii  $100 \text{ MeV}$  ( $10^8 \text{ eV}$ ) poruszający się w polu o wartości  $1 \mu\text{T}$  to jego tor miałby promień krzywizny rzędu  $1000 \text{ km}$ . Z tego, co wiemy o ruchu cząstek w polu magnetycznym poruszają się one zasadniczo kręcąc się wzdłuż linii sił pola. Jest jakaś szansa, aby cząstka taka trafiając do Ziemi z daleka dotarła do jej powierzchni. Mogłoby to mieć miejsce gdzieś w pobliżu biegunów, bo tam skupiają się linie sił, jak to widać na rysunku. I tam też zdarza się, że takie niskoenergetyczne cząstki zdarzając się z atomami atmosfery powodują ich świecenie. Zjawisko takie nazywa się zorzą polarną.

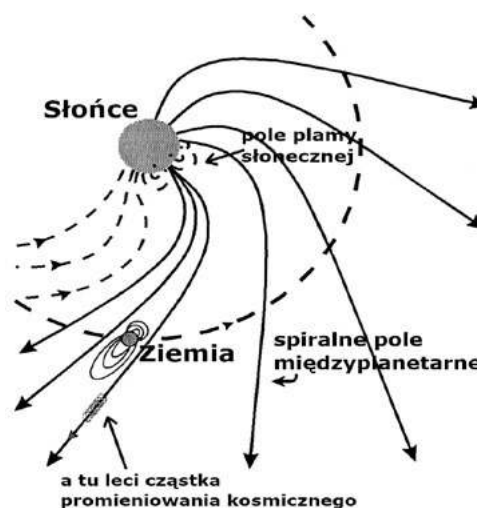
Cząstki o energiach przewyższających  $1 \text{ GeV}$  ( $10^9 \text{ eV}$ ) mają promień Larmora porównywalny z promieniem orbity Księżyca, więc ziemskie pole magnetyczne niewiele im przeszkadza, wbijają się w atmosferę, która stanowi kolejną tarczę chroniącą nas przed ich bezpośrednim uderzeniem. Ale zanim o tym, zajmijmy się na chwilę Słońcem.

Słońce, poza tym, że jest źródłem światła (i ciepła) na Ziemi, jest też źródłem promieniowania jonizującego. Na szczęście promieniowanie to ma zasadniczo małe energie i zatrzymywane jest, jak już powiedzieliśmy, przez ziemskie pole magnetyczne. Słońce wytwarza też pole magne-

tyczne i pole to chroni nas (częściowo) przed promieniowaniem przychodzącym do nas z otchłani kosmosu.

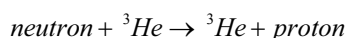
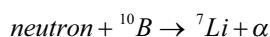
W pobliżu Ziemi pole magnetyczne Słońca jest rzędu kilku  $\text{nT}$  (nano-tesli). Ma ono bardzo skomplikowaną strukturę. Na skutek wmrózenia w plazmę międzyplanetarną emitowaną ze Słońca w postaci wiatru słonecznego obraca się ono im dalej, tym oczywiście wolniej tworząc złożoną strukturę, której przekrój płaszczyzna ekliptyki pokazuje rysunek na którym pokazana jest też Ziemia ze swoim niekształconym przez Słońce polem magnetycznym.

Pole Słońca, mimo iż słabe, ma bardzo duży, dominujący nawet wkład w ochronę nas przed galaktycznym promieniowaniem kosmicznym, a to przede wszystkim dlatego, że rozciąga się ono na wielkie odległości i dodatkowo jest unoszone wraz z wiatrem słonecznym i praktycznie wydmuchuje niskoenergetyczne cząstki przychodzące z przestrzeni międzygwiazdowej. Stanowi ono barierę dla cząstek o energiach do kilku  $\text{GeV}$ .

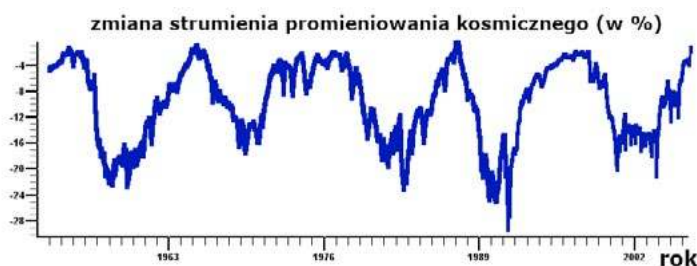


Słońce, jak wiemy nie jest idealną i niezmienną kulą zawieszoną na niebie. Już starożytni Chińczycy kilkaset lat przed naszą erą zauważyli na Słońcu plamy. Zważył je też uczeń Arystotelesa Teofrast, a od połowy XVIII wieku wiemy, że istnieje 11-letni cykl aktywności słonecznej i przejawia się on nie tylko zmianami liczby widocznych plam, ale, co wiemy od niedawna, okresowymi zmianami wielu innych parametrów opisujących Słońce i jego magnetosferę. Zmiany natężenia pola magnetycznego, prędkości i intensywności strumienia wiatru słonecznego powodują oczywiście, że ochrona przed promieniowaniem galaktycznym też wskazuje na 11-letnie wahania i z niezłą regularnością promieniowania kosmicznego dochodzi do powierzchni Ziemi raz więcej, raz mniej. W różnych miejscach na Ziemi znajdują się stacje pomiarowe rejestrujące te zmiany. Są one wyposażone głównie w liczniki neutronów, tak zwane monitory neutronowe.

Neutrony oczywiście powstają w wyniku reakcji cząstek promieniowania kosmicznego z jądrami atomów atmosfery. Są one elektrycznie neutralne i nie tracą energii zbyt szybko. Ich oddziaływania z jądrami atomów to najczęściej rozproszenia elastyczne. Neutrony mają dużą szansę dotrzeć z wysoko do powierzchni ziemi i jest ich całkiem sporo. Kłopot w tym, że trudno je zauważyć. Nie jonizują niczego, nie wzbudzają do świecenia cząsteczek materii, przez którą przechodzą. Urządzenie do pomiaru strumienia neutronów, monitor neutronowy, zbudował John Alexander Simpson w 1948 roku, po zakończeniu pracy w Projekcie Manhattan. Jak wspomnieliśmy neutrony głównie zderzają się z jądrami atomów elastycznie nie prowadząc do żadnych ciekawych efektów. Są jednak dwa wyjątki, dwa szczególne jądra:  $^{10}\text{B}$  i  $^3\text{He}$ . Charakteryzują się one tym, że bardzo chętnie pochłaniają termiczne (powolne) neutrony, no a potem rzecz jasna rozpadają się i w tych rozpadach pojawiają się produkty już elektrycznie naładowane, które można względnie łatwo zobaczyć i zmierzyć ich energię.



Oczywiście sprawa w szczegółach jest trochę bardziej skomplikowana, ale najważniejsze, że monitory neutronowe wymyślono i co więcej rozstawiono w różnych miejscach na świecie. Połączono je w globalną sieć i dziś można oglądać on-line wyniki na stronie [https://www.nmdb.eu/cr\\_now/](https://www.nmdb.eu/cr_now/). Mamy dane z najstarszego pracującego do roku 2007 monitora w kopalni Climax w US. Jak widać na rysunku promieniowanie kosmiczne zmienia się w z grubszą jedenastoletnim cyklu, ale zmiany te choć spore, to są jednak w miarę stabilne.

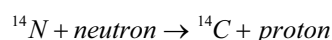


## Czy wiemy coś o tym, jak strumień promieniowania kosmicznego zmieniał się wcześniej?

Oczywiście, że wiemy!

Mimo iż nikt nie dokonywał wcześniej żadnych pomiarów, mamy jednak dane, które pozwalają nam wyciągać w tym względzie jakieś, całkiem uzasadnione wnioski. Dane te zawarte są w drzewach.

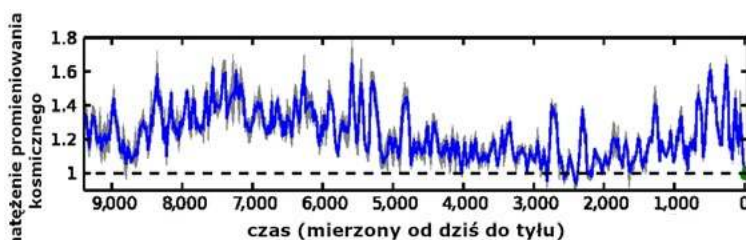
Wszyscy widzieli przekrój pnia ściętego drzewa i wszyscy widzieli w nim słoje. Wiadomo, że co roku przybywa drzewu jeden, a więc jeśli zatniemy stare drzewo, możemy policzyć, który słoje pojawił się, w którym roku. Z naszego punktu widzenia istotnym jest pytanie, czy, gdybyśmy tak wydłubali z drzewa próbkę jego miąższu, który pojawił się w nim w jakimś konkretnym roku, to czy potrafiliśmy określić, ile wtedy promieniowania kosmicznego docierało do Ziemi? Na pierwszy rzut oka odpowiedź jest negatywna. Przecież promieniowanie kosmiczne nie zatrzymało się w materii rosnącego drzewa, no, bo niby jak? Ale już na drugi rzut oka, zwłaszcza, gdy jest to oko fizyka i to fizyka znającego się na promieniowaniu kosmicznym, fizyce jądrowej i trochę na biologii, sprawa nie jest tak oczywista. Taki właśnie fachowcem był Willard Libby, kolejny uczestnik Projektu Manhattan. Zauważył on, że węgiel ma nietrwały izotop  $^{14}\text{C}$  [1]. Ma on czas połowicznego zaniku prawie 6000 lat. Jest obecny w przyrodzie, wchodzi w skład atmosfery ziemskiej tak samo jak zwykły węgiel  $^{12}\text{C}$ . Jeden atom węgla  $^{14}\text{C}$  przypada na  $10^{12}$  atomów  $^{12}\text{C}$ , a więc musi on ciągle gdzieś powstawać. Gdzie? Generalnie wszędzie. Najczęściej na wysokości ponad 10 km na dużych szerokościach geomagnetycznych, gdzie promieniowania kosmicznego jest najwięcej w reakcji



Powstały  $^{14}\text{C}$  dalej rozprzestrzenił się po całej Ziemi, ma na to tysiące lat, ale jego ilość jest jakoś tam proporcjonalna do średniego strumienia promieniowania kosmicznego produkującego neutrony.

Węgiel z atmosfery jest absorbowany przez rośliny, w tym także drzewa i odkłada się w materii organicznej, czyli w słojach drzew. Ot i wszystko. Wystarczy teraz zmierzyć jaka jest proporcja  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  w konkretnym słoju, uwzględnić poprawkę na to, ile zdążyło się go już rozpaść i wiemy, ile promieniowania kosmicznego wtedy do Ziemi dochodziło.

Odkrycie Libby'ego zwykle stosowane jest w odwrotnym kierunku. Zakładamy coś o promieniowaniu kosmicznym i wyznaczamy z tego wiek różnych starożytnych znalezisk drewnianych. Umożliwienie dość dokładnego datowania artefaktów archeologicznych miało niewątpli-



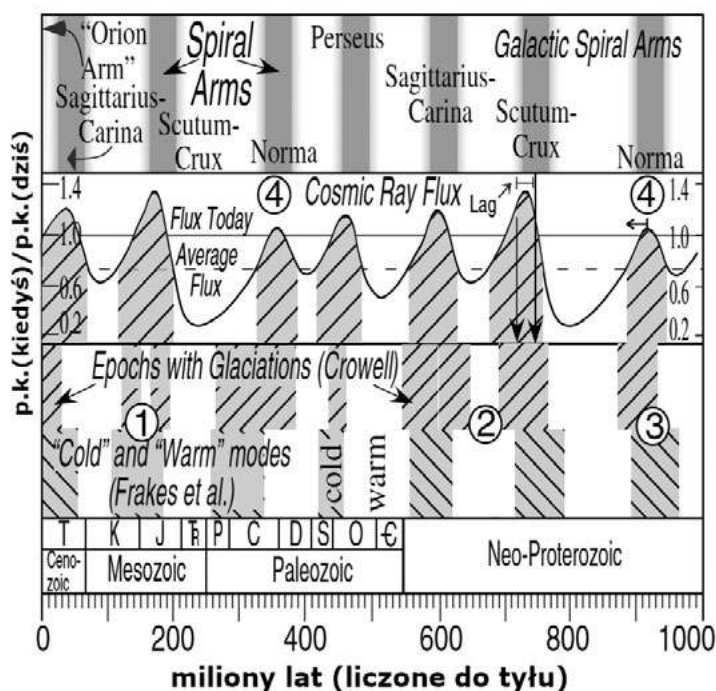
wie wielkie znaczenie dla ludzkości i nie dziwnego, że Libby w 1960 roku otrzymał nagrodę Nobla.

A co dowiedzieliśmy się dzięki Libby'emu o promieniowaniu kosmicznym?

Dość precyzyjnie jesteśmy w stanie powiedzieć, że wprawdzie zmieniało się on i można poszukać rozmaitych prawidłowości, to, gdyby tak je uśrednić, to trzymało się ono przez ostatnie 10000 lat na z grubsza stałym poziomie.

$^{14}\text{C}$  nie jest jedynym kosmogenicznym (powstałym w oddziaływaniach z promieniowaniem kosmicznym) jądrem atomowym, które możemy zaprząć do poszukiwania odpowiedzi na pytanie o stałość strumienia promieniowania kosmicznego w przeszłości. Znalaziono ich kilka. Jednym z nich jest beryl  $^{10}\text{Be}$ . Powstaje na górze atmosfery, podobnie jak  $^{14}\text{C}$ , w reakcjach promieniowania kosmicznego z azotem, ale potem splukiwany jest z deszczem i osiada na powierzchni ziemi. Tu ma wiele możliwości przetrwania zanim się rozpadnie. Może znaleźć się na Grenlandii, czy na Antarktydzie i tam zostać uwięziony w lodzie tworząc warstwy podobne do słoń w drzewach. Glacjolodzy potrafią wydobyć lód z dużych głębokości, określić jego wiek i zmierzyć, ile  $^{10}\text{Be}$  w nim pozostało. Badania rdzeni lodowych pozwoliły przesunąć wstecz naszą wiedzę o historii promieniowania kosmicznego do około 30000. I tyle właściwie wiemy na pewno.

Co działo się wcześniej, to już raczej pole do spekulacji, acz niezupełnie pozbawionych naukowych podstaw. Wiemy, że Ziemia i cały Układ Słoneczny nie stoi w miejscu, a porusza się wokół jądra naszej Galaktyki. Galaktyka jest z rodzaju galaktyk spiralnych i posiada wyraźnie zaznaczające się skupiska gwiazd i innej materii tworzące ramiona. Rysunek pokazuje jakby wyglądała Galaktyka widziana z góry i po jakim torze krąży Słońce. Jedno okrążenie zajmuje mu 200-250 milionów lat. Obracający się w obracającej się Galaktyce Układ Słoneczny co jakiś czas przecina obszary ramion i możemy wtedy spodziewać się zmiany intensywności galaktycznego promieniowania kosmicznego, jakie do nas mogłoby do-



trzeć. Przeprowadzono odpowiednie rachunki [2], które to oczywiście potwierdziły, a co więcej pokazały dziwną zbieżność okresów potencjalnie wyższego strumienia promieniowania z okresami, w których, jak nam się wydaje, temperatura na Ziemi była niższa niż przeciętna.

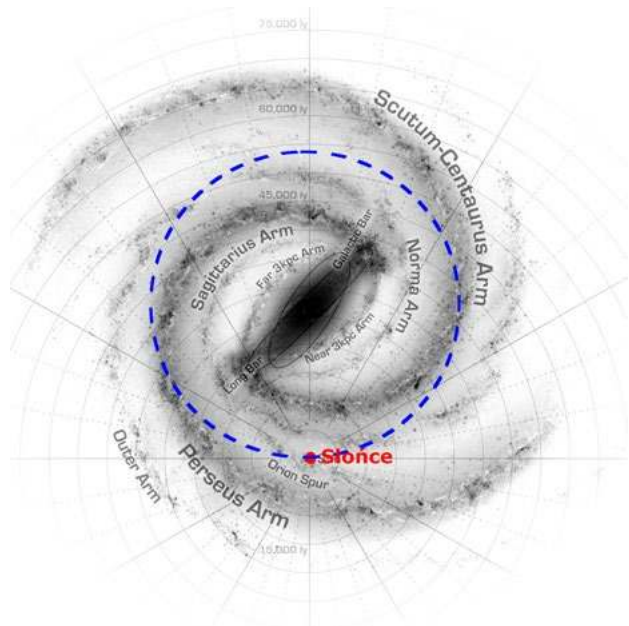
Klimatem zajmiemy się za chwilę, a teraz zauważmy, że nawet tak dramatyczne przejścia, jak przekraczanie ramion spiralnych nie spowodowało zmian strumienia promieniowania większego niż 50%. Rysunek powyżej pokazuje, że ze sporą dozą pewności możemy powiedzieć, że promieniowanie kosmiczne, średnio rzecz biorąc nie zmieniało się przez ostatni miliard lat. Idąc dalej, ustalmy, że, czy to nam się podoba, czy nie, żyjemy od zawsze w oceanie cząstek elementarnych o energiach całkiem sporych.

Energie te są na tyle duże, że mogą jonizować atomy, mogą rozbić wiązania chemiczne i nie sposób pominąć milczeniem kwestii, czy aby mogą one być dla nas niebezpieczne.

## Kwestia klimatu

Zacznijmy od wspomnianych już kwestii klimatycznych. Ostatnio temperatura na Ziemi (czyli w końcu klimat) stał się jednym z głównych tematów troski nie tylko poszczególnych ludzi, ale i całych środowisk społecznych, państw, ogólnie chyba całej ludzkości. Klimat, jak nam się wydaje zależy od bardzo wielu rzeczy. Czy zależy również od ilości przychodzącego do Ziemi promieniowania kosmicznego? Opinie są oczywiście, jak to zwykle bywa w sprawach klimatycznych, różne. Jeśli ktoś postuluje istnienie takiej zależności, to, o ile chce być traktowany serio, powinien zaproponować mechanizm takiego wpływu, mechanizm fizyczny. No i zaproponowano. Kilka.

Po pierwsze zauważono, że wzrost jonizacji w górnych warstwach atmosfery powoduje, bo musi, wzrost prądu, jaki płynie z góry na dół, do Ziemi, rozładowując



gigantyczny, globalny kondensator [3,4]. Gwałtowne zmiany jonizacji spowodowane wybuchami na Słońcu i generalnie związane z jego cyklem aktywności znalazły odbicie w zmianach temperatury, ciśnienia lub dynamiki atmosfery jak np. rozwój cyklonów na Atlantyku [5], czy dramatyczne zmiany kierunków wiatru na stacjach antarktycznych położonych na zachodnim Pacyfiku i w pobliżu bieguna południowego, na stacji Vostok [6] i pojawianiem się na wysokości 5-10 km warstwy chmur, którą tłumaczy się efektami „elektro-zamrażania” i „elektro-odkurzania” atmosfery, które zaburzają naturalną równowagę i zawartość jąder kondensacji niezbędnych do formowania się chmur [7, 8].

Ale chmury, to nie wszystko. Dużo groźniejsze od klimatu, a na pewno bardziej bezpośrednie są pioruny, czyli inaczej wyładowania atmosferyczne.

Postawiono hipotezę, że w inicjowaniu wyładowań atmosferycznych istotną rolę odgrywają wielkie pęki promieniowania kosmicznego [9-12]. Sama idea polega na tym, że pierwotny, wstępny piorun zwany prekursorem jest inicjowany przez ładunki generowane przy przejściu przez atmosferę kaskady cząstek wielkiego pędu.

Z drugiej strony błyskawice odegrały, być może, znaczącą i bardzo pozytywną rolę w ewolucji życia na Ziemi.

W przełomowej pracy Miller w bardzo prostym eksperymencie (rysunek obok) pokazał [13], że wyładowania elektryczne w „prebiotycznej zupie” złożonej z wody, metanu, amoniaku i wodoru spowodowały powstanie dość złożonych cząsteczek takich jak aminokwasy, monomery, RNA itp., które, jak się powszechnie sądzi są niezbędne dla uformowania się jakiegoś elementarnego choćby życia, które mogłoby z czasem wyewoluować w formy wyższe, czasem myślące.

Ale na tym nie kończy się niekoniecznie pozytywny wpływ promieniowania kosmicznego na nasze życie.

Na dalszych etapach ewolucji, gdy pierwotne życie osiągnęło już stan bardziej zaawansowany (i w atmosferze

pojawiał się w dużych ilościach tlen, wyładowania w atmosferze przyczyniały się do produkcji tlenków azotu ( $NO$ ,  $NO_2$ ). Dziś to jedne z najniebezpieczniejszych składników smogu, a ich toksyczność jest wielokrotnie większa niż tlenku węgla czy dwutlenku siarki. Szczególnie groźny jest dwutlenek azotu ( $NO_2$ ), który najczęściej powstaje na skutek utleniania tlenku azotu ( $NO$ ) w atmosferze. Około 20%  $NO_x$  generowane jest przez błyskawice, a kiedyś wyładowań było pewnie więcej. Efekty wywoływane tlenkami azotu obejmują modyfikacje całej chemii atmosferycznej, ze szczególnym uwzględnieniem poziomu ozonu i wpływu na rodniki hydroksylowe ( $OH$ ) - zwiększając w rezultacie stężenie gazów cieplarnianych.

Istnieje bogata literatura dotycząca produkcji  $NO_x$  przez pioruny np. [14-15]. Szacuje się, że szybkość produkcji  $NO_x$  w wyładowaniach to jakieś  $10^{13}$  kg na rok, co należy porównać z całkowitą masą atmosferyczną wynoszącą  $5 \cdot 10^{18}$  kg i masą ozonu rzędu  $5 \cdot 10^{11}$  kg [16]. Chociaż tlenki azotu  $NO_x$  są bardzo szkodliwe dla nas, dla roślin są one korzystne, w reakcjach z  $NO_x$  powstają bowiem niezbędne im do życia azotany. Tak więc promieniowanie kosmiczne oddziałuje na organizmy różnie i sprawa nie jest prosta.

### Ale na koniec wróćmy do pozytywów

Jak wiadomo z najbardziej pierwotnych zaczątków życia (niezależnie, czy wyszliśmy z zupy Millera, czy powstał w jakiś inny sposób) najprymitywniejsze organizmy rozwijały się zgodnie z mechanizmami ewolucji. Nie wchodząc w szczegóły zgodzić się możemy, że kołem napędowym ewolucji są mutacje. Mutacje to niedoskonałości pojawiające się z rozmaitych przyczyn i replikujące się w procesie rozmnażania. Nie wchodząc w szczegóły możemy chyba stwierdzić, że tempo pojawiania się przypadkowych zmian w DNA naszych przodków w jakimś stopniu przekładało się na szybkość zmian organizmów i tym samym na osiągane przez nie sukcesy w życiu osobistym i gatunkowym. Oczywiście wielka ilość błędów w replikacji musi prowadzić do klęski, ale również zbyt mała liczba może nie wystarczyć, aby organizmy dostatecznie szybko przystosowały się do zmian w środowisku, które zachodzą niezależnie od wszystkiego.

Wspomnijmy jeszcze o najnowszym odkryciu związanym z promieniowaniem kosmicznym i jego związkiem z życiem na Ziemi. W roku 2020 ukazała się w *The Astrophysical Journal* praca Noemie Globus i Rogera D. Blandforda [17]. Autorzy pokazali w niej, jak miony promieniowania kosmicznego, które tak ładnie mierzymy w naszych eksperymentach Projektu CREDO-Maze bombardując naszą planetę od miliardów lat spowodowały, a może lepiej powiedzieć, mogły spowodować, że DNA komórek wszystkich stworzeń na Ziemi jest „lewoskrętne”.

Sam fakt, że związki biologiczne wyróżniają jeden, konkretny rodzaj skrętności zauważył już Pasteur, ten od pasteryzacji i szczepionki na wściekliznę [18].

Od prac Watsona i Cricka (Nobel 1962) wiemy, że nasze i nie tylko nasze DNA jest bardzo długą cząsteczką chemiczną skręconą precyzyjnie w podwójną helisę i DNA potraktowane jak śruba jest lewoskrętne. Dlaczego nie prawo-?

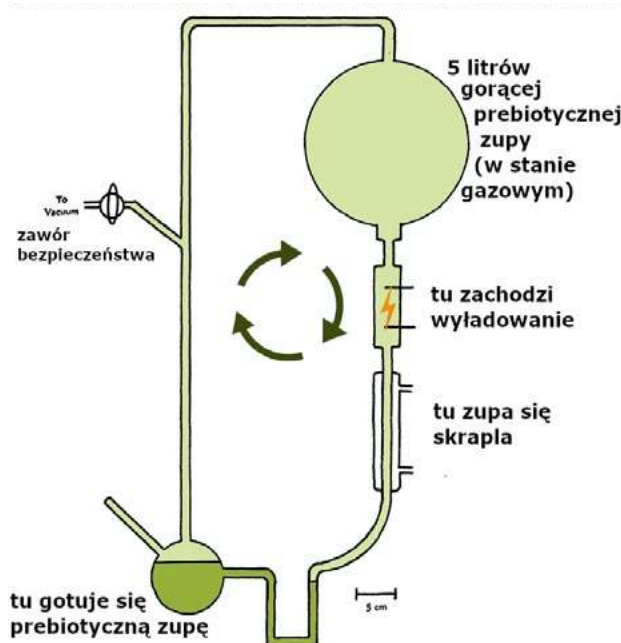




Foto – Adobe Stock



Zagadka ta jest pozostawała nierozwiązana przez lata.

Prawo- i lewoskrętność nie jest tylko cechą cząsteczek chemicznych i śrub. Występuje też, choć w nieco innym znaczeniu także w świecie cząstek elementarnych. Miony, poza tym, że mają masę, ładunek elektryczny obdarzone są czymś, co nazywa się spinem i jest w zasadzie niewytłumaczalne z klasycznego punktu widzenia. Mają też swój własny moment magnetyczny, tak, jakby były obciążającymi się naładowanymi kulkami (a nie są!).

Do niedawna wydawało się, że prawa fizyki i cały świat fizyczny odbity w lustrze jest taki sam jak ten po naszej stronie. W 1956 roku pani Wu zrobiła doświadczenie pokazujące, że tak jednak nie jest i rok później dostała za to nagrodę Nobla. Z tego samego prawa zwanego łamaniem parzystości w oddziaływaniach słabych wynika, że miony przylatujące do powierzchni ziemi są statystycznie rzecz biorąc bardziej lewo-, niż prawoskrętne. Nie wnikając w szczegóły, co to właściwie znaczy skrętność mionów, przyjmijmy za Globusem i Blandfordem, którzy, odwołując się do prac Piotra Curie [19], męża Marii, stwierdzili, że miony lewoskrętne inaczej oddziałują z cząstkami chemicznymi (DNA) o lewo- niż tymi o prawoskrętnej strukturze. Skutkiem tego jest inne tempo mutacji lewo- i prawoskrętnego DNA. Preferencja ta jest, choć niezwykle subtelna, wystarczyla prawdopodobnie, aby przez lata, miliony, miliardy lat na świecie pozostał już tylko jeden typ skręconej helisy DNA.

Jednym wnioskiem z tej teorii jest, że jakiegokolwiek inne życie w kosmosie, obcy, jakich kiedykolwiek spotkamy też będą lewoskrętni!

Projekt „Kosmos widziany z Łodzi” jest dofinansowany ze środków budżetu Państwa (SONP/SN/516075/2021).

Tadeusz Wibig

Katedra Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Łódzkiego

#### BIBLIOGRAFIA:

- [1] W. F. Libby „Atmospheric Helium Three and Radiocarbon from Cosmic Radiation”, *Phys. Rev.* **69**, 671 (1946) doi: 0.1103/PhysRev.69.671.2
- [2] N. J. Shaviv, „The spiral structure of the Milky Way, cosmic rays, and ice age epochs on Earth”, *New Astronomy* **8**, 37 (2003) doi: 10.1016/S1384-1076(02)00193-8
- [3] E. Williams i S. Stanfill, „The physical origin of the land-ocean contrast in lightning activity” *Comptes Rendus Physique* **3**, 1277 (2002) doi: 10.1016/S1631-0705(02)01407X;
- [4] M. J. Rycroft i S. Israelsson, C. Price „The global atmospheric electric circuit, solar activity and climate change”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **62**, 1563 (2000) doi: 10.1016/S1364-6826(00)00112-7
- [5] S. Veretenenko i P. Thejll, „Effects of energetic solar proton events on the cyclone development in the North Atlantic”, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **66**, 393 (2004) doi.org/10.1016/j.jastp.2003.11.005
- [6] O. Troshichev i in. „Influence of the disturbed solar wind on atmospheric processes in Antarctica and El-Nino Southern Oscillation (ENSO)”, *Memorie della Societa Astronomica Italiana*, **76**, 890 (2005) doi.org/10.30758/0555-2648-2021-67-2-177-207
- [7] B. A. Tinsley, „The global atmospheric electric circuit and its effects on cloud microphysics”, *Report on Progress in Physics* **71**, 066801 (2008) doi: 10.1088/0034-4885/71/6/066801
- [8] K. L. Aplin, „Composition and measurement of charged atmospheric clusters” *Space Science Reviews*, **137**, 213 (2008) doi:10.1007/s11214-008-9397-1
- [9] A. V. Gurevich i K. P. Zybin, „Runaway breakdown and electric discharges in thunderstorms”, *Physics Uspekhi*, **44**, 1119 (2001) doi: 10.1070/ps2001v044n11abeh000939
- [10] A. P. Chubenko i in., „Energy Spectrum of lightning gamma emission”, *Phys. Lett. A. Physics Letters A* **373**, 2953 (2009) doi:10.1016/j.physleta.2009.06.031.
- [11] A. V. Gurevich i in., „Non-linear phenomena in the ionospheric plasma. Effects of cosmic rays and runaway breakdown on thunderstorm discharges”, *Physics Uspekhi*, **52**, 735 (2009) doi: 10.3367/ufne.0179.200907h.0779
- [12] A. Chilingarian i in., „Thunderstorm correlated enhancements of Cosmic Ray Fluxes detected on Mt. Aragats”, *Proceedings of 31<sup>st</sup> International Cosmic Ray Conference, ICRC 2009*.
- [13] S. L. Miller, A. Production of Amino Acids Under Possible Primitive Earth Conditions, *Science*, **177**, 528, (1953) doi: 10.1126/science.117.3046.528
- [14] H.D. Betz, U. Schumann i P. Laroche, (Eds) „Lightning, Principles, Instruments and Applications”, (2008), Springer,
- [15] D. J. Allen i in., „Impact of lightning-NO on Eastern United States photochemistry during the summer of 2006 as determined using the CMAQ model” *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **11**, 17699 (2011) doi:10.5194/acpd-11-17699-2011
- [16] C. W. Allen, „Astrophysical Quantities”, Athlone Press (1973),
- [17] N. Globus i R. D. Blandforda „The Chiral Puzzle of Life”, *The Astrophysical Journal*, **895**, L11 doi:10.3847/2041-8213/ab8dc6
- [18] L. Pasteur „Recherches sur les relations qui peuvent exister entre la forme cristalline, la composition chimique et le sens de la polarisation rotatoire”, *Annales de chimie et de physique*, 3<sup>e</sup> série, **XXIV** (1848), 442 (1848) za D. G. Blackmond „The Origin of Biological Homochirality”, *Cold Spring Harbor Perspectives in Biology* **11**, a032540 (2019) doi: 10.1101/cshperspect.
- [19] P. Curie „Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique”, *J. Phys. Theor. Appl.* **3**, 393 (1894) doi: 10.1051/jphysat:0189400300393000

# Z górki na pazurki, czyli jak interaktywnie uczyć o energii mechanicznej

Równia pochyła to taka dydaktyczna tortura dla licealistów (i studentów również). Jedną siłą to sinus, druga cosinus, ale niedokładnie wiadomo, która jest która. Oczywiście, żartujemy: jeśli trzeba, to wiemy. Ale czy to stanowi główny przekaz dydaktyczny, który możemy wypracować korzystając z równi pochyłej Galileusza? Odpowiadamy w artykule: opisuje on pierwszą z naszych wystaw dydaktycznych na UMK, z 2007 roku, noszącą nazwę „Z górki na pazurki”. [1]

Grzegorz Karwasz, Andrzej Karbowski

Fizyka zesłała z nieba na ziemię po równi pochyłej Galileusza – napisał w „Fizyce dla dociekliwych” (Oxford, 1960) E. M. Rogers. Rzeczywiście, dzięki równi udało się nadać precyzję matematyczną ruchom, które wcześniej, nawet u Kopernika, były opisane jedynie słownie. „Ale to ogólne stwierdzenie [o ruchu przyspieszonym] pozostaje bezużyteczne, jeżeli nie wiemy, w jakim porządku odbywa się ten przyrost prędkości. I tak, jeśli w pierwszym momencie kula przebędzie jedną długość w lufie, to w drugim momencie – trzy długości, później – pięć, i tak w porządku kolejnych liczb nieparzystych”, parafrazując nieco przydługie i niegramatyczne po włosku zdanie Galileusza z traktatu „O dwóch największych systemach świata: Ptolemeusza i Kopernika”.

Jak wyjaśniliśmy w poprzednim, nieco podobnym artykule [2], odpowiada to znanemu wzorowi

$$s(t) = \frac{1}{2} at^2$$

(użytych symboli w erze Internetu nie musimy precyzować).

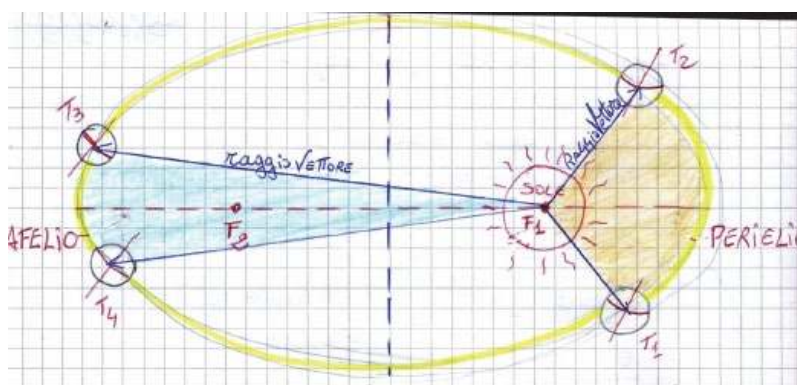
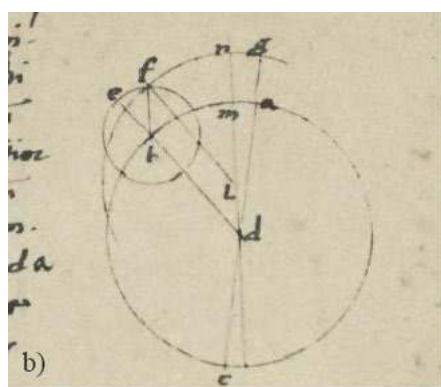
Zgodnie z zasadą dydaktyczną neo-realizmu [3], to co powiedzieliśmy, musimy natychmiast pokazać. Służy do tego długa belka z dzwonekami zawieszonymi we wzajemnych odległościach 1, 3, 5, 7, 9. Belkę taką zobaczyliśmy (GK) w Trydencie, ale okazało się, że jeszcze dłuższa czekała w Toruniu: brakowało jedynie dzwoneków (a te się znalazły na rynku staroci w Berlinie), zob. foto 1 w artykule [2].

Z kolei zgodnie z drugą naszą zasadą dydaktyczną, nazywaną hyper-konstruktywizmem [3] nie pokazujemy tej belki „ot-tak-sobie” ale konstruujemy zdziwienie widzów, gasząc światło w auli i zadając pytanie: „Widzieliście belkę z dzwonekami? Teraz spuścimy po niej kulkę.” Spuszczamy kulkę, wszyscy słyszą dzwonięcie w równych odstępach czasu: „W jakich odległościach są dzwonki?”. Jak tylko pojawi się odpowiedź „W równych”, natychmiast, jak w filmie z szybką akcją, podejmujemy: „Tak! prawda, w równych. Sprawdźmy jeszcze raz!”. Ale teraz zapalamy światło i zanim widzowie przyjrzą się uważnie belce, spuszcza kulkę jeszcze raz. Sprawna dydaktyka to również emocje, na przykład – konsternacja.

Po czym komentujemy: „Ponieważ fizyka to również nauka matematyczna, teraz zmierzmy te odległości.” Tu,



Ryc. 1. Drzwi do dwóch autorskich pracowni Katedry Dydaktyki Fizyki UMK: multimedialnej i doświadczeń sterowanych komputerem. Na nich dwa plakaty tej samej wystawy, „Z górki na pazurki” – jeden na poziomie podstawowym, drugi na poziomie licealnym. Plakaty, po wielu edycjach wystaw, są nieco sfatygowane.



Rys. 2. (a) Poszukiwanie elipsy przez Kopernika. (b) II prawo Keplera w interpretacji uczennicy gimnazjum we Włoszech, Porto Sant'Elpidio, autorki nie udało się odszukać [5].

znów w myśl hyper-konstruktywizmu, tym razem społecznego, dokonujemy podziału ról: jeden uczeń mierzy (wzrost ucznia około 120 cm, wówczas spodziewany rozmiar buta 27 cm), cała widownia liczy, a protokolant zapisuje na tablicy. Odpowiednie zdjęcia przedstawiliśmy w artykule [2] w 2016 roku.

Do wzoru na całkowitą drogę przebytą od początku ruchu do końca - jeszcze wrócimy.

### Jedna belka wiosny nie czyni

Oczywiście, belka Galileusza jest jedynie punktem wyjściowym do sekwencji konstruowania narracji dydaktycznej. Reguła kolejnych liczb nieparzystych, jak to już pokazaliśmy [2] jest jedynie „przypadłością” arytmetyczną wynikającą z odejmowania  $(n+1)^2 - n^2$ . Z kolei wzór  $s(t) = \frac{1}{2}at^2$  jest wynikiem całkowania tzw. równania ruchu, czyli równania wynikającego z II prawa dynamiki Newtona i definicji ruchu jednostajnie przyspieszonego

$$a = d^2s / dt^2 = \text{const}$$

A z kolei równanie bardziej złożone

$$s(t) = \frac{1}{2}at^2 + v_0t + s_0$$

zawiera dwie stałe całkowania (drogę początkową  $s_0$  i prędkość początkową  $v_0$ ). Jak wprowadzić te stałe, bez korzystania z pojęcia całki pokazujemy w naszym „Toruńskim po-ręczniku” do (byłej) klasy I gimnazjum [4].

Konstruując iteratywną narrację (albo interaktywny „tunel dydaktyczny” [1]) musimy, w ukryty nieco sposób, odpowiedzieć na kolejne pytania, wynikające z definicji równi pochyłej i ruchu ciała na niej.

### Dwa stoły

Geniusz Galileusza jako doświadczalnika (był również znakomity astronom i filozofem przyrody, twórcą współczesnej metody naukowej, jak go określa angielskojęzyczna Wikipedia) polega na *modelowaniu* zjawisk. Dwa rodzaje ruchu, jednostajny (przymiotnik) i jednostajnie (przysłówek) przyspieszony, o jakich, trochę zniechęca. uczymy na początku kursu fizyki, są właśnie tego rodzaju modelami. Ba! cała nauka to modele – w odróżnieniu od zwykłego, fenomenologicznego oglądania świata.

Sposób myślenia wywodzi się jeszcze od Arystotelesa, który ruchy dzielił na dwa rodzaje: prostoliniowe i kolist

(zob. np. *Fizyka*, 248b). Zarówno model Ptolemeusza jak Kopernika nosił dziedzictwo tej klasyfikacji. U pierwszego z nich był to system kół zębatych, jak w mechanizmie z Antykithiry (mają one jakieś swoje nazwy, ale ich celowo nie pamiętamy), u drugiego wyraźne trudności z opisem ruchu planet, ryc. 2a. Dziś wiemy, że orbity planet są elipsami, rys. 2b, ale odrzucenie (pięknego) modelu zegara wymagało nie lada wysiłku.

Galileusz, być może zrzucił kamieniem z Krzywej Wieży w Pizie, gdzie za młodu wykładał matematykę, ale zauważenie, że przyrosty prędkości pozostają stałe w tego rodzaju ruchu nie jest proste. I znów proponujemy doświadczenie *ad hoc*, wręcz banalne, ale z zastosowaniem metodologii fizyki, czyli abstrakcji. Puszczamy metalową kulkę (o średnicy 2-3 cm) po poziomym (a raczej prawie poziomym) stole a uczniowie (z zamkniętymi oczyma) *śluchają*, jaki jest to rodzaj ruchu. Po czym pochylamy stół i słuchamy ruchu jednostajnie przyspieszonego. Jeden uczeń mówi „start” i łapie kulkę (oraz sprawdza, czy nie oszukujemy). Podział ról, jak w prawdziwym eksperymencie fizycznym, nawet w CERN. W konstruktywistycznym procesie dydaktycznym istotne jest rozwijanie wszystkich kompetencji ucznia, dziś, nieco bez zrozumienia, nazywanych „miękkimi”. Umiejętność werbalizacji zjawiska nie do końca jasnego („Czym się różnią te dwa rodzaje ruchu?”) to wymuszenie na uczniach procesu wnioskowania, różnicowania, uogólniania.

Nie jest istotna sama nazwa ruchu, bo to jest znów kwestia umowy: równy, rytmiczny, równomierny, miarowy czy jednostajny. Tocząca się kulka to pierwszy eksperyment, kolejny - to nasze miarowe człapanie po klasie, i wreszcie kaczki schodzące ruchem jednostajnym po równi (istotne jest tarcie, które zapewnia dyssypację energii i w efekcie ruch jednostajny, a nie przyspieszony, jak to byłoby dla staczającej się kulki), rys. 3a. Oczywiście, ruch jednostajny (a nie ślizganie się kaczki lub jej przewracanie) uzyskujemy tylko przy zachowaniu szczegółów konstrukcyjnych: właściwego pochylenia równi, szorstkich (pokrytych papierem ściernym) podeszw kaczki, odpowiedniego zakresu ruchu jej nóg, rozłożenia masy itd.

Podobną dyssypację energii, a przez to ruch jednostajny w dużym zakresie warunków doświadczalnych, obserwujemy w zsuwaniu się magnesu neodymowego po grubej miedzianej sztabce albo w ruchu pęcherzyka powietrza



Ryc. 3. (a) Kaczki schodzące po równi ruchem jednostajnym (a nie przyspieszonym, jak tego się spodziewamy) fascynują eksperymentatora, niezależnie od jego wieku i kraju. (b) Kolejne „kultowe” doświadczenie autorów: „Który wózek, cięższy czy lżejszy, zjedzie szybciej po tej równi?” Gunsan, Republika Korei, 2016, wykład GK, foto M. Karwasz.

w rurce z olejem. Siła oporu (wynikająca z generacji prądów wirowych, albo lepkości) są w tych doświadczeniach proporcjonalne do prędkości ruchu, co zapewnia, dla określonego pochylenia, jednostajność ruchu. Dla dorosłych dodamy, że dobrym przybliżeniem ruchu jednostajnego jest też wznoszenie się rosnącego pęcherzyka  $\text{CO}_2$  w szklance piwa. (Podobno, z powodu specyficznych warunków lepkości i wzrastania takiego pęcherzyka, taki ruch jest lepszym przybliżeniem jednostajnego niż bąbelki w wodzie gazowej lub lampce szampana.)

### Konstruowanie koncepcji dydaktycznych

Jak powiedzieliśmy, nauka zajmuje się modelami. Dziś, w dobie tzw. kognitywistyki, dodalibyśmy: dydaktyka zajmuje się konstruowaniem modeli świata, w umyśle młodego człowieka. Dydaktyka to więc konstrukcja, a nie powtórzenie wiedzy czy jej odtwarzanie. A „podręczne” doświadczenia, dostosowane do określonego momentu dydaktycznego (tj. zaistniałej trudności lub wątpliwości poznawczej) są integralną częścią tego konstruowania.

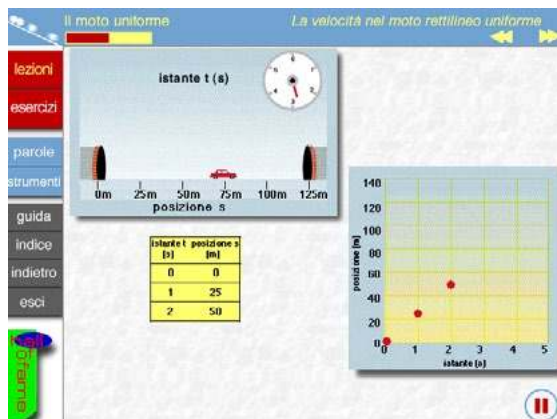
Ale nie jest to bynajmniej: „zobaczyłem ciekawe doświadczenie, więc z niego skorzystam”. W ten sposób nie tworzymy nowych jakości, a jedynie je biernie odtwarzamy.

Są dwa sposoby na wykorzystanie eksponatów/ doświadczeń jako integralnego elementu narracji dydaktycznej. Pierwszy z nich to szukanie obiektów do zagadnienia,

drugi – odwrotnie: szukanie różnych zastosowań dla tego samego obiektu. W pierwszej metodologii pytamy: „Jak mogę pokazać ruch jednostajny?” W dzisiejszych czasach pokusą jest skorzystanie z animacji komputerowej, jak w znakomitym, wielokrotnie przez nas cytowanym, podręczniku multimedialnym „Fisica Interattiva” Ugo Amaliego [6] lub symulacjach z Uniwersytetu w Colorado, zob. ryc. 4.

Ale animacja to niepełnie fizyka: to nie obiekt fizyczny - o swojej masie, kolorze, fakturze porusza się, ale piksele w pamięci komputera. Wspomniany magnes neodymowy czy pęcherzyk powietrza są znacznie bardziej pociągające: w rzeczywistym eksperymencie zawsze może się coś „nie udać”, wzbudzając radość uczniów. A raczej nie „nie udać”, ale przebiec w inny, niespodziewany sposób, pokazując inne niż podręcznikowe aspekty realnego świata.

Znakomitym rozwiązaniem, niestety ciągle za drogim dla budżetu polskich szkół są systemy pomiarowe z wykorzystaniem czujników podłączonych do komputera, zob. rys. 5. Wózki o małych tarcach i czujniki ultradźwiękowe odległości, sprzężone z komputerem natychmiast pokazują zależność od czasu tak położenia  $s$  jak prędkości (przez obliczanie numeryczne pochodnej  $s$ ) a poprzez drugą pochodną – również przyspieszenia. Oczywiście, dla pokazania ruchu jednostajnego szynę należy nieco pochylić, dla zrekomensowania tarcia dynamicznego.



Ryc. 4. Multimedia w dydaktyce fizyki. (a) model ruchu jednostajnego: samochód na odcinku drogi między tunelami, pomiar położenia i czasu, tabelka pomiarów i punkty pomiarowe na wykresie; wszystko w sekwencji animacji [6]. (b) W warunkach oporu powietrza, wystrzelony z armaty samochód doleci dalej niż fortepian. phet.colorado.edu.



Ryc. 5. Dwie (sympatyczne) nauczycielki badają ruch jednostajny i przyspieszony za pomocą komputerowego systemu pomiarowego Pasco. Wózek (czerwony) jest wyposażony w (czarny) kłosa do badania względności ruchów: sprężyna w środku kłosa wyrzuca pionowo w górę małą kulkę. Jeśli wózek stoi lub porusza się ruchem jednostajnym, kulka spada do kłosa. Nie jest tak, jeśli wózek przyspiesza. Laboratorium Katedry Dydaktyki Fizyki UMK wyposażone są w 15 stanowisk Pasco. Foto AK, pozuje GK. UMK 2022.

## Dydaktyka to idea, a nie obiekt

Co zrobić, kiedy nie mamy długiej belki, dzwonek i dużej metalowej kuli, ani systemu Pasco? W tradycyjnej dydaktyce szkolnej była tzw. „spadkownica”, tzn. urządzenie, które pozwala na pomiar czasu spadku, poprzez sumowanie serii kilku przebiegów. A jeśli nie mamy spadkownicy? Bardzo proste doświadczenie z długim sznurkiem i serią ciężkich nakrętek zawiązanych w „kolejnych, nieparzystych” odległościach. A w czasach multimediów i komórkowych kamer cyfrowych możemy obejrzeć odpowiednie filmy, ryc. 6.

## „Z góry na pazurki”

Wystawa tematyczna o przydługim tytule „Z góry na pazurki, czyli energia potencjalna zamienia się na energię kinetyczną i jak można się przy tym dobrze bawić” zrodziła się w 2007 roku jako odpowiedź na wspomniany we wstępie problem dydaktyczny. Nachylona równia Galileusza miała zasadnicze znaczenie dla narodzin fizyki. Jej wartość polega na tym, że jest to najprostsze sprawdzenie

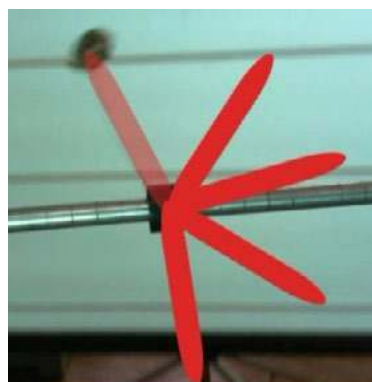
praw ruchu przyspieszonego (w tym swobodnego spadania): punkt wyjścia do praw Newtona. Równia to genialny sposób na „manewrowanie” wartością współczynnika przyspieszania ziemskiego – od zera (na poziomej równi) aż do  $g$  dla równi ustawionej w pionie.

Równia stała się więc punktem wyjścia dla całego dydaktycznego „tunelu”: sekwencyjnego przedstawiania różnych aspektów kinematyki. Ale jak pokazać, że ruch przyspieszony, czyli że rośnie prędkość? Nawet w systemie komputerowym z ryc. 5 prędkość nie jest mierzona bezpośrednio. Pokaz rosnącej prędkości pokazaliśmy za pomocą dziecięcej zabawki do popychania, z kolorowymi paciorkami (ryc. 7). Im szybciej posuwa się zabawka, tym bardziej odchylają się paciorki (jak w regulatorze Watta prędkości maszyny parowej).

W dyskusji o wzajemnych przemianach energii – potencjalnej w kinetyczną i kinetycznej w potencjalną nie może zabraknąć wyjaśnienia, co się dzieje „w końcu” z energią mechaniczną. Wiemy dobrze, że zamienia się w ciepło. Ale jak to pokazać? I tak, na ostatniej w tunelu równi pochyłej, chropowatej desce, zjeżdżał ciężki (około 8 kg) ołowiany klocek (sześciąt). Oczywiście, ołów zbyt dobrze przewodzi ciepło, aby zauważyć, że się nagrzał. Dlatego klocek miał pod spodek dwie drewniane płozy, a podeszwy z papieru ściernego. Dwa-trzy przejazdy klocka i płozy są wyraźnie cieplejsze, zob. film [7]. Fizyka to nauka namacalna!

## Mądrej głowie dość dwie słowie

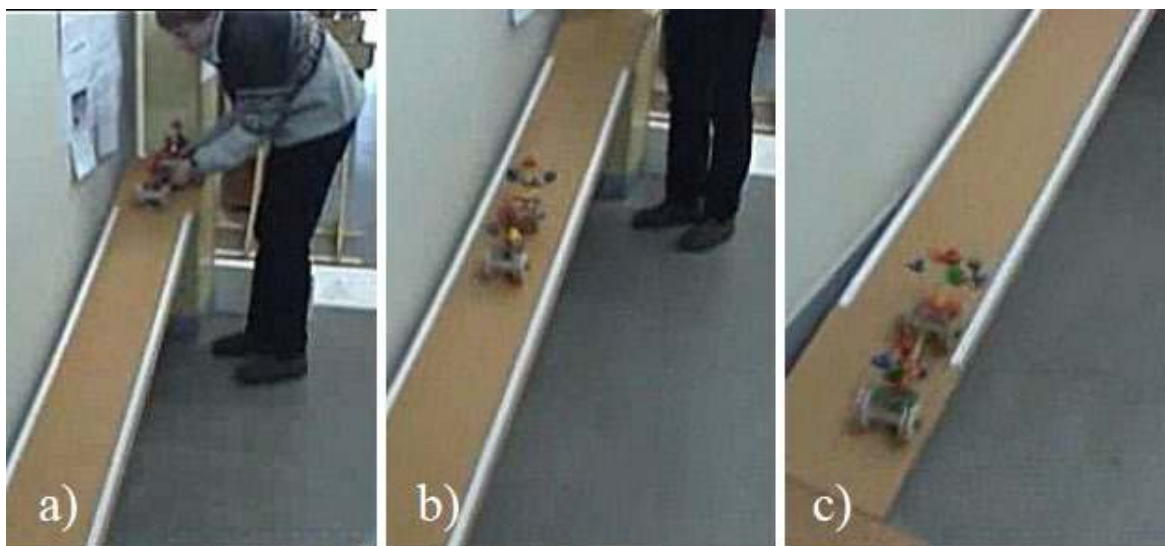
Wystawy, muzea, galerie są przeładowane szczegółowymi opisami eksponatów – jak gdyby autor chciał opisać wszystko co wie. Po dziesiątym eksponacie widz jest kompletnie znużony. W tej wystawie zażartowaliśmy sobie z tego rodzaju „opisywaczy”. Wszystkie eksponaty miały ten sam opis: „Z góry na pazurki”, zob. ryc. 8. A dopiero druga część zdania mówiła dokładnie: „Ale krokami” – opisując schodzące kaczki. Szanując widza szukającego wiedzy, na dole tych super-lakonicznych opisów były podaliśmy szczegółowe wyjaśnienia fizyczne i dydaktyczne. O kaczkach piszemy tak:



Ryc. 6. Filmowe tricki w nauczaniu kinematyki. (a) „Czy piłka może sama podskoczyć?” Seria trzech filmów, a w zasadzie jeden film, ale w sekwencji: odwrócony w czasie, odwrócony i spowolniony, przedstawiony poprawnie, tj. bez odwrócenia. Ograniczona rozdzielczość czasowa kamery umożliwia obserwację „skokami”: przyspieszenie w spadku swobodnym jest tak duże, że nie zauważamy „gołym okiem” rosnących odległości. [http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa\\_strona/?q=node/171](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/171)

(b) „Jak zachowuje się wahadło w spadającej windzie” – pyta po wykładzie licealistka w Gungah (2016). Odpowiadamy filmem: kręci się jednostajnie po okręgu, jak przy braku grawitacji. Jednocześnie, razem ze swoją ramką, wahadło spada ruchem jednostajnie przyspieszonym. [http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa\\_strona/?q=node/591](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/591)

Idea i filmy: GK i mgr Krzysztof Służewski, ZDF UMK.



Ryc. 7. Ekspozycja ilustrująca przyrost prędkości ciała zjeżdżającego po równi pochyłej: wózek z koralikami. Występuje mgr Przemek Miszta, ZDF UMK. Źródło [7]  
[http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/pazurki/filmy/z\\_gorki\\_wozek\\_z\\_karuzelami.wmv](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/pazurki/filmy/z_gorki_wozek_z_karuzelami.wmv)

**Tarcie (statyczne)** modyfikuje ruch: nie jest to zsuwanie się ruchem przyspieszonym, ale schodzenie. Równowaga między składową siłą ciężkości powodującą ruch a siłami dyssypacyjnymi (tarcia) powoduje, że ruch jest jednostajny. Nachylenie równi nie może być ani zbyt duże, ani zbyt małe. W przeciwnym razie zwierzaki zaczynają się zsuwać lub przewracają (w pierwszym przypadku) albo zatrzymują się (w przypadku zbyt małego nachylenia równi). Jeśli z kolei siła tarcia jest „niewłaściwa” – zbyt duża (papier ścierny pod stopą) lub zbyt mała (równia lakierowana), to zabawka też nie działa.

Całość wystawy to nie był zbiór obiektów, ale ukierunkowana narracja, według zagadnień fizycznych i rosnącego stopnia trudności. I tak, za zjeżdżalnią z wózkami, czyli po pokazaniu, że wszystkie ciała spadają/ zjeżdżają po równi z tą samą „prędkością” (celowo poświęcamy dokładność naukową na rzecz pogładowości języka) stoi równia z krążkami o różnych momentach bezwładności.

Oczywiście, krążek o najmniejszym momencie bezwładności jest „najszybszy”: najmniejsza część jego całkowitej energii kinetycznej przypada na energię ruchu obrotowego, zob. foto w [2].

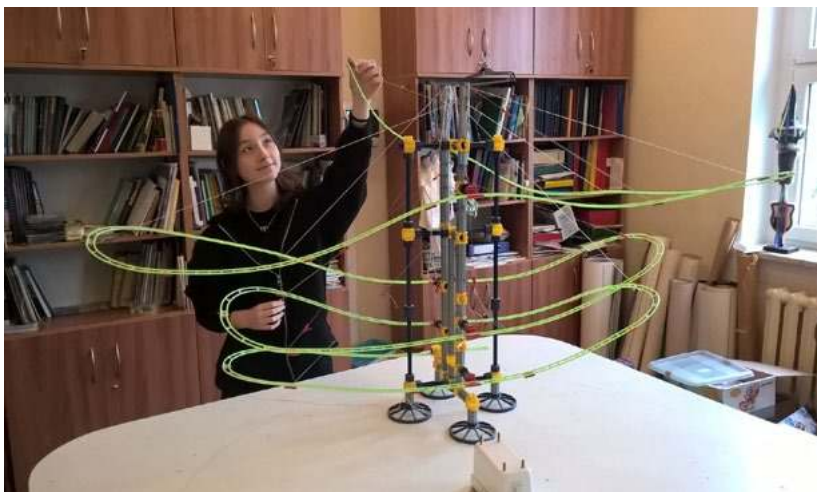
Zabawka z ptaszkami przekazującymi sobie dziobkami energię (nie kulkę, bo ta nie znika), ryc. 8a, wymaga eksponatu komplementarnego – żabki na drabince, ryc. 8b. Im większą energię kinetyczną uzyska kulka, tym na wyższą półkę wpadnie: znaleźliśmy (w Kaiserslautern) drewniany przelicznik energii kinetycznej na potencjalną.

Oczywiście, nie tylko nas fascynują obiekty zjeżdżające, zsuwające się, zawracające w górę (jak yo-yo, zwane też wahadłem Maxwella). Różnego rodzaju zjeżdżalnie są też „żelaznym” punktem we wszystkich centrach nauki. Przykład ze stolicy Australii pokazujemy na ryc. 9a.

Obiekty na wystawie umieszczono w odpowiedniej kolejności, aby wprowadzić różne aspekty kinematyki, ale z rosnącym stopniem trudności ich zrozumienia. Jasnym,



Ryc. 8. Dwa komplementarne stoły w temacie przemian energii mechanicznej. (a) Podnosząc kulkę do wysokości daszku karmnika dostarczamy energii potencjalnej. Krok po kroku ta energia zamienia się w ruch poszczególnych ptaszków. Po prawej stronie ekspozycji „Popchnij mnie!” – klocek na równi tak pochyłonej, aby zsuwał się dopiero po popchnięciu, dla ilustracji różnicy między współczynnikiem tarcia statycznego i dynamicznego. (b) Dwie drabinki z „kominarzami” – idea podobna do „karmnika ptaszków” oraz żaba-wrzutka, ilustrująca przelicznik energii kinetycznej na potencjalną. Ekspozycja po lewej, z Paryża, to dźwignia-wrzutka kulki do wielopoziomowej zjeżdżalni, ekspozycja w środku – gra z Japonii. Idea, ekspozycje, opisy GK, realizacja ZDF UMK 2007.



Ryc. 9. Funkcja zabawowa w dydaktyce: „zjeżdźalnie” przyciągają uwagę we wszystkich centrach nauki. (a) Questacom, Canberra, Australia, foto Maria Karwasz, (b) biuro GK na UMK, pozuje Natalia Wyborska, eksponat GK, foto AK.

choć ukrytym celem dydaktycznym było nauczanie praw ruchu jednostajnego i przyspieszonego oraz trzech zasad zachowania energii, pędu i momentu pędu. W sumie zebraliśmy około 50 obiektów.

### Trzy funkcje eksponatu

W pracy [8] zdefiniowaliśmy trzy funkcje eksponatu: dydaktyczną, zabawową i naukową. Funkcje dydaktyczne w temacie własności ruchu przyspieszonego i przemian energii wyjaśniliśmy już w miarę dokładnie. Oczywiście, nie mogło zabraknąć funkcji zabawowej: ilość eksponatów była wystarczająca, aby każdy uczeń w szkolnej klasie („kwantowaliśmy” wejścia grup) znalazł dla siebie wolny eksponat, ryc. 10a. A na dywanie w pokoju profesora rozłożono tory wyścigowe dla najmłodszych, ryc. 10b.

Ostatni eksperyment – trzy wózki i dwie szyny Pasco, jedna na drugiej, posłużył do pokazania względności ruchu, czyli kluczowego przejścia od fizyki Galileusza do fizyki Einsteina. Wykraczamy poza zwykłą zabawę i stawiamy ważne pytania naukowe, aby pobudzić powstawa-

wową refleksję zwiedzającego. Jego samodzielna aktywność dopełnia cele, czyli naszą dydaktykę. Jak powiedział polski dydaktyk, Z. Pietrański: „Myślenie jest warunkiem uczenia się, ale jest też najważniejszym wynikiem”.

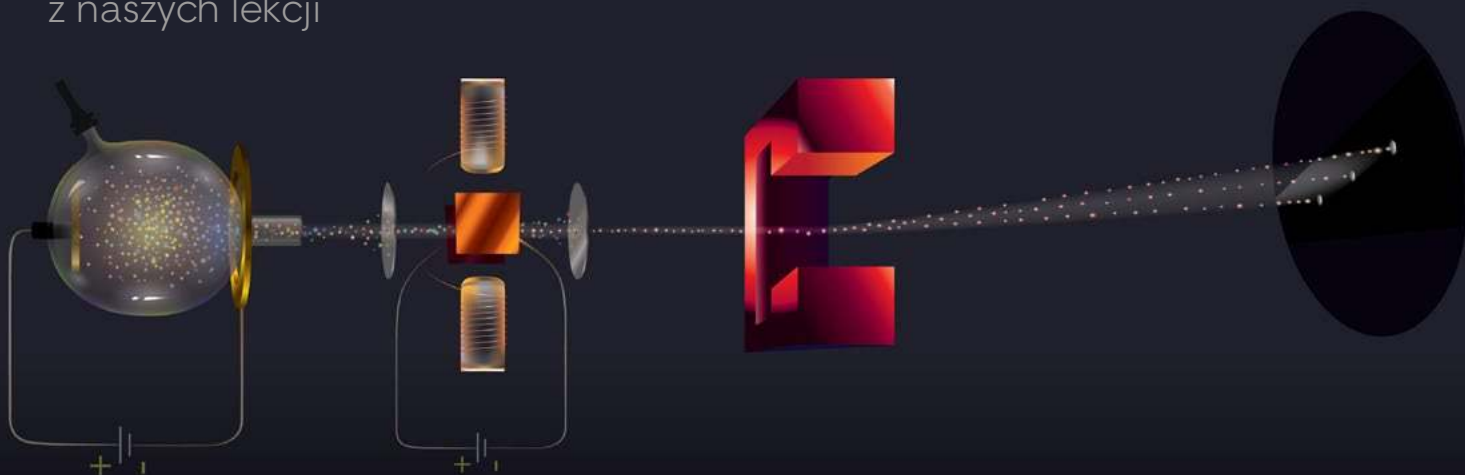
O ile sama wystawa jest unikalna, to eksponaty są powszechnie obecne w różnych sklepikach z zabawkami. Istotna jest koncepcja: obiekt podporządkowany dydaktycznej idei. Uczymy myślenia, fizyka jest tylko pretekstem.

Prof. Grzegorz Karwasz, dr Andrzej Karbowski  
Zakład Dydaktyki Fizyki UMK

- [1] <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/pazurki/galileo.html>.
- [2] G. Karwasz, Fizyka w Szkole, 3/2016, str. 10.
- [3] G. Karwasz, K. Wyborska, Education Sciences, 13 (2023) 195.
- [4] G. Karwasz i in. Toruński podręcznik do fizyki. Gimnazjum I klasa. Mechanika, Wyd. Nauk. UMK, 2010
- [5] G. Karwasz, Toruński podręcznik do fizyki. Fizyka współczesna, Wyd. Nauk. UMK, 2020.
- [6] U. Amaldi, F. Tibione, Fisica interattiva, CD-Rom, Zanichelli, Bologna, 1998.
- [7] [http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/pazurki/filmy/z\\_gorki\\_coraz\\_ciepiej.wmv](http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/pazurki/filmy/z_gorki_coraz_ciepiej.wmv)
- [8] G. Karwasz, J. Kruk, Idee i implementacje dydaktyki interaktywnej. Wyd. Nauk. UMK, 2012.



Ryc. 10. Wystawa interaktywna „Z góry na pazurki” zorganizowana w dość brzydkim korytarzu w Instytucie Fizyki UMK, kwiecień 2007. Obiekty ślizgające się, spadające, staczające się w dół ułożone są w kolejności rosnącej trudności. (a) Jak widać na zdjęciu, dzieci nie tylko rozumiały eksperymenty, ale także wymieniły się wyjaśnieniami. (b) osobny pokój zarezerwowano dla dzieci w wieku przedszkolnym: sama zabawa (ale z nowymi zadaniami) to także dydaktyka – pobudza kreatywność, aktywne uczestnictwo, odpowiednią a doraźną współpracę w grupie itp. Koncepcje, eksponaty, opisy obiektów GK, współpraca ZDF UMK. Zdjęcia: K. Służewski.



## Zastosowanie metod spektrometrycznych

Andrzej Wasiak

### Przekroje czynne na jonizację atomów i cząstek

Procesy zderzeń pomiędzy elektronami i atomami lub cząsteczkami, prowadzące do jonizacji gazów, są badane od czasów eksperymentów Francka i Hertza [1]. Jednak zasadniczy postęp badań w tej dziedzinie obserwuje się od lat trzydziestych dwudziestego wieku. Stało się to w związku z rozwojem takich dyscyplin, jak spektrometria mas, fizyka plazmy, chemia radiacyjna, astrofizyka, fizyka atmosfery i innych dziedzin badań tak podstawowych jak i technicznych.

Przy ustalonych parametrach, takich jak koncentracja atomów w gazie, natężenie wiązki elektronowej przechodzącej przez gaz oraz długość odcinka, na którym zachodzi jonizacja, liczba jonów wytworzonych w jednostce czasu jest funkcją rodzaju gazów i energii elektronów. Przy tym może być badany efekt parcyjny jonizacji (pomiaru parcyjnych przekrojów czynnych) bądź też sumaryczny (pomiaru sumarycznych przekrojów czynnych na jonizację).

W pierwszym przypadku zagadnienie sprowadza się do prądu utworzonego przez jony określonego rodzaju, np. jony  $\text{Ne}^{3+}$  wytwarzane w neonie. W przypadku badania efektu sumarycznego mierzony jest prąd utworzony przez wszelkiego rodzaju jony powstające ze zderzeń elektronów z atomami lub cząstkami gazów, jeśli więc jonizowany jest neon, jony  $\text{Ne}^+$ ,  $\text{Ne}^{2+}$ ,  $\text{Ne}^{3+}$  itd.

Na przykładzie helu, neonu i argonu omówione zostaną niektóre problemy związane z techniką pomiarów przekrojów czynnych na jonizację elektronami. Bardziej szczegółowo opisany będzie sposób pomiarów przekrojów parcyjnych przy użyciu cykloidalnego spektrometru mas.

### Parcyjny i sumaryczny przekrój czynny na jonizację atomów elektronami (definicja)

Elektrony, mające dostatecznie dużą energię, w wyniku zderzeń z atomami gazu wywołują ich jonizację pojedynczą i wielokrotną. Proces ten można zapisać

$$X + e = X^{n+} + (n+1)e, \quad (1)$$

gdzie  $X$  oznacza symbol atomu,  $n = 1, 2, 3, \dots$  jest krotnością jonizacji.

W przypadku jonizacji argonu mamy

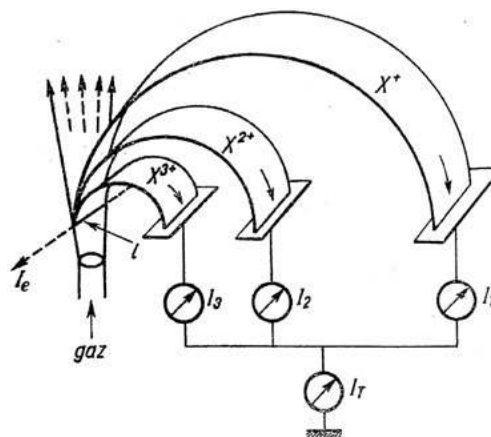
$$\text{Ar} + e = \text{Ar}^+ + 2e$$

$$\text{Ar} + e = \text{Ar}^{2+} + 3e$$

$$\text{Ar} + e = \text{Ar}^{3+} + 4e$$

.....

Niech wiązkę atomów określonego rodzaju o koncentracji  $N$  przecina na długości  $l$  monoenergetyczna wiązka elektronów o natężeniu  $I_e$ . Wytworzone w wyniku zderzeń jony dodatnie ze względu na różne ładunki można rozdzielić za pomocą odpowiedniego analizatora, np. spektrometru mas. Niech urządzenie to zaopatrzone będzie w kilka kolektorów, tak ustawionych, żeby do każdego z nich docierały jony o innej krotności  $n$  zjonizowania. Natężenia prądów tych wiązek będą odpowiednio  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$  ... Przy założeniu, że poszczególne elektrony zderzają się z atomami co najwyżej jeden raz, oraz że każdy z wytworzonych jonów osiąga odpowiedni kolektor, można zapisać



Rys. 1. Zasada pomiaru parcyjnych przekrojów czynnych

$$\begin{aligned}
 I_1 &= Q_1 I_e N l \\
 I_2 &= Q_2 I_e N l \\
 I_3 &= Q_3 I_e N l \\
 &\dots\dots\dots \\
 I_n &= Q_n I_e N l.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

Współczynniki  $Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$  oznaczają parcjalne przekroje czynne na jonizację atomów elektronami albo inaczej przekroje czynne na wytwarzanie jonów naładowanych jednokrotnie, dwukrotnie, trzykrotnie, ...,  $n$ -krotnie. Wymiarem przekroju czynnego jest jednostka powierzchni. W literaturze współczesnej często używa się jednostki  $\pi a_0^2$ , gdzie  $a_0$  jest promieniem pierwszej orbity atomu wodoru Bohra:  $\pi a_0^2 = 8,79 \cdot 10^{-27} \text{ m}^2$ .

Gdyby wszystkie wytworzone jony były zbierane przez jeden wspólny kolektor, wówczas całkowity (sumaryczny) prąd jonowy byłby sumą

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n, \tag{3}$$

Na podstawie wyrażeń (2) i (3)

$$I_T = (Q_1 + 2Q_2 + 3Q_3 + \dots + nQ_n) I_e N l. \tag{4}$$

Oznaczając

$$Q_T = (Q_1 + 2Q_2 + 3Q_3 + \dots + nQ_n). \tag{5}$$

Otrzymujemy

$$I_T = Q_T I_e N l. \tag{6}$$

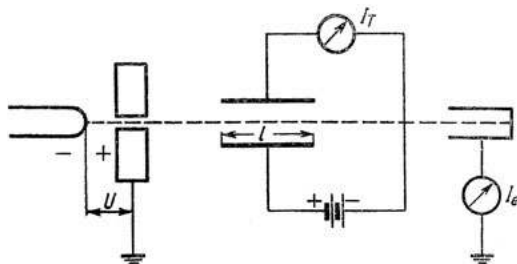
Stąd

$$Q_T = \frac{I_T N l}{I_e}. \tag{7}$$

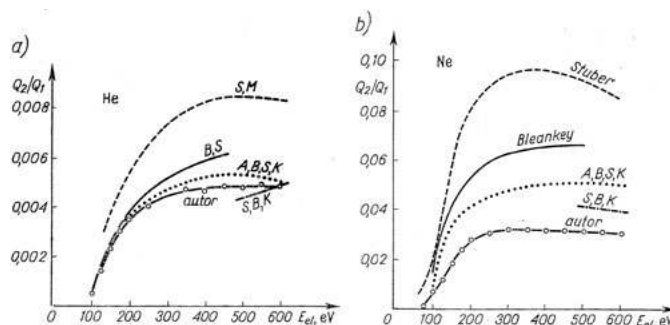
Współczynnik  $Q_T$  jest summarycznym przekrojem czynnym na jonizację atomów elektronami. Stanowi on sumę odpowiednio zwielokrotnionych poszczególnych przekrojów parcyjalnych.

W rzeczywistości technika pomiaru przekrojów summarycznych jest zupełnie odmienna od pomiaru przekrojów parcyjalnych, gdzie niezbędna jest selekcja jonów.

Zasadę pomiarów przekrojów summarycznych przedstawia rys. 2. Przyspieszone różnicą potencjałów  $U$  elektrony tworzą wiązkę przechodzącą pomiędzy okładkami kondensatora płaskiego wypełnionego gazem. Na długości odcinka  $l$  wytwarzane są jony naładowane jedno i wielokrotnie. Z pomiaru natężenia prądu elektronowego  $I_e$ , prądu jonowego  $I_T$ , długości  $l$  oraz koncentracji atomów  $N$ . Poza tym, o czym będzie dalej, w analizatorach mas zale-



Rys. 2. Zasada działania aparatury do wyznaczania summarycznych przekrojów czynnych na jonizację gazów elektronami



Rys. 3. Wartości stosunku niektórych przekrojów parcyjalnych na jonizację helu i neonu elektronami uzyskane przez różnych autorów (S, B, K – Schram, Boerboom, Kistemaker; A, B, S, M, K – Adamczyk, Boerboom, Schram, Kistemaker; B, S – Bleankey, Smith; S, M – Stanton, Monahan)

dwie część wytwarzanych jonów osiąga kolektor. Zatem są to pomiary względne. Wartości bezwzględne przekrojów parcyjalnych otrzymać można metodą normalizacji wyników do wartości absolutnych przekrojów summarycznych, wyznaczonych według wyżej wymienionej metody.

### Parcjalne przekroje czynne na jonizację He, Ne, Ar elektronami

Równoległe do prac nad jonizacją summaryczną prowadzone były badania efektu parcjalego. Ze względu na konieczność rozdzielania różnie naładowanych jonów danego gazu autorzy posługiwali się różnego rodzaju analizatorami.

I tak dla przykładu Adamczyk, Boerboom, Schram i Kistemaker wyznaczyli cząstkowe przekroje czynne na jonizację elektronami o energii do 500 eV dla helu, neonu, wodoru i metanu posługując się cykloidalnym spektrometrem mas.

Wcześniej podobne pomiary wykonali inni autorzy i uwagę zwraca znaczna rozbieżność pomiędzy wynikami uzyskanymi przez poszczególnych badaczy.

Za tak duże rozbieżności odpowiedzialne są efekty aparaturowe.

### Zastosowanie spektrometrii mas w fizyce jądra atomowego

Ważnym parametrem jądra w stanie podstawowym jest masa. Jądro atomowe jest układem związanym protonów i neutronów i energię tego układu w stanie podstawowym można określić podając jego masę. Znając dokładnie masy atomów lub masy jąder można wyznaczyć szereg istotnych dla fizyki jądra atomowego danych, jak energia wiązania jądra, energię oddzielania nukleonów lub tworzenia par nukleonowych.

Znając masy można identyfikować nuklidy, obserwować zmiany energii wiązania w obszarze między zamkniętymi powłokami nukleonów i porównywać dane eksperymentalne z przewidywaniami teorii powłokowej. Masy nuklidów stabilnych były badane od dawna i są znane w większości wypadków z wysoką dokładnością rzędu  $10^{-7}$  u (u – jednostka masy atomowej) dla nuklidów lekkich i dokładnością  $10^{-5}$  u dla ciężkich.

W ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat opracowano eksperymentalne metody wyznaczania dokładnych mas atomowych, z których dwie znajdują szerokie zastosowanie: metoda spektrometrii mas i metoda druga, oparta na pomiarze energii reakcji jądrowych.



Siarka. Foto Adobe Stock

W metodzie spektrometrii mas można uzyskać wysoką dokładność stosując specjalnej konstrukcji spektrometry mas. Budowane są spektrometry o zdolności rozdzielczej rzędu 250000, które umożliwiają pomiar mas atomowych z dokładnością  $10^{-7}$ .

Znając energię rozpadu  $\beta^+$ ,  $\beta^-$ , a oraz energii reakcji  $(n, \gamma)$ ,  $(\gamma, n)$ ,  $(d, p)$  i innych można także z bilansu energetycznego wyznaczyć masę jednego z jąder lub nuklidu, jeżeli tylko jest znana energia drugiego. Uzyskiwana w tej metodzie dokładność jest zbliżona do dokładności spektrometrii mas. Obie metody w wielu przypadkach uzupełniają się, w innych zaś umożliwiają kontrolę wyników.

W obecnej chwili zebrane są w literaturze dane o dokładnych masach atomowych prawie wszystkich izotopów stabilnych i prowadzone są prace mające na celu określenie mas izotopów krótkożyciowych powstających w reakcjach jądrowych. W związku z rozwojem badań nad nuklidami oddalonymi od ścieżki stabilności zagadnienie mas i energii wiązania izotopów krótkożyciowych, ich przewidywanie teoretyczne, jak i wyznaczanie eksperymentalne, mają duże znaczenie. Po odjęciu mas elektronów i ewentualnym uwzględnieniu niewielkiej energii wiązania elektronów na orbitach  $b_e$ , uzyskanej w jednostkach masy, otrzymujemy masy jąder

$$M_j = M - ZM_e + b_e. \quad (8)$$

W tablicach mas podane są masy w jednostkach masy atomowej; najczęściej stabelaryzowana jest wartość D, tj. odchylenie mas.

Jednostka masy atomowej może być wyrażona w kilogramach:

$$1 \text{ u} = 1,660 \cdot 10^{-27} \text{ kg},$$

a także w jednostkach energii

$$1 \text{ u} = 931\,441 \pm 10 \text{ keV},$$

$$1 \text{ keV} = 1,0736 \cdot 10^{-6} \text{ u}.$$

### Procesy rozdzielania izotopów zachodzące w przyrodzie. Zmienność składu izotopowego pierwiastków lekkich

Rozwój spektrometrii mas umożliwił przeprowadzenie systematycznych badań składu izotopowego pierwiastków występujących w skorupie ziemskiej. W miarę



Uran 238. Foto Adobe Stock

gromadzenia materiału doświadczalnego o składzie izotopowym pierwiastków był on publikowany w pracach oryginalnych i monografiach.

Jednakże wkrótce okazało się, że skład izotopowy pierwiastków nie jest czymś jednoznacznym i w zależności od pochodzenia danej próbki, przynajmniej dla niektórych pierwiastków, może ulec znacznym wahaniom. Stwierdzenie tego faktu zapoczątkowało badania składu izotopowego pierwiastków dla próbek różnego pochodzenia celem wyjaśnienia mechanizmu wyróżnienia izotopowego.

Niezależnie od takich wyników badań idea jednolitego pochodzenia materii ziemskiej, a także meteorytowej nie została zarzucona. Zmusza ona do przyjęcia założenia o pierwotnej materii, z której została uformowana Ziemia i która, będąc jednorodna, powinna zawierać pierwiastki o określonym, stałym dla danego pierwiastka składzie izotopowym. Obecnie stwierdzone różnice w składzie izotopowym próbek są wynikiem ich różnej historii. Możliwe są tu dwa przypadki: pierwszy, gdy skład izotopowy pierwiastka ulega zmianie w wyniku reakcji jądrowych prowadzących do powstania dodatkowych ilości niektórych izotopów stabilnych; drugi, gdy zmianie składu izotopowego pierwiastka jest następstwem procesów fizycznych lub chemicznych, prowadzących do rozdzielania izotopowego.

Na przykładzie ołowiu możemy rozpatrzeć proces pierwszy. Ołów ma cztery izotopy stabilne o masach atomowych: 204, 206, 207, 208. Najcięższy izotop 208 jest ostatnim nuklidem w szeregu promieniotwórczym toru, natomiast izotopy 206 i 207 mogą być produktami rozpadu, odpowiednio uranu 238 i 235. Wszędzie więc tam, gdzie wraz z ołowiem znajduje się w skale tor lub uran, skład izotopowy tego pierwiastka ulega zmianie w czasie. Nadal jednak utrzymujemy pojęcie ołowiu nieradiogenicznego, o stałym składzie izotopowym, w skład którego wchodzi również izotop 204.

Drugą przyczyną zmienności składu izotopowego są procesy frakcjonowania zachodzące w przyrodzie. Procesy te mogą być natury fizycznej jak i parowanie i dyfuzja, lub fizykochemicznej – w pierwszej kolejności reakcje wymiany izotopowej, przy czym parametrem, który wyróżnia izotopy w tych procesach są ich masy. Efekt frakcjonowania izotopowego jest znaczny dla pierwiastków lekkich ze względu na ich duże względne różnice mas. Teoretycznie rozdzielanie izotopowe może być spowodowane różnymi

przyczynami: parowanie lub kondensacja, rozpuszczaniem lub wytraceniem z roztworu. I tak na przykład w przypadku parowania wody szybciej paruje woda lekka niż ciężka, dlatego para jest wzbogacona w wodę lżejszą.

Rozdzielenie izotopowe następuje również w przypadku elektrolizy wody, która przebiega znacznie szybciej dla wodoru lekkiego niż dla deuteru, co jest podstawą metody uzyskiwania ciężkiej wody. Różnice w składzie izotopowym pierwiastków można pokazać na przykładzie izotopów siarki.

Siarka ma aż cztery izotopy stabilne o masach 32, 33, 34 i 36 i procentowej zawartości w naturalnym pierwiastku odpowiednio: 95,06; 0,74; 4,18 i 0,16%. Podane wartości należy jednak przyjmować za średnie, gdyż siarka jest pierwiastkiem wykazującym znaczne wahania składu izotopowego.

Siarka wykazuje dużą aktywność chemiczną, wchodzi w związku z szeregiem pierwiastków, z tym z wodorem i tlenem, a także jest ważnym składnikiem żywej materii.

Od czasu, gdy technika pomiaru składu izotopowego znacznie się rozwinęła rozpoczęto systematyczne pomiary składu izotopowego pierwiastków, w tym także i siarki i to nie tylko ziemskiej, lecz także próbek pobranych z meteorytów. Okazało się, że przy znacznej zmienności składu izotopowego siarki pochodzenia ziemskiego, siarka meteorytowa ma skład izotopowy zdumiewająco stały. Jeżeli za miarę składu izotopowego dwóch najbardziej

rozpowszechnionych izotopów siarki, izotopu 32 i 34, to dla siarki meteorytowej

$$\frac{[^{32}\text{S}]}{[^{34}\text{S}]} = 22,22.$$

Pomiary wykazują, że nawet dla meteorytów o różnej budowie i o różnym składzie chemicznym wartość składu izotopowego waha się w granicach 22,20 do 22,24. Fakt ten wykorzystano przyjmując wartość stosunku izotopowego siarki meteorytowej jako wzorcową, względem której już pomiarach względnych wyznacza się skład izotopowy tego pierwiastka.

Duża stałość składu izotopowego siarki meteorytowej jest godna uwagi i świadczy o tym, że w warunkach przestrzeni kosmicznej nie zachodzi frakcjonowanie tego pierwiastka. W przeciwieństwie do siarki inne pierwiastki lekkie spotykane w meteorytach, jak H, C lub O wykazują znaczne zróżnicowanie składu izotopowego, przekraczające często różnice w składzie próbek pochodzenia ziemskiego.

#### LITERATURA

- [1] Izotopy w geologii, zbiór artykułów pod red. Trofimow A.W., Szerbakowa D.J., tłum z ang. Wyd. Inost. Moskwa 1954 s. 1–640.
- [2] Degens E.T., Geochemistry of Solidiments, a Brief Survey, Prentice-Hall Inc. 1998.
- [3] Żuk W., Spektrometria mas i elektromagnetyczna separacja izotopów. PWN 1980.
- [4] Wasiaś A., Praca magisterska 1972.

## Co w fizyce piszczy

### Eksperyment Becquerela po 127 latach

**W marcu 1895 roku francuski naukowiec Henri Becquerel przeprowadził eksperyment, którym udowodnił, że ruda uranu uwalnia nieznane wówczas promieniowanie.**

Promienie rentgenowskie odkryto w 1895 roku. Rok później, Henri Becquerel postanowił sprawdzić, czy fluorescencji niektórych minerałów towarzyszy emisja promieni Roentgena. Wśród wielu materiałów poddanych badaniom przez naukowca znalazł się siarczan potasowo-uranowy.

Sam przebieg doświadczenia był stosunkowo prosty. Pod próbkę położono zawiniętą w czarny papier szklaną płytkę używaną w tamtych czasach do robienia fotografii. Jak się okazało, po pewnym czasie światłoczuła emulsja na płytce została zaczerniona, dowodząc tym samym, że pomimo bariery z czarnego papieru, dotarło do niej promieniowanie – nazwane promieniami uranowymi lub promieniami Becquerela. Na wyniki eksperymentu trafiła w 1897 roku Maria Skłodowska-Curie, która poszukiwała tematu do pracy doktorskiej. Efektem jej prac było m.in. odkrycie dwóch pierwiastków promieniotwórczych: polonu i radu, a w 1903 roku Becquerel, Piotr Curie i Maria Skłodowska-Curie za swoją pracę otrzymali nagrody Nobla z dziedziny fizyki.

W 127 rocznicę eksperyment Becquerela powtórzył założyciel i kustosz Muzeum Lamp Rentgenowskich Politechniki Opolskiej – największego w Polsce i jednego z największych na świecie zbioru eksponatów związanych z promieniowaniem.

„Mając do dyspozycji kilka minerałów z okolic Kletna postanowiłem powtórzyć eksperyment Becquerela z marca 1896 r. Zdjęcia wykonał p. Sławoj Dubiel. Kamień umieszczono na zapakowanej w światłoszczelny worek błonie fotograficznej 10x15 cm Foma o czułości 400 ASA. Przez cztery dni worek wraz z kamieniem i światłoczułym negatywem znajdował się w ciemni fotograficznej. Błona po zakończeniu eksperymentu została wywołana w standardowym wywoływaczu do negatywów” – wyjaśnia dr inż. Grzegorz Jezierski.

Pomimo użycia nieco innych materiałów (nowoczesna błona fotograficzna zamiast płytki szklanej), wyniki współczesnego eksperymentu nie różnią się od tych, sprzed ponad wieku. Różne jest jednak podejście do samego promieniowania. To, co kiedyś było jedynie ciekawostką, dzisiaj stało się częścią naszego życia. Naukowcy i użytkownicy są także świadomi zagrożeń, związanych z promieniotwórczością i w przeciwieństwie do pierwszych badaczy tego zjawiska, którzy w wyniku prac naukowych tracili często zdrowie, obecnie potrafią skutecznie wykrywać niebezpieczeństwo i mu zapobiegać.

„Możliwości wykorzystania promieniowania jest bardzo dużo. Zazwyczaj kojarzone jest z medycyną oraz ochroną na lotniskach. Tak naprawdę jednak ze zjawiska promieniowania korzysta się w przemyśle spożywczym, przy segregacji śmieci, sprawdzaniu części maszyn, a nawet w podboju kosmosu” – wyjaśnił naukowiec.

PAP – Nauka w Polsce, Marek Szczepanik

## Żywoty fizyków

# Błażej Pascal (1623-1662)

ku pouczeniu i pokrzepieniu serc  
wraz z przykładami dla ćwiczenia się w nauce i zdobywania mądrości

Tadeusz Wibig

Nie mógł zarzekać na swoje dzieciństwo. Wprawdzie jego matka zmarła, gdy miał 3 lata, ale ojciec Étienne Pascal, lokalna osobistość, urzędnik podatkowy, prawnik i powszechnie szanowany w Clermont-Ferrand przedstawiciel nowej szlachty francuskiej był z zamiłowania ogólnie naukowcem, a matematykiem w szczególności i po śmierci żony zajął się na serio edukacją młodego Błażeja i to w sposób nieortodoksyjny: postanowił, że nie będzie się on uczył matematyki zanim nie osiągnie 15 lat i usunął z domu wszystkie książki matematyczne.

Jak należało się spodziewać nie pomogło to, a nawet wprost przeciwnie, bo młody Pascal już mając 12 lat zaczął samodzielnie studiować geometrię i odkrył, że suma kątów w trójkącie to dwa kąty proste. Gdy dowiedział się o tym jego ojciec (nie o tym, że trójkąt ma 180 stopni, a o tym, że mały Błażej sam na to wpadł), złagodził swoje zasady i dał Błażejowi egzemplarz „Elementów” Euklidesa.

Gdy młody Pascal miał 14 lat, spotkał katolickiego duchownego Marina Mersenne’a. Był on minimitą, a jednocześnie wielkim i znanym uczonym swoich czasów. Dziś znany jest głównie z pojęcia liczb pierwszym Mersenne’a, ale warto wspomnieć o jego prawie (prawie Mersenne’a) mówiącym o częstości drgań naprężonej struny, interesujących pracach z akustyki i teorii muzyki, a także, o pracach z optyki dotyczącymi między innymi konstrukcji teleskopów. Mersenne korespondował z wieloma znanymi umysłami epoki, wśród których trzeba wymienić przede wszystkim Kartezjusza, ale o tym za chwilę.

Niewątpliwym geniuszem Pascala objawił się na jednym ze spotkań u Mersenne’a w czerwcu roku 1639. Szesnasto-

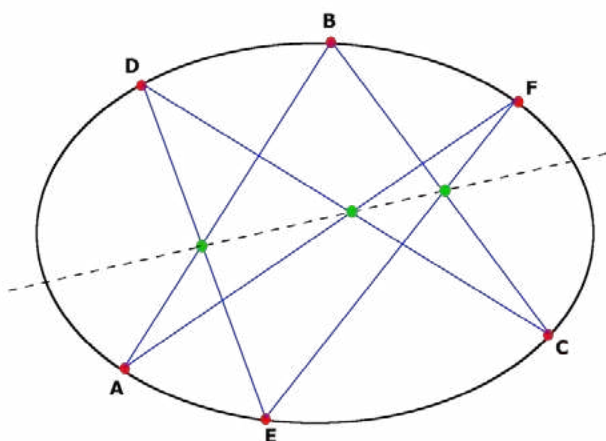


letni Pascal pokazał wtedy pojedynczą kartkę, na której zapisał kilka twierdzeń z geometrii rzutowej, a w tym **mistyczny sześciokąt** (*Hexagrammum Mysticum*) znany dziś jako **mistyczny sześciokąt Pascala**.

Aby go zbudować wystarczy wziąć sześć jakichkolwiek punktów leżących na krzywej stożkowej (np. elipsie, ale niekoniecznie, może to być i hiperbola czy parabola): A, B, C, D, E i F. Jeśli zaznaczyć punkty przecięcia odcinków łączących wierzchołki (ogólnie: prostych, na których leżą te odcinki), np. AB i DE, oraz CD i AF i BC i EF to wszystkie te punkty będą współliniowe (leżą na jednej prostej zwanej *linią Pascala*). Rysunek pokazuje taką konfigurację. Oby zobaczyć dokładnie, jak to działa warto zajrzeć na stronę: <https://www.geogebra.org/m/ytr4dyya>. Zaskakująca teza tego twierdzenia nie wyczerpuje całej tajemniczości sześciokąta Pascala. Dla każdej szóstki punktów mamy 60 różnych ich połączeń, a więc 60 różnych pascalskich linii. Wszystkie te 60 prostych, jak pokazał w połowie XIX wieku pan Kirkman, definiuje 60 punktów, w których przecinają się dokładnie po trzy z nich i każda z nich zawiera dokładnie trzy punkty Pascala. Te punkty nazywają się oczywiście *punktami Kirkmana*. Ale to nie koniec: linie Pascala przechodzą również, po trzy na raz, przez 20 *punktów Steiner*. Istnieje też 20 *linii Cayleya* (tego od oktonionów), które składają się z punktu Steiner i trzech punktów Kirkmana. Punkty Steiner leżą także, po cztery na raz, na 15 *liniach Plückera*. Ponadto 20 linii Cayleya przechodzi po cztery na raz przez 15 punktów znanych jako *punkty Salmona*. Ktokolwiek zrozumie to, co napisałem w tych kilku zdaniach będzie mógł uznać się za znawcę mistycznego sześciokąta Pascala.

To matematyczne odkrycie nieletniego Pascala nie jest powszechnie znane (i dlatego poświęciliśmy mu tyle miejsca), ale już jego pierwsze opublikowane dzieło naukowe z 1640 roku *Essai pour les coniques* (*Esej o stożkach*) wzbudziło zainteresowanie środowiska, a w szczególności wspomnianego już Kartezjusza.

Błażej był dobrym dzieckiem. Chcąc ulżyć w pracy ojcu, który w 1639 roku po opuszczeniu z rodziną Paryża zamieszkał w Rouen i został tam poborcą podatkowym dla całej Górnej Normandii, wynalazł kalkulator (choć nie do końca, bo pierwszy dwadzieścia lat wcześniej był niejaki Schickard). Okazało się, że Pascal jest nie tylko matematykiem-teoretykiem, ale i bardzo praktycznym matematykiem-wynalazcą. Pracował nad nim przez trzy



lata między 1642 a 1645 rokiem. Urządzenie, nazwane **Pascaline**, nie osiągnęło jednak spodziewanego sukcesu rynkowego. Do 1652 roku wyprodukowano zaledwie pięćdziesiąt sztuk i zaprzestano produkcji.

Mniej więcej od tego czasu Pascal rozpoczął też serię eksperymentów nad ciśnieniem. Niepokoiło go pochodzące od Arystotelesa powszechnie przyjęte przekonanie, że natura nie znosi próżni, próżnia to bowiem „nic”, a „nic” przecież istnieć nie może, bo gdyby istniało, byłoby przecież „czymś”!). W roku 1643 próżnię pokazał Torricelli w swym słynnym doświadczeniu z rurką o długości większej niż 760 mm zasklepioną z jednej strony i wypełnioną rtęcią, którą potem odwracał (i tak wynalazł barometr!). Niektórzy wielcy i uznani uczeni, myśliciele i fizycy tamtych czasów, jak choćby wspomniany już Kartezjusz podpierając się antycznym autorytetem twierdzili, że „próżnię Torricellego” wypełnia dość dziwna, niewidzialna substancja o nazwie „*plenum*”.

We wrześniu 1647 roku Kartezjusz wpadł na dwa dni do Pascala pokłócić się o naturę „próżni Torricellego”. W rezultacie tej wizyty Kartezjusz napisał, w liście do Huygensa, że Pascal „*ma za dużo próżni w głowie*”, a Pascal w październiku napisał dzieło *Experiences nouvelles touchant le vide* (Nowe eksperymenty dotyczące próżni), które sprecyzowało jego poglądy w sporach z tymi, którzy, podobnie jak Kartezjusz, w próżnię nie wierzyli.

Pascal na tym jednak nie skończył, poszedł dalej. Zadał sobie pytanie, jaka to siła utrzymuje rtęć w rurce Torricellego do mniej więcej stałego poziomu 760 mm. Odpowiedź jest dziś dla nas oczywista, ale w połowie XVII wieku taka wcale nie była. Pascal obmyślił eksperyment mający tę kwestię definitywnie rozstrzygnąć. Jeśli ciśnienie na nas z góry powietrze i powietrze to waży aż tyle, to jeśli wejdziemy na jakąś wysoką górę, to nad nami powietrza będzie mniej i mniej będzie cisnąć, a zatem słupek rtęci w rurce obniży się. Sam Pascal był zbyt wątłego zdrowia, aby wspinać się na góry, ale szczęśliwie miał dwie siostry. Ze starszą z nich, Gilberte, ożenił się niejaki Florin Périer. Latem roku 1648 Pascal przekonał szwagra, by wspinał się on na szczyt wygasłego dawno wulkanu, Puy de Dôme (1460 m) i po drodze mierzył wysokość rtęci w rurce barometru i ten we wrześniu odbył wędrowkę na szczyt, rejestrując po drodze poziom rtęci. Jednocześnie u podstawy góry, mierzono poziom rtęci w drugim barometrze, no i okazało się oczywiście, że w miarę jak Périer wchodził coraz wyżej poziom rtęci spadał. Pascal był zachwycony wynikami eksperymentu. Udowodnił, że Torricelli miał rację, atmosfera ma ciężar i to on naciska na powierzchnie wszyskiego.

z relacji Périera:

*Pogoda była chwiejna w ostatnią sobotę ... około piątej rano... Puy-de-Dôme było widoczne... więc postanowiłem spróbować.*

*...o ósmej spotkaliśmy się w ogrodach Ojców Minimalnych, które mają najniższe wzniesienie w mieście.... Najpierw wlałem 16 funtów rtęci... do naczynia... potem wziąłem kilka szklanych rur... każda długa na cztery stopy, hermetycznie zamknięta na jednym końcu i ot-*

*warta na drugim. ...następnie umieściłem je w naczyniu [z rtęcią]... Okazało się, że „żywe srebro” zatrzymało się na wysokości 26 cali i 3 i pół linii [linia to była miara długości równa na ogół 1/12 cala, we Francji za czasów Pascala było to około 2.25 mm] powyżej poziomu rtęci w naczyniu... Powtórzyłem eksperyment jeszcze dwa razy stojąc w tym samym miejscu...[uży-skalem] ten sam wynik za każdym razem...*

*...Przymocowałem jedną z rurek do naczynia i zaznaczyłem wysokość rtęci i... poprosiłem Ojca Chastin, jednego z Braci Minimalnych... aby obserwował, czy w ciągu dnia nie nastąpią jakieś zmiany... Biorąc drugą rurkę i porcję rtęci... Przeszedłem na szczyt Puy-de-Dôme, około 500 sążni wyżej niż klasztor. Po przeprowadzeniu eksperymentu... stwierdziłem, że rtęć osiągnęła wysokość zaledwie 23 cali i 2 linie... Powtórzyłem eksperyment pięć razy z ostrożnością... w każdym z różnych punktów na szczycie... stwierdziłem tę samą wysokość rtęci... w każdym przypadku...*

Pascal powtórzył to doświadczenie w Paryżu, wnosząc barometr na szczyt dzwonnicy przy kościele Saint-Jacques-de-la-Boucherie (50 m). Poziom rtęci obniżył się o dwie linie.

W 1653 Pascal napisał *Traité de l'équilibre des liqueurs et de la pesanteur de la masse de l'air*, (Traktat o równowadze płynów i o tym, ile waży powietrze), w którym wyjaśnia prawo znane dziś jako **prawo Pascala** i zawiera swoje najważniejsze dokonania w dziedzinie hydrostatyki.

O Pascalu można by jeszcze długo, gdyż tak naprawdę to nie dotarliśmy do jego największych osiągnięć, a te zdarzyły mu się na polach matematyki, filozofii i teologii.

Wszyscy zapewne znają trójkąt Pascala. Był on rezultatem jego rozważań kombinatorycznych znanych z naukowej korespondencji z roku 1654 z Fermatem (tym od Wielkiego Twierdzenia  $x^n + y^n = z^n$ ). Kontynuowali oni na życzenie znanego arystokratycznego hazardzisty Kawalera de Méré rozważanie rozpoczęte już wcześniej przez Cardana i Tartaglię dotyczące gry w kości. Zaczęli od

The image shows a handwritten version of Pascal's Triangle. It is a grid of numbers arranged in a triangular shape. The numbers are written in a cursive script. To the right of the triangle, there are two handwritten labels: "Rangs paralleles" and "Triangle Arithmetique". The grid is 10 rows high and 10 columns wide. The numbers are arranged in a way that each number is the sum of the two numbers directly above it. The first row contains the number 1. The second row contains 1 and 1. The third row contains 1, 2, and 1. The fourth row contains 1, 3, 3, and 1. The fifth row contains 1, 4, 6, 4, and 1. The sixth row contains 1, 5, 10, 10, 5, and 1. The seventh row contains 1, 6, 15, 20, 15, 6, and 1. The eighth row contains 1, 7, 21, 35, 35, 21, 7, and 1. The ninth row contains 1, 8, 28, 56, 70, 56, 28, 8, and 1. The tenth row contains 1, 9, 36, 84, 126, 126, 84, 36, 9, and 1.

Trójkąt Pascala w oryginalnej, pascalskiej wersji

odpowiedzi na pytanie, czy opłaca się stawiać pieniądze na to, że rzucając dwiema kostkami wyrzuci się parę szóstek wcześniej niż w 25 rzutach. Do czego to doprowadziło ani Pascal, ani Fermat, wiedzieć nie mogli. Dziś rachowanie szansy na coś, co zdarzyć się może, ale nie musi i podejmowanie na tej podstawie rozsądnych, lub nie decyzji stanowi elementarz nie tylko gry na giełdzie, a ekonomii w ogóle, czyli w sumie tego, co dzieje się z naszymi pieniędzmi.

Ale teoretyczne zamiłowanie Pascala do zakładania się i jego świeżo stworzone probabilistyczne koncepcje zysku i straty zaowocowały oryginalnym pomysłem znanym powszechnie jako **zakład Pascala**. Uzasadniał on w prosty sposób, że wiara w Boga, który złych każe, a dobrych nagradza (po śmierci) jest bardzo dobrym i opłacalnym w sumie życiowym wyborem każdego człowieka, jeśli ma on tylko możliwość takiego wyboru. Rozumowanie to, jak i wiele innych koncepcji dotyczących wiary i w ogó-

le złotych myśli zapisywał Pascal na luźnych kartkach, które może kiedyś zamierzał poskładać w jedną mądrą książkę, ale nie zdążył. Zgromadzone przez wspomnianą już siostrę Gilberte wydano w końcu w uporządkowanej rozsądnie formie dopiero dwieście lat po śmierci autora w książce nazwanej bezpretensjonalnie *Myśli (Pensées)*.

Z myśli Pascala najśłynniejsza jest ta o trzcinie, że

***Człowiek jest tylko trzciną, najsłabszą w przyrodzie, ale jest trzciną myślącą.***

Pascal zmarł w wieku 39 lat. Wystarczyło to jednak, by trafił do międzynarodowego układu jednostek miar SI. W paskalach mierzymy ciśnienie. Jeden paskal (Pa) to jeden newton (N) na jeden metr kwadratowy ( $m^2$ ). To mało, bardzo mało. Ciśnienie atmosferyczne, to które mierzył Pascal, to mniej więcej 100 tysięcy paskali, czyli 1000 hektopaskali (hPa).

### Doświadczenie domowe:

#### Kubek Pitagorasa

##### A. Potrzebne materiały

1. Kubek plastikowy
2. Plastikowa słomka do napojów

**B. Narzędzia** – gwoździć o łepku w rozmiarze średnicy słomki, korek, świeczka, urządzenie do klejenia na gorąco, miska.

##### C. Kolejność czynności

1. Wbijamy gwoździć w korek.
2. Rozgrzewamy łepkę gwoźdźnia nad świeczką trzymając ostrożnie za korek.
3. Wypalamy nim otwór w środku dna kubka.
4. Słomkę do napojów zaginamy o 180 stopni i skleamy w tej pozycji.
5. Po wystygnięciu wkładamy zgiętą słomkę w wypaloną dziurkę w dnie dużego kubka tak, by część zagięta była wewnątrz kubka i otworem sięgała prawie dna.
6. Mocujemy ją do dna dużego kubka od spodu (bo wygodniej) klejem na gorąco tak, by połączenie było wodoszczelne.
7. Czekamy, aż konstrukcja ostygnie
8. Obcinamy wystającą słomkę, jeśli jest zbyt długa.
9. Trzymając kubek nad miską wlewamy do niego ostrożnie wodę tak, by nie sięgała zagięcia słomki
10. Nic się nie dzieje, możemy napić się, jeśli mamy pragnienie
11. A teraz wlewamy więcej wody do dużego kubka, tak by całkiem zakryć słomkę
12. Coś się dzieje – woda wylewa się i po chwili już nie ma w kubku nic do wypicia!

Tak działa kubek Pitagorasa, czasem zwany też kubkiem sprawiedliwości albo kubkiem chciwości. Nie pozwalał on wlewać doń starożytnym Grekom więcej wina



niz im się należało i przy okazji przypominał ludziom, że jeśli już pić, to z umiarem.

Warto wiedzieć, że tak właśnie działa spluczka w wszystkich domowych toaletach. Oczywiście mechanizm jest nieco bardziej skomplikowany, ale zasada działania jest właśnie taka. Czy zdawaliście sobie sprawę z tego, że macie tam coś od samego Pitagorasa?

# Prawda czy fałsz...

## (Impresja dydaktyczna)

Foto – Dreamstime

*Jedynie prawda jest ciekawa!*

S. Cat-Mackiewicz

Waldemar Reńda

Jerzy Kuczyński w artykule „Jedna z przyczyn niechęci do nauki” (Fizyka w Szkole, 6/2022) pisze: „...nasza współczesna wiedza jest pełna absurdalnych błędów, które za kilkadziesiąt lat będą nadawać się jako teksty kabaretowe.” I dalej w odnośniku 12 cytuje Czesława Miłosza: „Taki co mówi, że ma 100 procent racji, to paskudny gwałtownik, straszny rabuśnik, największy lajdak.”

Ostrożnie więc zapytam, czy w tym przypadku nasz Noblista miał na myśli nauczycieli fizyki? Jeżeli nie, to do kogo zatem mogą odnosić się te słowa? Otóż zgodzę się, że odnosić się mogą do przedstawicieli nauk społecznych. Jeżeli natomiast chodzi o fizyków, to może dotyczy tych, którzy pracują naukowo, formułując hipotezy i je weryfikując.

I dalej autor tej pracy pisze: „...z pojedynczego doświadczenia nie możemy **niczego wnioskować**.” (Podkreślenie autora). Stwierdzenie to jest prawdą, jeżeli pracujemy naukowo. Natomiast doświadczenia, które starannie wykonujemy na lekcjach fizyki, są miarodajne. Podam jednak przykład dwóch doświadczeń, które takimi nie były, a wykonali je naukowcy. Jedno z nich to przeprowadzenie tak zwanej zimnej fuzji, a drugie to uzyskanie neutrin nadświatlnych. Oba doświadczenia okazały się fałszywe. W pierwszym przypadku podobno źle zinterpre-

towano uzyskane wyniki, a w drugim przypadku okazało się, że jeden z zegarów nieco się spóźniał.

Czy zatem nasza wiedza jest pełna absurdalnych błędów? Raczej nie, gdyż kolejne hipotezy czy efekty doświadczeń są przez innych uczonych skrupulatnie badane i te fałszywe eliminowane. Nie wchodzą więc do kanonu oficjalnej nauki. Owszem, nierzadko błąkają się po różnych pseudonaukowych wydawnictwach, czyniąc zamęt w głowach czytelników nieprzygotowanych do percepcji tego typu treści.

### Wiedza

Pozwolę sobie wrócić do słowa „wiedza” w pierwszym cytacie. Według mnie istnieje różnica między wiedzą i uprawianiem danej nauki. Wiedza to zbiór sprawdzonych i wiarygodnych informacji, w których nie ma miejsca na fałsz. Natomiast owa niepewność prawdy pojawia się w przypadku, gdy tę wiedzę dopiero tworzymy.

Ucząc fizyki, przekazujemy uczniom właśnie tę sprawdzoną i zweryfikowaną wiedzę. Nikt bowiem nie kwestionuje prawa Archimedesesa, mimo że ma ono ponad 2200 lat, czy też dokonania Kopernika, choć jego model Układu Płanetarnego poprawił Kepler, a następnie uściślono go do postaci, w której występuje masa ciała centralnego i masy planet.

I tu doszedłem do tych „100 procent racji”. Owszem, na ogół wiele praw ma charakter nieco przybliżony lub

wymagający określonych warunków, by były prawdziwe. Prostym przykładem takich przybliżeń jest choćby owo III prawo Keplera, w którym pojawiają się masy. A przybliżenie to opiera się na fakcie, że gdy masa planety jest znacznie mniejsza od masy Słońca, to można bez większych problemów stosować wzór Keplera z pominięciem owych mas. Co jeszcze? W praktyce szkolnej opisujemy np. zjawisko swobodnego spadania, przyjmując, że nie ma oporu powietrza. Wprowadza się też pojęcie ciała doskonale czarnego, a także analizuje się ruch wahadła matematycznego. Czy to jednak oznacza, że przekazujemy fałszywą wiedzę?

Cytowany przeze mnie Autor swoją pracę kończy słowami: „...*próbując podkreślać jej (nauki) pewność możemy co najwyżej wzbudzić niechęć.*” Według mnie tę niechęć wzbudzi raczej stwierdzenie zawarte w pierwszym cytacie, bo po co mam zdobywać daną wiedzę, jeżeli jest ona pełna absurdów?

Niechęć uczniów do fizyki wiąże się zupełnie z czymś innym. Oto przykład: Pod koniec lat 90-tych w szkołach podstawowych robiliśmy badania, pytając uczniów, jakie przedmioty są przez nich najbardziej lubiane, a jakie nie. Okazało się, że w kl. VI fizyka należała do przedmiotów cieszących się sympatią. Natomiast w klasie VII była uważana za przedmiot trudny i niezbyt lubiany. A przyczyną spadku owej sympatii była kinematyka pełna wzorów, reguł i trudnych zadań. Również program licealnej fizyki zaczyna się od najtrudniejszego działu, jakim jest właśnie kinematyka. Realizacja tego działu sprawia i nauczycielowi duże trudności, bo uczniowie nie znają jeszcze pojęcia funkcji, a tu trzeba kreślić wykresy funkcji  $s(t)$ ,  $v(t)$  dla różnych rodzajów ruchu.

### Jak sprawić, by uczniowie polubili fizykę?

Stanie się to wówczas, gdy zamiast trudnych i nieciekawych zadań nauczyciel wykona interesujące doświadczenia. Dodam, że w nauczaniu fizyki nie chodzi o poznanie i zapamiętanie iluś tam wzorów i definicji, ale o to, by ukształtować racjonalizm umożliwiający odróżnianie argumentów naukowych od fałszywych oraz prawdziwych informacji od bałamutnych. Wzory i regułki ulecą kiedyś z pamięci, ale racjonalizm ochroni od pseudonaukowych bzdur. Dla uczniów, którzy nie będą zawodowo zajmować się fizyką, nie jest ważne ćwiczenie sprawności w rozwiązywaniu skomplikowanych zadań rachunkowych, ale przekonanie, że **przyrodą rządzą nienaruszalne prawa, których nie da się obejść ani oszukać.**

Fizyka to nauka o przyrodzie; o całym otaczającym nas materialnym świecie od wnętrza atomu po krańce Wszechświata. Jest ona podstawową nauką przyrodniczą. Z jej dorobku korzystają takie nauki jak chemia, geografia, geologia, astronomia, nauki techniczne a nawet biologia i medycyna. Na styku tych nauk i fizyki powstały takie działy wiedzy jak chemia fizyczna, geofizyka, as-

trofizyka, biofizyka czy fizyka techniczna. Dzięki fizyce możemy korzystać z telewizora, magnetowidu, telefonu, komputera, ultrasonografu czy tomografu.

Fizyka to fascynująca nauka zaspokajająca naturalne pragnienia poznawcze człowieka. To właśnie fizyka pozwala poznać i zrozumieć otaczający nas świat materialny w całym jego bogactwie i pięknie; jest w tęczy, locie motyla, śpiewie ptaków. To ona pozwala nam widzieć i słyszeć piękny świat przyrody. Ona też stymuluje postęp naukowo-techniczny. Jest wspaniałym wytworem myśli i wyobraźni człowieka – jego intelektu. Fizyka jest też częścią naszej kultury rozumianej jako całokształt dorobku cywilizacyjnego człowieka.

Nie potrzeba jednak być fizykiem, by dostrzegać zjawiska fizyczne i zaspokajać naturalną ciekawość poznawczą. Wystarczy, że dyskusje, doświadczenia i pokazy<sup>1</sup> rozbudzą w nas ową ciekawość oraz ukształtują zdroworozsądkowe myślenie.

Celem nauki jest poszukiwanie prawdy o otaczającym nas świecie, a motorem działań jest owa poznawcza ciekawość. Warto w tym miejscu przytoczyć to, co powiedziała Wisława Szymborska, otrzymując w 1996 r. Nagrodę Nobla: „*U źródeł wiedzy są dwa małe słowa: »nie wiem«.* Gdyby Izaak Newton nie powiedział sobie »nie wiem«, jabłka w jego ogrodzie mogłyby spadać jak grad, a on w najlepszym razie schylałby się po nie i zjadał z apetytem. Gdyby Maria Skłodowska-Curie nie powiedziała sobie »nie wiem«, zostałyby pewnie nauczycielką chemii na pensji dla panienek z dobrych domów i na tej – skądinąd zacnej – pracy upłynęłoby jej życie. Ale ona powiedziała sobie »nie wiem«<sup>2</sup> i te właśnie słowa przywiodły ją, i to dwukrotnie do Sztokholmu, gdzie ludzi o duchu niespokojnym i wiecznie poszukującym nagradza się Nagrodą Nobla.”

Ucząc fizyki, dobrze jest też pokazać uczniom drogę, którą przed nami przeszli uczeni. Śledzimy wówczas bieg myśli naukowej oraz jej personalistyczny wymiar. Widząc zaś meandry postępu wiedzy, uczymy krytycyzmu i ostrożności w formułowaniu poglądów oraz konstruowaniu hipotez i teorii fizycznych. Świadoma obserwacja otaczającej nas rzeczywistości przyrodniczej uczy dostrzegania związków przyczynowo-skutkowych między zjawiskami oraz prawidłowego wnioskowania. Pobudzamy w ten sposób u uczniów ciekawość poznawczą, uczymy twórczo poznawać przyrodę i uodparniamy uczniów na atakujące ich pseudonaukowe poglądy. Staramy się w ten sposób tworzyć światłych i mądrych ludzi.

Naukę tworzy człowiek, ale i ona tworzy człowieka, gdyż rozwija jego intelekt i zdolności poznawcze, a jej uprawianie jest bliskie sztuce, która opiera się na obserwacji natury i jej twórczym przetwarzaniu. Natomiast brak wiedzy przyrodniczej może zepchnąć człowieka w pseudonaukowy surrealizm, w którym nie dostrzeżają się związków przyczynowo-skutkowych i nie wierzy

<sup>1</sup> Wielkim powodzeniem cieszy się Centrum nauki „Kopernik” w Warszawie, Park Doświadczeń w Krakowie oraz pikniki naukowe. Ale to za mało! Potrzebne są dobrze zaopatrzone i należycie wykorzystywane szkolne pracownie fizyczne, chemiczne i biologiczne!

<sup>2</sup> W przypadku Newtona słowa „nie wiem” dotyczyły pytania: „Jaki jest związek zjawiska swobodnego spadania ciała z ruchem orbitalnym Księżyca?” Natomiast w przypadku M. Skłodowskiej-Curie słowa „nie wiem” dotyczyły pytania: Dlaczego ruda uranu promieniuje silniej niż czysty uran?

w nienaruszalność praw fizycznych. Prowadzi to do rozwoju przesądów, okultyzmu, magii, astrologii, ezoterycznych praktyk, wiary w efekty paranormalne i wreszcie do zaniku krytycyzmu i racjonalności myślenia.

### Wróćmy do pojęć prawda i fałsz

„Mądrość mam od rzeczy, bo one nie kłamią” – twierdził Arystoteles i miał rację. Jeżeli bowiem chcemy badać przyrodę, to musimy założyć, że przyroda istnieje obiektywnie i jest poznawalna. Przyjmuje się więc, że realne są obiekty fizyczne, ich stany oraz relacje między nimi. Następnie należy stworzyć system opisujący tę rzeczywistość. System ten to zbiór wewnętrznie niesprzecznych i doświadczalnie weryfikowalnych pojęć i praw, opisujących właściwości ciał oraz zjawiska zachodzące w przyrodniczej rzeczywistości. Należy równocześnie założyć, że system ten wiernie opisuje tę rzeczywistość. Dotykamy w tym momencie problemu naukowej prawdy. Pierwszym pytaniem jest czy istnieje prawda obiektywna.

Nikt raczej nie wątpi w to, że istnieje Wszechświat, ale niektórzy filozofowie mają wątpliwości, czy nasze poznanie jest obiektywne. Twierdzą bowiem, że nasze zmysły mylą się, zatem wiedza dzięki nim zdobyta może budzić wątpliwości. To prawda, że osąd czy woda w jeziorze jest zimna, czy też ciepła, jest dość subiektywny, ale mamy przecież obiektywne metody ustalenia jej temperatury. Nie można też na przykład twierdzić, że fakt istnienia daltonizmu odbiera możliwość określania barw ciał, bo można te barwy związać z mierzalną wielkością, jaką jest częstotliwość fali światła.

Bezspornym dowodem na to, że rzeczywistość przyrodnicza jest taka jaką ją postrzegamy, jest fakt, iż organizmy reagują na bodźce otoczenia, dzięki czemu przystosowują się do warunków, w których żyją. Muszą więc odbierać prawdziwe bodźce, bo poprawnie na nie reagują. Jeżeli włożymy palec w płomień, to sparzemy się. Płomień jest więc rzeczywisty, a nie wymaginowany (istniejący tylko w naszej wyobraźni). Nauki przyrodnicze badają rzeczywiste, a nie wymaginowane cechy ciał i zjawisk.

Kolejnym potwierdzeniem prawdziwości wiedzy fizycznej jest fakt, że poprawnie funkcjonują urządzenia zbudowane na zasadach określonych przez fizykę. Trudno mówić o niepełnej prawdzie zawartej w tych prawach,

jeżeli potrafimy trafić w niewielką planetoidę odległą od nas o miliony kilometrów.

Należy zatem sądzić, że nauka poprawnie opisuje badaną rzeczywistość. Czy jednak znamy już całą prawdę o fizyczno-przyrodniczej rzeczywistości i czy to, co o niej wiemy, jest absolutną prawdą? Wszak historia nauk przyrodniczych dostarcza nam przykładów, gdy uczeni mylili się i późniejsze pokolenia weryfikowały to, co wówczas uważano za prawdę.<sup>3</sup>

Roger Penrose w dziele *Droga do rzeczywistości* napisał: „Wyprowa w świat nauki jest trudną ekspedycją. Trudności z nią związane były niejednokrotnie przyczyną błędzenia po manowcach. Stąd przestroga, by na tej drodze posuwać się ostrożnie.”<sup>4</sup> Mimo owej ostrożności zdarza się, że naukowcy popełniają błędy. Zwykle pomyłki te nie są zawinione i szybko są korygowane. Ale bywa i tak, że niektórzy świadomie mijają się z prawdą, a tworzone przez nich pseudoprawdy rozpowszechniane są przez środki masowego przekazu. Bywa więc, że dajemy im wiarę. A dzieje się to zwykle dlatego, że nie mamy dostatecznej wiedzy, by je odrzucić. Przyczyną tego może być również brak wyrobionego nawyku krytycznej oceny informacji. Cechę tę powinna między innymi kształcić szkoła. Podstawowym bowiem zadaniem nauczania powinno być kształtowanie postaw zdroworozsądkowych oraz umiejętności krytycznego analizowania problemów.

Waldemar Reñda  
Olkuś, styczeń 2023 r.

#### DLA OSÓB ZAINTERESOWANYCH TYMI PROBLEMAMI POLECAM:

- Goląb-Meyer Z., *O fałszerstwach i nadużyciach w naukach przyrodniczych*, Fizyka w Szkole, 2/1992.  
Heller M., *Filozofia przypadku*, Copernicus Center, Kraków 2017.  
Losse J., *Wprowadzenie do filozofii nauki*, Prószyński i S-ka, Warszawa 2001.  
Reñda W., *Manowce nauki*, Fizyka w Szkole, 4/2007.  
Reñda W., *Sceptyk w sprawie futurologicznych poglądów S. Hawkinga*, Fizyka w Szkole, 4/2008.  
Reñda W., *Etyka a nauki przyrodnicze*, Fizyka w Szkole, 4/2014.  
Reñda W., *Dydaktyczne funkcje literatury popularnonaukowej*, Fizyka w Szkole, 6/2014.  
Reñda W., *Fizyka a filozofia – szkic do problemu*, Fizyka w Szkole, 4/2017.  
Reñda W., *Prawa fizyki a filozofia – szkic do problemu*, Fizyka w Szkole, nr 6/2021.  
Hy Ruchlis, *Skąd wiesz, że to prawda*, Prószyński i S-ka, Warszawa 1998.  
Sokal A., J. Bricmont, *Modne bzdury*, Prószyński i S-ka, Warszawa.  
Tatarkiewicz W., *Historia filozofii*, PWN, Warszawa 1997.  
Tempczyk M., *Fizyka a świat realny. Elementy filozofii fizyki*, PWN, W-a 1986.  
Wróblewski A. K., *Prawda i mity w fizyce*, Iskry, Warszawa 1987.

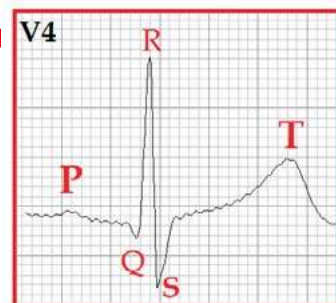
<sup>3</sup> Owe pomyłki były powszechne w czasach, gdy fizyka była nauką spekulatywną.

<sup>4</sup> R. Penrose, *Droga do rzeczywistości, Wyczerpujący Przewodnik po prawach rządzących Wszechświatem*, tł. J. Przystawa, wydawnictwo Prószyński i S-ka, Warszawa 2009

### W następnych wydaniach polecamy m.in.

#### • Fizyka u kardiologa

Wizytę u kardiologa zapewne niewielu z nas łączy z fizyką. Praca lekarza specjalisty, który zajmuje się chorobami układu sercowo-naczyniowego, kojarzy się bowiem przede wszystkim z ordynowaniem specjalistycznych leków. Nie należy jednak zapominać, że do wykrywania i leczenia schorzeń kardiologicznych współcześnie wykorzystywana jest skomplikowana aparatura medyczna a sam opis funkcjonowania układu krwionośnego łączy w sobie aspekty elektryczne, mechaniczne, termodynamiczne oraz hydrauliczne.



# Współczesne zagrożenia a nauczanie fizyki

Arleta Biegańska

Od pewnego czasu obserwuje się wzrost tendencji do pouczania społeczeństwa m.in. za pośrednictwem mediów publicznych, w tym radia i telewizji. Za pomocą różnych spotów instruowani jesteśmy w zakresie dbania o zdrowie (kampania „Planuję długie życie”), ochrony środowiska (kampania „Nasz klimat”), oszczędzania energii, bezpieczeństwa na drogach i inne. Przyznaję, że czuję pewien dyskomfort uświadamiając sobie jak nisko ocenia się poziom intelektualny społeczeństwa, a te kampanie to próba jego doksztalcenia. Jaki jest powód tak niskiej oceny? Może rzeczywiście mamy braki w zakresie podstawowej wiedzy z różnych dziedzin? Podstawowych, a więc wyniesionych ze szkoły podstawowej. Przeanalizuję niektóre zagadnienia z zakresu fizyki.

## Fizyka jądrowa

„Mamo, tato dostałem szóstkę za mój projekt elektrowni atomowej” tak zaczyna się jeden ze spotów z cyklu „Poznaj Atomickich. Z energią jądrową na co dzień”. Jest to kampania Ministerstwa Klimatu i Środowiska dotycząca energii jądrowej w Polsce<sup>1</sup>. Kampania ta ruszyła w październiku 2022 r., a jej celem jest podniesienie świadomości społeczeństwa na temat energetyki jądrowej oraz zbudowanie stabilnego oraz świadomego poziomu akceptacji społecznej dla energetyki jądrowej<sup>2</sup>.

W ramach tej kampanii w popularnych serialach telewizyjnych „przemycane” są wiadomości dotyczące np. zastosowania izotopów promieniotwórczych w medycynie. Jak podaje komunikat z 20 grudnia 2022 r. po tej kampanii aż do 88% wzrosła liczba Polaków akceptujących budowę elektrowni jądrowej w Polsce<sup>3</sup>. Badania przeprowadzono na reprezentatywnej grupie 2000 Polaków w wieku 15-75 lat. Jaki procent odpowiadających respondentów zamieszkuje tereny, na których przewiduje się budowę elektrowni atomowych?

Na stronie Polski Atom znajdziemy cykl filmów dedykowanych dzieciom „Neutronek w elektrowni jądrowej”. Zamieszczono tam również wiele materiałów dla nauczycieli. Znajdziemy tu również informację o realizacji projektu pn. „Jak uczyć o energii jądrowej”, który realizowany jest od 2015 r.

Szkolenia adresowane są do nauczycieli i doradców metodycznych ds. nauczania, m.in. fizyki, chemii, geo-

grafii, przyrody i edukacji dla bezpieczeństwa w szkołach podstawowych i ponadpodstawowych. Projekt ma charakter ogólnopolski. Jak czytamy na oficjalnej stronie „Jego celem jest wyposażenie uczestników w wiedzę z zakresu energii i energetyki jądrowej oraz wzbogacenie ich kompetencji metodycznych, niezbędnych do efektywnej realizacji treści programowych związanych z energią i energetyką jądrową na lekcjach w szkołach podstawowych i ponadpodstawowych”<sup>4</sup>. Ministerstwo Klimatu i Środowiska zorganizowało pierwsze pilotażowe szkolenie o energii (w tym jądrowej) dla nauczycieli edukacji przedszkolnej. Szkolenia będą kontynuowane w 2023 r.<sup>5</sup>

Skąd takie zainteresowanie nauczaniem o energii i promieniowaniu jądrowym? Dostrzegam tu pewną niekonsekwencję. Pozwalam sobie przypomnieć, że z zakresu fizyki jądrowej w programie dawnej szkoły podstawowej z 1990 r. uwzględniono następujące zagadnienia: „Budowa atomu i jądra atomowego. Protony i neutrony. Energia wiązania jądra nietrwałe, rozpad promieniotwórczy. Rozszczepienie jądra, energia jądrowa. Szkodliwość promieniowania jądrowego i ochrona przed promieniowaniem”<sup>6</sup>.

Podobnie w pkt 13 treści nauczania programu fizyki dla gimnazjum z 2002 r. znajdujemy zagadnienia dotyczące fizyki jądrowej<sup>7</sup>. Są to następujące tematy: „Budowa atomu. Energia jądrowa. Promieniowanie jądrowe”. Również w pkt 2 treści programowych chemii uwzględniono następujące zagadnienia: „Budowa atomu: jądro i elektrony, składniki jądra, izotopy. Promieniotwórczość i jej różnorodne konsekwencje. Atomy, jony i cząsteczki, pierwiastki



Neutronek w elektrowni jądrowej – <https://www.facebook.com/polskiatom.gov.pl/videos/neutronek-w-elektrowni-j%C4%85drowej-odcinek-6-sterownia/575573166294521/>

<sup>1</sup> Cykl „Poznaj Atomickich” Materiały video – Polski Atom – Portal Gov.pl (www.gov.pl)

<sup>2</sup> Poznaj Atomickich – Polski Atom – Portal Gov.pl (www.gov.pl)

<sup>3</sup> <https://www.gov.pl/web/polski-atom/po-kampanii-poznaj-atomickich-88-polakow-za-budowa-elektrowni-jadrowych2> z dnia 22. 12. 2022

<sup>4</sup> Informacja o szkoleniach dla nauczycieli i doradców metodycznych pn. „Jak uczyć o energii jądrowej” – Polski Atom – Portal Gov.pl (www.gov.pl)

<sup>5</sup> Pilotażowe szkolenie o energii jądrowej dla nauczycieli przedszkolnych – Polski Atom – Portal Gov.pl (www.gov.pl)

<sup>6</sup> Program zatwierdzony do realizacji w kl. IV-VIII szkoły podstawowej od roku szkolnego 1990/01 zarządzeniem MEN nr 1 z 15.01.1990 r. (Dz. Urz. MEN nr 1 z 1990 r. poz. 1 Nr programu DKO1-4014-21/90)

<sup>7</sup> Rozporządzenie MENiS z dnia 26 lutego 2002 r. w sprawie podstawy programowej wychowania przedszkolnego oraz kształcenia ogólnego w poszczególnych typach szkół załącznik nr 2 gimnazjum fizyka (Dz. U. Nr 51, poz. 458)



Poznaj Atomickich – <https://www.gov.pl/web/polski-atom/materialy-dla-dziennikarzy>

i związki chemiczne, symbole chemiczne, wartościowość pierwiastków. Wiązania chemiczne – jonowe i atomowe”<sup>8</sup>. Wylimitowanie z treści programowych gimnazjum elementów fizyki jądrowej nastąpiło wraz ze zmianą rozporządzenia o podstawach programowych w 2008 r.<sup>9</sup>

Co było przyczyną zrezygnowania z nauczania o promieniotwórczości i energetyce jądrowej na poziomie gimnazjum? Czy uznano te treści programowe za zbędne, może za trudne? Za trudne chyba nie, skoro możliwe jest opracowanie sposobów kształcenia w tym zakresie już na poziomie przedszkola. Może jednak wykreślenie z programu nauczania fizyki jądrowej to był błąd, skoro dzisiaj dostrzegamy pilną potrzebę doksztalcenia społeczeństwa w tym zakresie?

Osobiście krytycznie oceniam kampanię „Poznaj Atomickich”. Autorzy chyba nie zdają sobie sprawy z realiów w polskich szkołach. W publicznych szkołach podstawowych jest mało prawdopodobne, aby realizowano projekt edukacyjny dotyczący budowy modelu elektrowni atomowej w ogóle, a tym bardziej na poziomie klas V- VI. Tego typu zagadnień nie uwzględnia się w programach nauczania obecnej szkoły podstawowej. Ponadto nauczanie metodą projektu edukacyjnego nie jest dość rozpowszechnione w szkołach podstawowych, choćby ze względu na ograniczenia czasowe<sup>10</sup>.

## Oszczędzanie energii

Inną społeczną kampanią jest kampania „Oszczędzamy energię”<sup>11</sup>. Na rządowej stronie znajdziemy wiele materiałów dydaktycznych adresowanych do różnych odbiorców. Polska Grupa Energetyczna promuje efektywne sposoby korzystania z energii elektrycznej poprzez spoty zamieszczane zarówno w telewizji jak i w radiu<sup>12</sup>. Wątki dydaktyczne również pojawiają się w serialach filmowych. W najbardziej popularnym polskim szpitalu dyrektorka zarządziła wymianę żarówek na energooszczędne. Pielęg-

niarka jest zafascynowana działaniem czujników ruchu na szpitalnych korytarzach, które automatycznie włączają i wyłączają światło.

Celem tych kampanii jest podniesienie poziomu wiedzy społeczeństwa na temat źródeł energii elektrycznej oraz sposobu jej oszczędzania na poziomie gospodarstw domowych. Materiały informacyjne, które znajdują się na stronie Ministerstwa Klimatu i Środowiska mogą być wsparciem dla nauczycieli i mogą być wykorzystywane jako pomoc dydaktyczna.

Realizuję od wielu lat projekt „Energetyczne śledztwo”<sup>13</sup>. W tym roku ten projekt okazał się wyjątkowo adekwatny do obecnej sytuacji. Z drugiej strony ujawnił, że młodzież, a nawet ich rodzice mają kłopoty z odczytywaniem wskazań zużycia energii elektrycznej, z interpretowaniem informacji zawartych na rachunkach za energię elektryczną. Z drugiej strony uczniowie planując sposoby oszczędzania energii korzystali z materiałów prezentowanych w ramach tej kampanii za pośrednictwem telewizji czy wprost na przywołanych stronach internetowych.

## Obecna sytuacja gospodarcza

Zintensyfikowanie działań ukierunkowanych na podniesienie w społeczeństwie poziomu wiedzy o energii, w tym o energii jądrowej, zostało spowodowane ostatnimi wydarzeniami. Od momentu napaści Rosji na Ukrainę cały świat żyje w niepokoju. Obawie przed rozprzestrzenianiem się konfliktu zbrojnego towarzyszy strach przed przerwami w dostawach energii elektrycznej. W Polsce pojawiły się trudności z zakupem węgla, wzrosły ceny węgla, paliw i energii elektrycznej. W związku z tym rośnie zainteresowanie alternatywnymi źródłami energii. Boimy się również skażenia radioaktywnego w razie zaatakowania elektrowni jądrowych.

Jak na ironię w momencie pojawienia się kryzysu energetycznego rozpoczął się proces odchodzenia od

<sup>8</sup> tamże

<sup>9</sup> Rozporządzenie MEN z dnia 23 grudnia 2008 r. w sprawie podstawy programowej wychowania przedszkolnego oraz kształcenia ogólnego w poszczególnych typach szkół (Dz. U. z 2009 r. Nr 4, poz. 17)

<sup>10</sup> A. Biegańska „Projekt edukacyjny w szkole podstawowej” Fizyka w Szkole z Astronomią nr 5/2022 s.44

<sup>11</sup> Oszczędzamy Energię – Edukacja Ekologiczna – Portal Gov.pl ([www.gov.pl](http://www.gov.pl))

<sup>12</sup> Mądrze korzystaj z energii – YouTube

<sup>13</sup> A. Biegańska „Projekt edukacyjny w szkole podstawowej”, Fizyka w Szkole z Astronomią nr 5/2022 s.44

elektrowni węglowych. Mieszkańcy Turku i okolicy byli naoczniymi świadkami wyburzania elektrowni opalanej węglem brunatnym w Adamowie k. Turku. Kopalnia węgla brunatnego „Adamów” została zamknięta wcześniej. Czy jako społeczeństwo jesteśmy przygotowani do tych zmian, czy rozumiemy konieczność zmiany źródeł energii na bardziej ekologiczne oraz niezależniące od dostaw z Rosji, czy potrafimy funkcjonować w nowych warunkach? Chyba jednak nie. Świadczy o tym wzrost niepokoju i obaw w społecznościach w pobliżu miejsc, gdzie planowana jest budowa elektrowni jądrowych.

### Nauczanie fizyki w zreformowanej szkole a analfabetyzm fizyczny

Czy kampanie informacyjne zniwelują skutki postępującego analfabetyzmu fizycznego?

O społecznych kosztach kolejnych reform systemu edukacji w 1999 r., skutkującą m.in. redukcją godzin przeznaczonych na fizykę dyskutowano podczas XLI Zjazdu Fizyków Polskich w 2011 r. Już wtedy zwrócono uwagę na to, że reforma systemu edukacji zamiast zmodernizować proces nauczania, skutkuje brakami w wiedzy potrzebnej w dalszym życiu i pracy zawodowej. „Redukcja nauczania fizyki jest źródłem postępującego analfabetyzmu fizycznego.”<sup>14</sup> O skutkach reformy z 2019 r. i postępującego analfabetyzmu fizycznego pisałam w 2019 roku.<sup>15</sup> Zwróciłam wtedy uwagę m.in. na problem niskiej świadomości szkodliwości nadmiaru promieniowania ultrafioletowego.

Każda kolejna reforma systemu edukacji wiązała się z ograniczeniem godzin na realizację matematyki i przedmiotów przyrodniczych. Nie miejsce na analizowanie i przyczyn i zakresu tych zmian. W przypadku fizyki w szkole podstawowej liczba godzin w cyklu kształcenia zmalała z ośmiu godzin tygodniowo realizowanych w latach osiemdziesiątych ubiegłego stulecia do 4 godzin obecnie. Ta sytuacja wymusiła stopniowe, ale znaczne ograniczanie zakresu wiadomości i umiejętności. Podobne zmiany na niekorzyść odnotowujemy w zakresie nauczania matematyki czy chemii.

Nie trzeba chyba przekonywać, że w obecnej sytuacji elementarna wiedza ogólna o energii czy z zakresu promieniotwórczości, byłaby bardzo pożądana.

Ograniczając liczbę godzin na kształcenie przyrodnicze zapomniano chyba o tym, że celem kształcenia ogólnego w szkole podstawowej jest m.in:

„7) rozbudzanie ciekawości poznawczej uczniów oraz motywacji do nauki;

8) wyposażenie uczniów w taki zasób wiadomości oraz kształtowanie takich umiejętności, które pozwalają w sposób bardziej dojrzały i uporządkowany zrozumieć świat”<sup>16</sup>

Czy te cele są realizowane? Chyba nie i chyba problem niskiego poziomu wiedzy ogólnospołecznej dostrzeżono w poszczególnych ministerstwach i stąd wynika zinten-



Oszczędzamy energię – <https://www.gov.pl/web/edukacja-ekologiczna/materialy>

syfikowanie działań informacyjnych. Pytanie tylko czy kampanie społeczne będą w stanie zniwelować skutki tych wieloletnich zaniedbań?

Realizacji przywołanych celów nauczania nie sprzyja również obecna sytuacja kadrowa. Niestety, zgodnie z przewidywaniem pogłębia się kryzys kadrowy w szkołach. Brakuje wykształconych nauczycieli przedmiotów przyrodniczych, zarówno w miastach jak i na wsi. Lekcje fizyki to najczęściej opowiadanie o fizyce. Opowiadanie o fizyce z pominięciem doświadczeń. Doświadczeń, których nie można przeprowadzać nie tylko z powodu braku pomocy dydaktycznych, ale przede wszystkim z powodu braku czasu.

Zgodnie z planami nauczania na przemiany energii w zjawiskach topnienia i parowania możemy przeznaczyć 2 godziny. W dawnej szkole podstawowej były to 3-4 godziny. Z powodu braku czasu należy bardzo ograniczyć nauczanie metodą ćwiczeń uczniowskich, która jest najbardziej atrakcyjna z punktu widzenia ucznia. Fizyka nadal jest postrzegana jako przedmiot trudny. Podobnie jest z realizacją zadań związanych z nauczaniem chemii, że o matematyce nie wspomnę.

W szkołach podstawowych zmianie powinny ulec nie tylko programy nauczania, ale przede wszystkim plany nauczania. W obecnej sytuacji nie można liczyć na zwiększenia tygodniowego wymiaru godzin nauczania z żadnego przedmiotu. Uczniowie klasy VII i VIII mają po 35 godzin lekcyjnych tygodniowo, a więc po 7 lekcji dziennie. W klasie siódmej zdarza się, że zajęcia kończą się po ósmej godzinie lekcyjnej. Nie można się dziwić, że nie ma chętnych do uczestniczenia w zajęciach dodatkowych. Kolejne zajęcia czy to wyrównawcze czy koła

<sup>14</sup> E. Pietras, E. Rydygier, „Społeczne koszty reformy systemu edukacji”, *Fizyka w Szkole* nr 2/2012 s. 51

<sup>15</sup> A. Biegańska „Społeczne koszty reformy na bis”, *Fizyka w Szkole z Astronomią* nr 6/2019 s. 24

<sup>16</sup> Rozporządzenie MEN 14 lutego 2017 r. w sprawie podstawy programowej wychowania przedszkolnego oraz podstawy programowej kształcenia ogólnego dla szkoły podstawowej, (...) Dz. U. poz. 356, ze zmianami Załącznik nr 2 Podstawa programowa kształcenia ogólnego dla szkoły podstawowej.

zainteresowań są w tej sytuacji nadmiernym obciążeniem. Co jest tego przyczyną?

Jednym z powodów jest wprowadzenie dodatkowych przedmiotów takich jak doradztwo zawodowe, wychowanie do życia w rodzinie czy edukacja dla bezpieczeństwa. Wprowadzenie dodatkowych przedmiotów jest niezgodne z nauczaniem holistycznym, Istotą nauczania i uczenia się holistycznego jest całościowe podejście do omawianego zagadnienia. Na lekcjach powinno się łączyć informacje z różnych przedmiotów. Idea nauczania holistycznego nie jest niczym nowym i wywodzi się z początków ubiegłego wieku<sup>17</sup>.

Od dawna krytykuje się dzielenie rzeczywistości, która otacza ucznia na „przedmiotowe kawałki”. Reformatorzy oświaty wbrew temu nadal „tworzą” nowe przedmioty. Treści zawarte w zakresie edukacji dla bezpieczeństwa były i są realizowane m.in. na fizyce, technice, chemii i innych lekcjach. Podobnie jest z treściami dotyczącymi wychowania do życia w rodzinie czy doradztwem zawodowym. Sposoby realizacji doradztwa zawodowego na fizyce przedstawione w moim artykule<sup>18</sup> można z powodzeniem stosować na innych przedmiotach.

Za koniecznością zmiany planów nauczania przemawiają zmieniające się warunki życia. Czy naprawdę konieczny jest taki duży wymiar obowiązkowych zajęć z wychowania fizycznego? Aktualnie wiele dzieci korzysta w godzinach

popołudniowych z innych form aktywności jak nauka tańca, pływanie, jeździectwo, które z różnych powodów nie mogą być realizowane w szkołach. Na wsiach i w miastach powstało wiele boisk typu „Orlik” i to tam w godzinach popołudniowych uczniowie trenują pod okiem specjalistów wybranej dziedziny piłkę nożną, grę w tenisa, siatkówkę i inne. Może warto wrócić do koncepcji 2 godziny obowiązkowych zajęć i 2 dodatkowych dla chętnych.

Gdy wprowadzano do planów nauczania informatykę dzieci nie miały w domach komputerów. Jedyny kontakt z komputerami był w szkolnej pracowni. Obecnie dzieci od przedszkolaka mają kontakt ze smartfonami, tabletami itp. Przychodzą do szkoły oswojeni z tym sprzętem. Czy nie pora, aby zmienić zakres nauczania informatyki?

Dyskusyjna, nawet wśród niektórych przedstawicieli kościołów, jest obecna liczba godzin przeznaczonych na nauczanie religii. Może zmniejszenie wymiaru religii do 1 godziny tygodniowo zahamuje rezygnację uczniów z uczestniczenia w tych zajęciach?

Dokształcanie społeczeństwa poprzez kampanie społeczne na pewno nie wystarczy. Pora na przemyślaną zmianę programów i planów nauczania, która uwzględni rzeczywiste potrzeby społeczne i warunki, w których funkcjonujemy. Pora zadbać o edukację w zakresie podstawowym, dostosowanym do zmieniających się warunków życia.

<sup>17</sup> John Dewey, „Moje pedagogiczne credo” (Wydawnictwo Akademickie „Żak”, Warszawa 2005)

<sup>18</sup> Arleta Biegańska „Doradztwo zawodowe na lekcjach fizyki” Fizyka w Szkole z Astronomią nr3/2022, s. 3

## Jak młodzi ludzie postrzegają fizykę?

Ewelina Kędzierska

Niechęć do fizyki w naszym społeczeństwie budowana jest od najmłodszych lat. Gdy zapytamy uczniów klas siódmych na pierwszej lekcji, czym dla nich jest fizyka, pojawiają się różne głosy. Dzieci, które miały możliwości brania udziału w zajęciach i festiwalach będą z fascynacją w głosie opowiadać o przeprowadzanych tam doświadczeniach. Jednak w grupie niemalże zawsze usłyszymy wypowiedź mówiącą o tym, że jest to coś trudnego, niezrozumiałego, coś, czego nauki nie warto się podejmować, bo i tak nie przyniesie to pozytywnych rezultatów.

Skąd takie przekonanie? Przyczyn jest wiele, ale przyjrzyjmy się kilku z nich. Po pierwsze różnorodność środowiska, które przychodzi nam uczyć. Po drugie, nastawienie rodziców, na które często wpływa ich poziom edukacji oraz najbliższe otoczenie. Trzecią sprawą jest ogólne podejście społeczeństwa do przedmiotów matematyczno-przyrodniczych. Kiedy dziecko widzi w Internecie obrazki

mówiące negatywnie o fizyce, a na okładce zeszytu przedmiotowego znajduje informację, że i tak tego przedmiotu nie zrozumie, jego motywacja drastycznie spada [Rys. 1]. Do tego dochodzą braki kadrowe i nieprawidłowe przygotowanie nauczycieli na studiach podyplomowych (będących niejednokrotnie jedynie formalnością) czy podejście rządzących do problemu edukacji.

Kolejną przyczyną jest brak umiejętności mówienia o nauce w sposób zrozumiały dla przeciętnego obywatela. Często – nawet nie zdając sobie sprawy – opowiadając o prawach fizyki używamy niezrozumiałego języka. Omawiając elektrostatykę dokonujemy superpozycji pól, a przy optyce pojawia się w naszych wypowiedziach infinitezymalna apertura. Na twarzach uczniów rysuje się wówczas zwątpienie i przerażenie. Czy o to w tym wszystkim chodzi?

W wielu szkołach w samej Warszawie nie ma nauczycieli. W czerwcu 2022 mówiono o 3,2 tysiącach wakatów<sup>1</sup>, a w październiku o 2,9 tys.<sup>2</sup> Braki dotyczyły przede wszystkim nauczycieli matematyki i fizyki w szkołach

<sup>1</sup> Brakuje nauczycieli w Warszawie, najbardziej na Woli. Najnowsze dane o wakatach są zatrważające [on-line:] <https://warszawa.wyborcza.pl/warszawa/7,54420,28547882,brak-nauczycieli-w-warszawie-mamy-oficjalne-dane-o-wakatach.html> [dostęp: 21.02.2023]

<sup>2</sup> Nauczycieli w Warszawie coraz bardziej brak. Nowy, dramatyczny rekord wakatów [on-line:] [https://warszawa.wyborcza.pl/warszawa/7,54420,2898880,0,nauczycieli-w-warszawie-coraz-bardziej-brak-wrzesien-z-nowym.html?fbclid=IwAR226izaVcY7QC6Pfo7p0iSE1ktRkNOCdtFrF\\_yJfw5\\_Rj6-16FaY-s324U](https://warszawa.wyborcza.pl/warszawa/7,54420,2898880,0,nauczycieli-w-warszawie-coraz-bardziej-brak-wrzesien-z-nowym.html?fbclid=IwAR226izaVcY7QC6Pfo7p0iSE1ktRkNOCdtFrF_yJfw5_Rj6-16FaY-s324U) [dostęp: 21.02.2023]

państwowych. Jak wygląda to dziś? Trudno powiedzieć. Ogłoszenia pojawiające się na stronie Mazowieckiego Banku Ofert Pracy po miesiącu znikają i nie są na bieżąco aktualizowane, a licznik, który się tam znajdował – zniknął.

Dyrektorzy, często postawieni pod ścianą, proszą o prowadzenie zajęć z fizyki specjalistów innych profesji – przede wszystkim matematyków, a w skrajnych sytuacjach – nawet polonistów czy nauczycieli wychowania fizycznego. Takie zajęcia kończą się po prostu dodatkową godziną przedmiotu prowadzącego przez daną osobę bądź oglądaniem filmów powszechnie dostępnych w Internecie (które nie zawsze są merytorycznie poprawne). A fizyki jak nie było, tak nie ma – chociaż w dzienniku realizacja podstawy programowej jest odhaczona.

Dodatkowo, czasem zatrudnia się osoby, które z młodymi nie powinny w ogóle pracować. Skutki tego problemu zaczynamy odczuwać wszyscy – uczniowie przechodzący do szkół ponadpodstawowych w większości nie mają pojęcia o podstawach fizyki, a na powtarzanie materiału z dwóch poprzednich klas po prostu nie ma czasu. Piętrzą się zaległości, wzrasta zniechęcenie młodych ludzi do tego przedmiotu, a co za tym idzie – coraz mniej z nich decyduje się na wybranie fizyki jako kierunku studiów. I koło się zamyka – coraz mniej studentów, coraz starsi nauczyciele, niskie zarobki i coraz więcej wakatów...

Wspomniano już, jak jest w szkołach podstawowych, a co ze starszymi uczniami? Jak po dwóch latach zmieniło się ich podejście do przedmiotu? Na początku września zadano w jednym z warszawskich liceów uczniom klas pierwszych rozpoczynających naukę fizyki na poziomie podstawowym pytanie, jak kojarzy im się ta dziedzina wiedzy? To, co napisali było wręcz zatrważające. A na sześćdziesiąt przepytanych osób aż dwie (!) odpowiedzi były pozytywne.

Ważne jest, byśmy my – fizycy, zapoznali się z odpowiedziami młodzieży i wyciągnęli z nich konstruktywne

wnioski. Z tego też względu – poniżej zostaną przytoczone wybrane opinie w sposób dosłowny. Celowo, nie będą przeplatane komentarzami autorki artykułu, by każdy z czytających mógł wyciągnąć z nich coś własnego:

- *Zazwyczaj fizyka jest kojarzona z nudą, szkołą i jednokami w dziennikach. Niestety, według mnie to się nigdy nie zmieni między innymi przez nasz polski system edukacji.*
- *Młodym ludziom fizyka kojarzy się z czymś nierealnym – trudnymi zagadnieniami, zawiłymi wzorami oraz laboratoriami (...) nudne, nieciekawe lekcje niemające wpływu na codzienne życie.*
- *Z czym kojarzy się fizyka? Z czarną magią, z cierpieniem, ze słabymi ocenami i nudą.*
- *Zapytałem 10 osób z mojej klasy, jakie mają podejście do fizyki. Tylko jedna odpowiedź była pozytywna – wszyscy przyznali, że fizyka jest trudna i kojarzy się przede wszystkim z ciężkimi do nauczania wzorami.*
- *Wielu młodych ludzi ma złe podejście do fizyki, gdyż często w szkołach nauczyciele do niej, nieświadomie, zniechęcają. Zamiast wytłumaczyć prostym językiem, komplikują, używając podręcznikowych definicji.*
- *Większość młodych ludzi twierdzi, że fizyka nigdy nie będzie dla nich użyteczna.*
- *W szkole podstawowej fizyka była głównie uczeniem się definicji wzorów, nie było wielu doświadczeń. (...) Łatwiej byłoby zrozumieć materiał, jeśli byłby on przedstawiony w praktyce czy na przykładach z życia codziennego.*
- *Fizyki nie miałem przez 3/4 siódmej i ósmej klasy. Fizyki nie rozumiem, bo nie miał kto mnie jej nauczyć...*
- *Uważam, że fizyka to bardzo ciekawy przedmiot, lecz zarazem trudny. Przez jeden rok praktycznie nie miałem fizyki. Za to drugi rok był świetny – naszym nauczycielem był student, który był bardzo miły i świetnie uczył.*
- *Dlaczego młodzi ludzie boją się fizyki? Może mieli słabego nauczyciela w przyszłości albo przerasta ich wielkość tego przedmiotu*
- *Fizyka byłaby ok, ale moja nauczycielka nie umiała uczyć.*
- *Fizykę samą w sobie lubię, ponieważ wydaje się interesująca. Jedynym problemem w siódmej i ósmej klasie był mój nauczyciel, który się szybko denerwował i nie potrafił uczyć.*
- *Nie jestem fanem nauki, jednak moim zdaniem fizyka jest łatwa i ciekawa.*
- *Fizyka to na pewno bardziej przydatny przedmiot niż język polski itp. Odpowiada na wiele pytań dotyczących naszego otoczenia.*

Co my możemy z tym zrobić? Przecież – nawet gdybyśmy chcieli – nie zapełnimy dobrymi chęciami tylu wakatów. Z tego też względu – bardzo ważne są inicjatywy podejmowane przez uczelnie, jednak one trafiają przede wszystkim do szkół, w których nauczyciele są lub do dzieci, których rodzice przyprowadzają na dodatkowe, często popołudniowe lub sobotnie zajęcia. A co z pozostałymi?



Rys. 1. Okładki zeszytów przedmiotowych dostępne na rynku. Fotografia własna.

# Magazyny ciepła

## nowym trendem w przechowywaniu energii

**Nowym trendem w przechowywaniu energii pozyskanej z odnawialnych źródeł – farm fotowoltaicznych czy turbin wiatrowych – są magazyny ciepła. Mogą być alternatywą dla baterii litowo-jonowych – dodała.**

Od początków energetyki, pod koniec XIX w., jednym z kluczowych problemów był sposób magazynowania wyprodukowanej elektryczności. Do naszych czasów naukowcy pracują nad tym zagadnieniem i opracowują na potrzeby przemysłu nowe rozwiązania.

„Magazynowanie energii jest szczególnie ważne w czasach, w których stawiamy na odnawialne źródła energii (OZE)” – powiedziała PAP wiceprezes PAN prof. Natalia Sobczak, która kieruje Pracownią Teorii Procesów Metalurgicznych w Instytucie Metalurgii i Inżynierii Materiałowej PAN.

Siłownie korzystające z energii Słońca i wiatru czasem produkują nadwyżki energii, dlatego ważne jest jej przechowywanie, aby była dostępna na przykład wtedy, gdy nie wieje wiatr lub z powodu zachmurzenia mało jest promieni słonecznych.

Ekspertka przypominała, że w ostatnich latach naukowcy postawili na rozwój magazynów energii, bazujących na bateriach litowo-jonowych, co potwierdza Nagroda Nobla w 2019 r. dla Johna B. Goodenougha, M. Stanleya Whittinghama i Akiry Yoshino czy za opracowanie lekkich i pojemnych akumulatorów litowo-jonowych.

Do produkcji baterii litowo-jonowych niezbędne są lit i kobalt. Analitycy szacują, że do 2050 r. 27 krajów UE będzie potrzebować około 60 razy więcej litu i 15 razy więcej kobaltu do akumulatorów samochodów elektrycznych i do magazynowania energii.

„Zasoby światowe tych surowców są ograniczone i trudno dostępne, a stosowane technologie ich wydobywania przyczyniają się do dewastacji środowiska. Dlatego poszukujemy alternatyw, a jednym z perspektywicznych rozwiązań jest magazynowanie energii ciepła z wykorzystaniem materiałów zmiennofazowych PCM (phase change materials)” – podkreśliła prof. Sobczak.

Ekspertka uczestniczyła w projekcie AMADEUS, który otrzymał finansowanie w programie ramowym Unii Europejskiej Horyzont 2020 – w konkursie FET Open. Celem było opracowanie koncepcji nowej generacji magazynów energii, wykorzystujących ciepło utajone materiałów PCM. Zatem zasada ich działania byłaby zupełnie inna niż baterii litowo-jonowych.

Jak taki magazyn energii działa? Instalacja fotowoltaiczna zmienia energię słoneczną na elektryczną. Ta z kolei jest konwertowana na energię cieplną PCM poprzez jego nagrzewanie i topienie. I w ten sposób energia ciepła utajonego PCM byłaby przechowywana w magazynach przydo-



mowych lub na wielką skalę. W godzinach nocnych lub przy pochmurnej pogodzie, kiedy temperatura PCM spada i dochodzi do jego krzepnięcia, uwalnia się energia ciepła utajonego, która z kolei jest ponownie konwertowana na energię elektryczną do wykorzystania poza godzinami szczytu.

W projekcie AMADEUS prof. Sobczak kierowała zespołem kilku jednostek naukowych. Jego zadaniem było opracowanie nowej generacji materiałów PCM o wysokiej efektywności energetycznej. Badania wykazały, że dobrze sprawdzają się zawierające bor i żelazo stopy o podstawie krzemu.

Badaczka zwróciła uwagę na to, że najskuteczniejsze jest przechowywanie energii w bardzo wysokiej temperaturze, przy wykorzystaniu materiałów o temperaturze topnienia nawet powyżej 1000 st. C.

„Rodzi to jednak problemy, bo taki magazyn energii pracuje w warunkach cyklicznej zmiany temperatury (grzanie-chłodzenie w cyklu dzień-noc), a podczas przemian fazowych stopy zmieniają objętość. Krzem zachowuje się jak woda, która zwiększa objętość podczas przejścia w stan stały, a podczas topnienia jej objętość maleje. Ale także temu wyzwaniu udaje się nam sprostać dzięki wykorzystaniu osiągnięć inżynierii ciekłego metalu” – zapewniła.

Poza tym urządzenie musi być zrobione z takich materiałów, aby można je było bezpiecznie umieścić np. w domu. Prototypy takich urządzeń – dodała ekspertka – już powstają. Nie zajmują dużo miejsca, więc instalacja nie powinna być uciążliwa. Docelowo jednak planowane jest stworzenie dużych magazynów przemysłowych.

„Opracowanie materiałów i urządzeń do magazynowania i przetwarzania energii w bardzo wysokiej temperaturze to nowy kierunek, które jest intensywnie rozwijany w różnych krajach. Stwarza to szansę na zwiększenie efektywności energetycznej” – powiedziała.

Według Sobczak należy rozwijać różne rodzaje magazynów energii, bo nie każde z rozwiązań sprawdza się w każdych warunkach.

„Dlatego trudno jednoznacznie powiedzieć, która z technologii zdominuje rynek. Ale na pewno będą to rozwiązania i instalacje hybrydowe pozwalające na szerokie i efektywne zastosowanie OZE” – podkreśliła prof. Sobczak.

(PAP) Nauka w Polsce, Szymon Zdziełkowski

# Niezwykła, pionierska, wynalazczyni i badaczka Hertha Ayrton

## w 100-lecie śmierci

Przełom XX wieku to ogromne postępy w inżynierii, automatyzacji i produkcji. To era, która dała nam technologie, takie jak transmisja radiowa, klimatyzacja i silnik wysokoprężny. Wówczas tworzyli i działali tacy innowacyjni ludzie jak Nikola Tesla, Thomas Edison i Alexander Bell. Ale często pomijanym nazwiskiem jest Hertha Ayrton.

Kazimierz Mikulski

Anita Chandran badająca życie niezwykłej kobiety, której rocznicę stulecia śmierci przypada w 2023 r. opisuje Herthę Ayrton jako fizyka, matematyka, inżyniera, wynalazcę i sufrażystkę. To Ayrton była zainteresowana wieloma zagadnieniami w czasach, gdy od kobiet oczekiwano, że będą po prostu prowadzić własny dom po założeniu rodziny.<sup>1</sup>

Była kobietą o niesamowitym intelekcie i wielu umiejętnościach, widocznych w jej dokonaniach. Była naukowcem, o szerokim spektrum zainteresowań, a jej osiągnię-

cia wpłynęły na życie wielu osób. Znana w dorosłym życiu jako **Hertha Ayrton**, urodzona jako **Phoebe Sarah Marks**, została odznaczona *Medalem Hughesa* przez Towarzystwo Królewskie za pracę nad łukami elektrycznymi i „zmarszczkami”<sup>2</sup> w piasku i wodzie.<sup>3</sup>

Medal Hughesa przyznawany jest przez Royal Society of London „w uznaniu oryginalnego odkrycia w naukach fizycznych, w szczególności elektryczności i magnetyzmu lub ich zastosowań”. Nazwany na cześć Davida E. Hughesa<sup>4</sup>, pozłacany ze srebra medal jest przyznawany z nagrodą w wysokości 1000 funtów. Po raz pierwszy przyznano go w 1902 r. J. J. Thomsonowi „za jego liczne wkłady w nauki elektryczne, zwłaszcza w odniesieniu do zjawisk

<sup>1</sup> Aby dowiedzieć się więcej o Ayrtonie, zapoznaj się z artykułem Chandrana „Hertha Ayrton: pionierska wynalazczyni i sufrażystka”. <https://physicsworld.com/a/hertha-ayrton-pioneering-inventor-and-suffragette/>

<sup>2</sup> W geologii ripplemarks są strukturami osadowymi (tj. formami podłoża o niższym reżimie przepływu) i wskazują na pobudzenie przez wodę (prąd lub fale) lub wiatr. [https://en.wikipedia.org/wiki/Ripple\\_marks](https://en.wikipedia.org/wiki/Ripple_marks)

<sup>3</sup> [https://en.wikipedia.org/wiki/Hertha\\_Ayrton](https://en.wikipedia.org/wiki/Hertha_Ayrton)

<sup>4</sup> David Edward Hughes (1830–1900), był brytyjsko-amerykańskim wynalazcą, praktycznym eksperymentatorem i profesorem muzyki znanym z pracy nad telegrafem drukarskim i mikrofonem. W 1855 r. opatentował telegraf drukarski. W 1857 r. wrócił do Londynu i wymyślił w 1878 r. ulepszony mikrofon węglowy. W 1879 r. podczas swoich eksperymentów zidentyfikował indukcję elektromagnetyczną. [https://en.wikipedia.org/wiki/David\\_Edward\\_Hughes](https://en.wikipedia.org/wiki/David_Edward_Hughes)



Rysunek 1. Portret Herthy Ayrton z 1906 r. autorstwa Heleny Darmesterter. Źródło: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/Helena\\_Ars%C3%A8ne\\_Darmesteter\\_-\\_Portrait\\_of\\_Hertha\\_Ayrton.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/a9/Helena_Ars%C3%A8ne_Darmesteter_-_Portrait_of_Hertha_Ayrton.jpg)

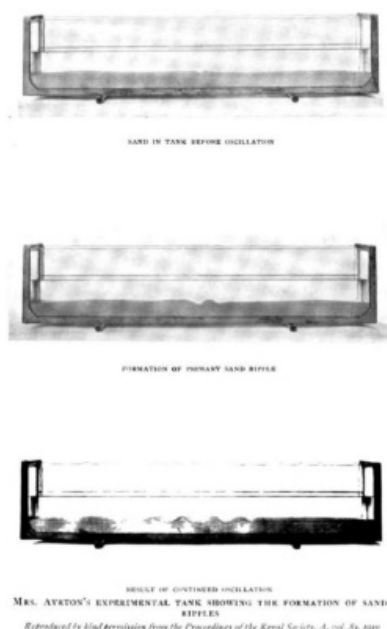


Fotografia 1. Starożytne ślady fali w piaskowcu, formacja Moenkopi, Park Narodowy Capitol Reef, Utah Źródło: [https://en.wikipedia.org/wiki/Ripple\\_marks#/media/File:Ripple\\_marks\\_in\\_Moenkopi\\_Formation\\_rock\\_off\\_of\\_Capitol\\_Reef\\_Scenic\\_Drive.jpeg](https://en.wikipedia.org/wiki/Ripple_marks#/media/File:Ripple_marks_in_Moenkopi_Formation_rock_off_of_Capitol_Reef_Scenic_Drive.jpeg)

**Rysunek 2.** Obrazy zachowania się fal i piasku w kucecie ukazane w publikacji, za którą otrzymała Medal Hughesa, str. 172 [w] Sharp E., Hertha Ayrton, 1854-1923, Memoir

**Fotografia 2.** Wykonywanie fal przez Herthę Ayrton w swoim laboratorium w 1910 r., ze szklanymi zbiornikami wypełnionymi wodą i piaskiem do badania fal i wibracji. <https://cdn.jwa.org/sites/default/files/mediaobjects/Ayrton-Hertha.jpg>

Źródło: [https://books.google.pl/books?id=7EQeAAAIAAJ&newbks=0&pg=PA172-IA1&source=gbs\\_selected\\_pages&cad=3#v=onepage&q&f=true](https://books.google.pl/books?id=7EQeAAAIAAJ&newbks=0&pg=PA172-IA1&source=gbs_selected_pages&cad=3#v=onepage&q&f=true)  
[https://books.google.pl/books?id=7EQeAAAAIAAJ&newbks=0&pg=PA114-IA1&source=gbs\\_selected\\_pages&cad=3#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pl/books?id=7EQeAAAAIAAJ&newbks=0&pg=PA114-IA1&source=gbs_selected_pages&cad=3#v=onepage&q&f=false)



wyładowań elektrycznych w gazach” i od tego czasu został przyznany ponad sto razy. Otrzymali go m.in. Alexander Graham Bell i Stephen Hawking, ale tylko dwie kobiety Hertha Ayrton i w 2008 r. Michele Dougherty.

Ayrton zainteresowała się falami piasku na plaży w Kent podczas wakacji i rozpoczęła program eksperymentowania na piasku i wodzie w celu zbadania erozji wybrzeża. Po śmierci Williama Ayrtona w 1908 r. coraz częściej poświęcała czas na prowadzenie badań w domu. Przeniosła swoje domowe laboratorium z najwyższej kondygnacji domu do salonu, wyposażając je w szklane zbiorniki wypełnione wodą i piaskiem. Tutaj poczyniła wielkie postępy w badaniu fal i wibracji i choć jej prace rozpoczęły się z czystej ciekawości, nabrały realnego znaczenia po wybuchu I wojny światowej.

Powszechnie uważana jest za jedną z najbardziej aktywnych wynalazczyni w historii nauki. Przyczyniła się do rozwoju w tak różnych dziedzinach, jak elektryczność, matematyka oraz fizyka cieczy i gazów. Jej działania obejmowały poprawę standardów żarówek i lamp stosowanych w tamtym czasie. Opracowała technologię zastosowaną do zwalczania gazów chemicznych w okopach pierwszej wojny światowej.<sup>5</sup>

Jej bliska przyjaciółka, pisarka i sufrażystka Evelyn Sharp napisała w pamiętniku Ayrton: „Była fizykiem, sufrażystką, demokratką, humanitarną i bardzo ludzką kobietą – ale nigdy nic z tych rzeczy w wodoszczelnym (zamkniętym) przedziale”.<sup>6</sup>

## Jak narodziła się „Herta”?

Jako *Phoebe Sarah Marks* urodziła się 28 kwietnia 1854 r. w Portsea w Wielkiej Brytanii, jako trzecie dzie-

cko i najstarsza córka żydowskiego zegarmistrza i polskiego imigranta Lewiego Marksa i jego żony Alice Theresy, krawcowej z Portsea. Mając siedem lat jej ojciec zmarł, pozostawiając matce wychowywanie siedmiorga dzieci, a kolejne w drodze. Matka strzegła niezależności córki, wierząc, że „kobiety stoczyły cięższą walkę na świecie”. Uważała, że potrzebują lepszego wykształcenia niż mężczyźni. Ta opinia skłoniła matkę Ayrtona do przyjęcia propozycji od swoich sióstr, by wysłać dziewięcioletnią Ayrtona do szkoły w Londynie.

W szkole Ayrton wyróżniała się błyskotliwym umysłem naukowym i silną osobowością. Jednak biorąc pod uwagę swobodę, jaką cieszyła się w domu, nie miała cierpliwości do arbitralnej dyscypliny, ustalonych zasad ani etykiety, której oczekuje się od młodych dziewcząt. „[Jego wychowanie] nie było wychowaniem, które pomogło jej uczynić ją w wieku dziewięciu lat potulną małą uczennicą” – napisała wspomniana Sharp.

Pomimo trudnego charakteru, Ayrton wyróżniała się w szkole i w wieku 16 lat była samowystarczalna. Pracowała jako guwernantka i jednocześnie wspierała finansowo rodzinę. W tym czasie poznała wielu wpływowych myślicieli i związała się z wczesnym ruchem sufrażystek. Nową przyjaciółką była Otilie Blind, która nadała Ayrtonowi przydomek „*Hertha*”, zainspirowana wierszem Algernona Swinburne’a z 1869 r. o tym samym tytule.<sup>7</sup>

Życie jako guwernantki nie zaspokajało jej aspiracji Ayrton, więc postanowiła się kształcić. W 1873 r. Blind przedstawił ją Barbarze Leigh Smith Bodichon, czołowej feministce i współzałożycielce pierwszego w Cambridge żeńskiego college’u Girton College. Bodichon została mentorką i powiernikiem Ayrton, zachęcając ją do

<sup>5</sup> Pisarka naukowa Anita Chandran i historyczka Elizabeth Bruton z University College Dublin opowiadają o niezwykłym życiu Ayrton, podkreślając jej znaczny wkład w naukę i społeczeństwo.

<sup>6</sup> Więcej informacji i CYTATÓW z książki na tej stronie internetowej [https://books.google.pl/books?id=7EQeAAAAIAAJ&newbks=0&hl=en&redir\\_esc=y](https://books.google.pl/books?id=7EQeAAAAIAAJ&newbks=0&hl=en&redir_esc=y)

<sup>7</sup> Tekst wiersza na stronie o adresie <https://www.poetryfoundation.org/poems/45290/hertha>

aplikowania do Cambridge. Przedstawiła również Ayrton Mary Ann Evans, autorce *Middlemarch*<sup>8</sup>, która używała pseudonimu George Eliot. Ayrton zdała egzamin wstępny dla kobiet na University of Cambridge w 1874 r. z wyróżnieniem z języka angielskiego i matematyki. Dwa lata później, sponsorowana m.in. przez Bodichon i Evans, zaczęła studiować matematykę w Cambridge.

## Co działo się w Cambridge i Finsbury?

W latach 70 XIX w. w Cambridge zajęć otwartych dla kobiet było niewiele. Ayrton ściśle współpracowała z garstką innych studentek, tworząc grupę badawczą, którą prowadził Richard Glazebrook, fizyk specjalizujący się w lotnictwie i elektryczności. Dziedziny te stały się filarami kariery Ayrtona. Była uwielbiana w Cambridge, a wspomniana Sharp cytuje koleżankę z roku, która mówi, że Ayrton „*sprawia wrażenie, że była jedną z uczennic tego roku, która miała przed sobą przyszłość*”.

To właśnie już podczas studiów Ayrton rozpoczęła działania jako wynalazczyni. Opracowała wczesną formę sfigmomanometru<sup>9</sup> – urządzenia do pomiaru uderzeń tętna. Składał się ze starej sprężyny do zegarka, przymocowanej na nadgarstku za pomocą dołączonego do niej pędzla. Przesuwając kawałek papieru w stałym tempie pod pędzlem, można było zarejestrować bicie serca. (Klasyczny sfigmomanometr rtęciowy do obejrzenia na stronie o adresie: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Sfigmomanometr#/media/Plik:Mercury\\_manometer.jpg](https://pl.wikipedia.org/wiki/Sfigmomanometr#/media/Plik:Mercury_manometer.jpg))

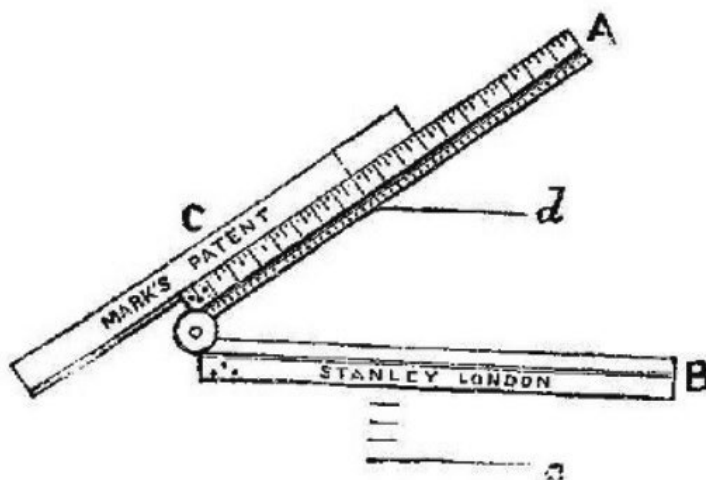
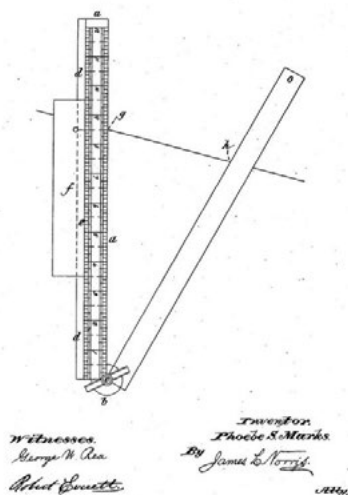
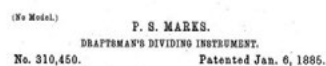
Sfigmomanometr został formalnie opatentowany w 1881 r. przez austriackiego lekarza Samuela Siegfrieda Karla von Bascha.

Ciężko pracowała, by ukończyć studia. W 1880 r. zdała egzaminy z Matematycznego Triposu. To jedne z najtrudniejszych egzaminów matematycznych na świecie. Egzamin zdawała w oddzielnej sali wykładowej. Mimo zdania egzaminu nie mogła otrzymać dyplomu. Przystąpiła do egzaminu zewnętrznego na University of London. To jedna z niewielu brytyjskich uczelni, które przyznawały stopnie naukowe dla kobiet. W 1881 r. uniwersytet przyznał jej Stopień Bachelor of Science, czyli licencjat z matematyki.

Po uzyskaniu dyplomu rozpoczęła pracę w Londynie jako nauczycielka matematyki. Najpierw w Kensington High School, a następnie w Wimbledon School. Szybko przeszła na prywatne korepetycje z matematyki i zaczęła opracowywać i publikować problemy matematyczne dla uczniów. Stały się one popularne wśród nauczycieli. Wiele z nich opublikowano w „*Mathematical Questions and Their Solutions*”.

Ayrton kontynuowała swoje badania naukowe i w 1884 r. opracowała nowy typ matematycznego dzielnika linii, umożliwiającego precyzyjnie podzielić linię na dowolną liczbę równych części. Opatentowanie wynalazku w Wielkiej Brytanii i za granicą wywołało ogromne zainteresowanie prasy, chociażby dlatego, że była kobietą.

We wzmiankowanej publikacji w *Nature* w styczniu 1885 r. w streszczeniu czytamy: „*Mówi się, że kompasy*



**Rysunek 3.** Strona tytułowa amerykańskiego patentu Ayrtona. Wówczas oficjalnie jako Phoebe S. Marks, na jej matematyczny rozdzielnik linii. Patent 310 450 „Przyrząd rysownika” zgłoszony 3 maja 1884 r., udzielony 6 stycznia 1885 r.”

**Rysunek 4.** Konstrukcja matematycznego dzielnika linii - informacja wzmiankowana w *Nature* w styczniu 1885 r.

Žródło: [https://www.nature.com/articles/031275a0.pdf?sharing\\_token=cZ1OTcaJYvYm9qGWBwRzhNRgNqAjWel9jnR3ZoTv0MZWpQ64bc1cMd4JpnGTCNyDEryDjwfyjD9d6Htyvc1KRXnOmwvgaWPpALaGaqYpvEtsL7l64op1UfGCvYv0LZ7xkOehzQ37eRsiSpCzTCViyw%3D%3D](https://www.nature.com/articles/031275a0.pdf?sharing_token=cZ1OTcaJYvYm9qGWBwRzhNRgNqAjWel9jnR3ZoTv0MZWpQ64bc1cMd4JpnGTCNyDEryDjwfyjD9d6Htyvc1KRXnOmwvgaWPpALaGaqYpvEtsL7l64op1UfGCvYv0LZ7xkOehzQ37eRsiSpCzTCViyw%3D%3D)

<sup>8</sup> Jej najslynniejsza książka, *Middlemarch*, została opublikowana w ośmiu częściach od 1871 r. do 1872 r.

<sup>9</sup> służy do badania ciśnienia krwi metodą pośrednią, bez konieczności wprowadzania do naczynia tętniczego cewnika połączonego z odpowiednim czujnikiem. O sfigmomanometrze więcej <https://diagnosis.pl/aparat-cisnieniomierz-rtciowy>

<sup>10</sup> <https://physicsworld.com/a/hertha-ayrton-pioneering-inventor-and-suffragette/> <http://journal.sciencemuseum.ac.uk/browse/issue-10/the-life-and-material-culture-of-hertha-ayrton/>

proporcjonalne GALILEO pochodzą z roku 1597. Wnioskujemy, że instrument składał się z dwóch ramion połączonych, jak na załączonym rysunku, tak, że jedno ramie mogło swobodnie poruszać się wokół stawu. Każde ramie miało pewną liczbę równych podziałów (niekoniecznie o tej samej długości na każdym ramieniu), przy czym punkt zerowy znajdował się na stawie. Aby podzielić daną długość na pięć równych części, należy wziąć zwykłą parę cyrkla i zmierzyć za ich pomocą daną długość, następnie ustawić cyrkiel proporcjonalny tak, aby piąta podziałka na każdym ramieniu znajdowała się w określonej odległości od siebie, a następnie przenieść ze zwykłymi kompasami odległość między podziałkami jednostek – będzie to jedna piąta podanej linii. Wydaje się, że był to sposób posługiwania się instrumentem Galileusza (por. Marie, *Histoire des Sciences Mathématiques et Physiques*, tom III, p. 108). Większość naszych czytelników bez wątpienia przyjrzy się innym sposobom korzystania. Zasada zastosowana w tym i podobnych instrumentach, a na pewno w tym przed nami, polega na proporcjonalności odpowiednich boków w podobnych trójkątach.”<sup>11</sup>

Dzielnik linii był jej pierwszym dużym wynalazkiem. Jego głównym zastosowaniem były prawdopodobnie powiększenia i zmniejszenia w pracach artystów. Był również przydatny dla architektów i inżynierów. Zgłoszenie patentowe Ayrtona zostało wsparte finansowo przez Louise Goldsmida i feministkę Barbarę Bodichon, które razem przekazały jej wystarczająco dużo pieniędzy, by wykupić patenty.

Patent Ayrtona z 1884 r. był pierwszym z wielu. W sumie Hertha zarejestrowała 26 patentów: pięć na dzielniki matematyczne, 13 na lampy łukowe i elektrody, reszta na napęd powietrza.

14 lutego 1885 r. Ayrton (znana jako Sarah Marks) przeczytała przed Towarzystwem Fizycznym artykuł zatytułowany „Zastosowania dzielnika linii”, w którym opisała wiele jego zastosowań. Artykuł został następnie wydrukowany w czasopiśmie *Filozoficzny Magazyn* (Marks, 1885a; Marks, 1885b). Pod koniec dobrze ilustrowanego, siedmiostronicowego artykułu Ayrton rozszerzyła zastosowanie dzielnika linii: „Dzielnik przydałby się również na pokładach statków do rysowania linii na mapach równoległych do innych linii z pewnej odległości. Byłby do tego znacznie lepszy niż zwykła linijka równoległa ze względu na bardzo duży zasięg i możliwość ustalania”.

Urządzenie zostało wyprodukowane przez firmę inżyniera i specjalisty w produkcji instrumentów naukowych i matematycznych WF Stanley and Company z Great Turnstile Holborn w Londynie i sprzedawane w trzech długościach: sześć, dwanaście i dwadzieścia cztery cale.<sup>12</sup> Urządzenie było również pokazywane na Wystawie Pożytkowej Przemysłu Kobiet, która odbyła się w Bristolu od lutego do kwietnia 1885 r. i została zorganizowana przez anglo-irlandzką sufrażystkę Helen Blackburn.

Ayrton zaczęła poważnie rozważać karierę naukową i w 1884 r. zaczęła uczęszczać na wieczorne wykłady jako specjalna studentka w Finsbury City and Guilds Technical College, pierwszej uczelni technicznej w Anglii. Była jedną z trzech kobiet na elektrotechnice razem ze 118 mężczyznami. Na uczelni wykładał ekspert fizyki, uznany inżynier elektryk oraz profesor William Edward (Will) Ayrton, ówczesny profesor fizyki stosowanej w City and Guilds of London Institute, którego filią była Finsbury Technical College. Rok po spotkaniu, pobrali się 6 maja 1885 r., a w 1886 r., urodziła im się córka, Barbara Bodichon, nazwaną na cześć mentora i zwolennika Ayrtona.

Sukces patentu oprócz gratulacji od środowisk feministycznych, pozwolił Ayrton przedstawić artykuł przed Towarzystwem Fizycznym (prekursor Instytutu Fizyki) i zachęcił ją do prowadzenia badań naukowych w pełnym wymiarze, mimo trudności finansowych. To dopiero Bodichon – dobroczyńca Ayrtona w Cambridge – zapewnił jej „koło ratunkowe”, przekazując dużą sumę pieniędzy, aby mogła zrezygnować z prowadzenia korepetycji i skupić swoją energię i uwagę na nauce.

### Dokonania z łukiem świetlnym

Po ślubie, naukowe poszukiwania Ayrtona były ograniczone z powodu złego stanu zdrowia oraz obowiązków domowych i rodzinnych, ale wytrwała, wyzdrowiała i wróciła do aktywności naukowej. Dzięki mężowi zainteresowała się węglowymi lampami łukowymi, pierwszymi praktycznymi lampami elektrycznymi, które zostały wynalezione przez Humphry’ego Davy’ego na początku XIX w. Aby zapalić te lampy, napięcie jest przykładane do dwóch stykających się prętów przewodzących węgiel. Przewody są następnie rozrywane, a łuk świetlny jest podtrzymywany przez odparowanie węgla podczas jego nagrzewania, działając jako mostek dla prądu elektrycznego.

Końcowe lata XIX w. to oświetlenie łukowe szeroko stosowane w oświetleniu ulicznym. Problemem była tendencja łuków elektrycznych do migotania i syczenia. Ayrton odkryła pochodzenie syczenia w utlenianiu dodatniej elektrody węglowej i zaproponowała zmianę kształtu tej elektrody, co spowodowało znaczne skrócenie okresu syczenia.

W 1895 r. Hertha Ayrton opublikowała serię artykułów w *The Electrician Arc*, wyjaśniając, że te zjawiska były wynikiem kontaktu tlenu z prętami węglowymi używanymi do tworzenia łuku.

W 1888 r. wygłosiła serię wykładów na temat elektryczności dla kobiet w Finsbury Technical College, co wówczas było postępowym działaniem. „To, że kobieta powinna pouczać kobiety na taki temat... było uważane za zdumiewającą innowację” – pisze Sharp o Ayrton.

W tamtych czasach lampy łukowe były szeroko stosowane w latarniach morskich i do oświetlania miejsc publicznych, ale ich zachowanie zbijało z tropu naukowców.

<sup>11</sup> <https://www.nature.com/articles/031275a0> Dzielnik linii. *Natura* 31, 275 (1885). <https://doi.org/10.1038/031275a0>; Każda osoba, której udostępniisz poniższy link, będzie mogła przeczytać tę zawartość: <https://rdcu.be/cZdZl>; <https://www.nature.com/articles/031275a0> oraz we francuskiej publikacji *Revue Scientifique* w maju tegoż roku.

<sup>12</sup> Aby uzyskać szczegółowe informacje na temat WF Stanley and Company zobacz [https://www.gracesguide.co.uk/W.\\_F.\\_Stanley](https://www.gracesguide.co.uk/W._F._Stanley) i <http://collection.science-museum.org.uk/people/cp1655/wf-stanley-and-company> -ograniczone

Syczały i migotały, zdając się przeczyć prawom elektryczności, a użyte materiały nie radziły sobie z intensywnym wydzielanym ciepłem. Ayrton odkryła, że przyczyną niestabilności łuku był kontakt tlenu z prętami węglowymi. Wykluczając tlen z lamp, była w stanie uzyskać stabilny łuk i ustalić „*równanie Ayrtona*” dotyczące długości łuku, ciśnienia i różnicy potencjałów. To była rewolucyjna praca, która doprowadziła do lepszego, wydajniejszego i jaśniejszego oświetlenia. Później zbadała również węgiel używany w lampach łukowych, opracowując pręty, które miały dłuższą żywotność i lepiej nadawały się do określonych zastosowań.

Prace Ayrton nad lampami łukowymi doprowadziły do kilku patentów, serii artykułów i książki. Jej badania nie tylko przyczyniły się do poprawy ogólnej technologii lamp łukowych i oświetlenia ulicznego, ale także projektorów kinowych i szperaczy wojskowych. Jej artykuły zostały uznane za wyjątkowe nawet przez jej krytyków, a ona stała się czołowym ekspertem w dziedzinie łuków elektrycznych, co zwiększyło jej pozycję w środowisku naukowym. Została poproszona o zaprezentowanie swoich prac na różnych forach, w tym w Brytyjskim Towarzystwie Postępu Nauki (później przemianowanym na Brytyjskie Stowarzyszenie Nauki), chociaż w początkowych latach często musiała to robić bezpośrednio przed lub po mężu.

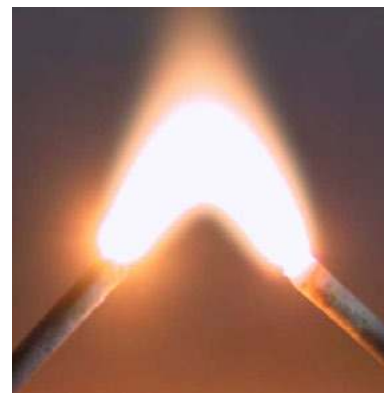
W 1899 r. była pierwszą kobietą, która przeczytała własną pracę „*Syczenie łuku elektrycznego*” przed Institution of Electrical Engineers (IEE). Wkrótce potem Ayrton została wybrana pierwszą kobietą członkinią IEE. Złożyła petycję o przedstawienie referatu przed Royal Society, ale nie została dopuszczona ze względu na jej płeć, a „*Mechanizm łuku elektrycznego*” został przeczytany przez Johna Perry’ego w 1901 r., prezydenta IEE, pioniera inżyniera i matematyka z Irlandii.

Na Międzynarodowym Kongresie Kobiet, który odbył się w Londynie w 1899 r., przewodniczyła sekcji nauk fizycznych. Przemawiała na Międzynarodowym Kongresie Elektrycznym w Paryżu w 1900 r. Odniesiony tam sukces doprowadził do tego, że Brytyjskie Stowarzyszenie Postępu Naukowego umożliwiło kobietom zasiadanie w komitetach ogólnych i sekcyjnych. Jej wniosek o stypendium został odrzucony przez Radę Towarzystwa Królewskiego, która orzekła, że zamężne kobiety nie mogą być stypendystami. W 1904 r. została pierwszą kobietą, która przeczytała artykuł „*The Origin and Growth of Ripple Marks*”, przed Royal Society, opublikowany później w *Proceedings of Towarzystwo Królewskie*.

W czerwcu 1891 r. zmarł mentor i przyjaciel Bodichon. Chociaż był to wielki cios dla Ayrton, ostatnim aktem hojności Bodichona było pozostawienie jej wystarczająco dużo pieniędzy, by zatrudnić gospodynię i ponownie skupić się na nauce. W międzyczasie jej mąż był przekonany, że Ayrton prowadziła niezależne badania, wiedząc, że jeśli nie podzieliła się autorstwem artykułów, to on otrzyma wyłączne uznanie. W związku z tym zapewnił jej przestrzeń laboratoryjną do własnej pracy i uważał, aby nie współpracować z nią bezpośrednio.



**Fotografia 3.** William Edward Ayrton (1847–1908) był angielskim fizykiem i inżynierem elektrykiem. W 1884 r. został wybrany profesorem elektrotechniki w Central Technical College w South Kensington. Opublikował dużą liczbę artykułów na tematy fizyczne, a w szczególności elektryczne, a jego nazwisko było szczególnie związane z nazwiskiem profesora Johna Perry’ego, wraz z wynalezieniem długiej serii elektrycznych przyrządów pomiarowych.



**Fotografia 4.** Łuk elektryczny Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/%C5%81uk\\_elektryczny](https://pl.wikipedia.org/wiki/%C5%81uk_elektryczny)

### Ciekawe badania ...z trującymi gazami czyli rozwój „wentylatora przeciwgazowego Ayrton” podczas pierwszej wojny światowej

Trujący gaz został po raz pierwszy użyty w kwietniu 1915 r., a Ayrton natychmiast zaczęła stosować swoje badania falującej wody do opracowania metody odpychania trującego gazu. Zbudowała nawet fałszywe „pole bitwy” wraz z okopami w jednym ze swoich zbiorników z piaskiem, używając dymu z palenia papieru do symulacji gazu. Wkrótce opracowała wentylator, który po uderzeniu o twardą powierzchnię uwalniał podmuch powietrza, wypierając w ten sposób zbliżający się gaz. W maju 1915 r. zgłosiła się do wojska ze swoim projektem, ale rząd nie dał się przekonać, twierdząc, że projekt jest zbyt prosty, aby traktować go poważnie. Ale Ayrton uparła się, a jej projekt został zaakceptowany ponad rok później.

Wentylator stanowił przeszkodę, która tworzyła wir powietrza i wypychała trujący gaz z okopów i z powrotem w kierunku wroga. Wentylator przeciwgazowy Ayrtona był prosty i składał się z arkusza wodoodpornego płótna, wspartego i usztywnionego ramą z trzciny i trzymanego przez hikorową rączkę. Początkowo Ayrton przetestowała zasadę tego pomysłu poprzez eksperymenty z paleniem brązowego papieru w swoim laboratorium w salonie; do połowy maja 1915 r. opracowała działający model, który przetestowała w ogrodzie swojej przyjaciółki i koleżanki sufrażystki Ernestine Mill w Kensington. Wentylator był wynikiem eksperymentu, rozpoczętego wkrótce po pierwszym niemieckim ataku gazu chmurowego, polegającego na znalezieniu - „*jakiejsz przeszkody, która oscylując w powietrzu w pobliżu naszych okopów, wywołałaby prądy, które odesłałyby szkodliwe gazy z powrotem. w kierunku wroga, jednocześnie dbając o to, by nasi ludzie mieli zapewnione świeże powietrze od tyłu*”.<sup>13</sup> Wyprodukowano około 100 000 „*fanów Ayrtona*”, ale okazały się one nieskuteczne w rzeczywistych warunkach bojowych. Po wojnie

<sup>13</sup> <https://www.iwm.org.uk/collections/item/object/30028168>

pracowała nad zmodyfikowanymi wersjami wentylatora do użytku przez robotników w kopalniach i kanałach.<sup>14</sup>

Ayrton kontynuowała pracę w dziedzinie badań wirów aż do swojej śmierci w sierpniu 1923 r. Jeden z dwóch częściowo wypełnionych zeszytów badawczych na temat wentylatorów przeciwigazowych Ayrtona zawiera notatki dotyczące końcowych eksperymentów przeprowadzonych na początku czerwca 1923 r.<sup>15</sup> Drugi zeszyt jest ledwie zapełniony i wydaje się, że został porzucony w 1918 r., czyli po zakończeniu wojny. Notatnik rozpoczęty w lipcu 1918 r., dotyczący używania wentylatorów napędzanych silnikiem do zastosowania „zasady klap” i ujawnia praktyczne zastosowanie, w którym Ayrton chciał zastosować wentylator przeciwigazowy w latach powojennych.

W ostatnich latach życia skierowała swój niemały intelekt na popieranie spraw, na których najbardziej jej zależało: praw wyborczych kobiet, praw ludzi pracy i ochrony dzieci. Kontynuowała swoją pracę naukową bez żadnych oznak spowolnienia, publikując artykuły aż do swojej śmierci, a ostatni został przeczytany pośmiertnie Towarzystwu Królewskiemu. Przez całe życie otrzymała 26 patentów, a jej przedwczesna śmierć oznaczała, że pozostawiła po sobie niedokończone badania.

<sup>14</sup> Więcej na stronie <https://www.english-heritage.org.uk/visit/blue-plaques/hertha-ayrton/>

<sup>15</sup> Archiwum Muzeum Nauki MS/2168/4 [Dwa częściowo zapełnione] zeszyty dotyczące badań nad wentylatorami przeciwigazowymi Ayrtona. Pierwszy zawiera notatki i eksperymenty datowane na okres od 26 lipca 1918 r. do 5 czerwca 1923 r., w szczególności eksperymenty i notatki dotyczące wykorzystania napędzanych silnikiem wentylatorów w celu zastosowania „zasady kłapy” do lamp, podczas gdy drugi zawiera „Myśli o wentylatorach” z notatkami i eksperymenty datowane na okres od 25 września 1918 r. do 1918 r.



Fotografia 5. Po lewej: wentylator przeciwigazowy Ayrtona

Po prawej: ilustracja przedstawiająca wentylator Ayrtona w użyciu, źródło nieznane. [za] <http://journal.sciencemuseum.ac.uk/browse/issue-10/the-life-and-material-culture-of-hertha-ayrton/#footnote-8>

Ayrton była kochana przez wielu ludzi, z którymi przeszła przez życie, z których wszyscy zwracali uwagę na jej błyskotliwy dowcip, pasję i ulubioną mantrę, często pisaną w jej zeszytach, aby „udowodnić wszystko; trzymaj się tego, co jest dobre”.

dr Kazimierz Mikulski  
Maksymilianowo

## Co w fizyce piszczą

### Jak wygląda jądro Ziemi?

W jądrze wewnętrznym Ziemi znajduje się najprawdopodobniej kula żelaza o promieniu 650 km. Odkrycie wpłynie na dotychczasową koncepcję powstawania i ewolucji Ziemi – donoszą australijscy naukowcy na łamach *Nature Communications*.

Badanie centralnej części Ziemi ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia formowania się i ewolucji planet. Obecność i rozmiar najbardziej wewnętrznego rdzenia było tematem rozważań naukowców, ale prowadzenie badań utrudniał brak narzędzi badawczych.

Ponad 20 lat temu prof. Adam Dziewoński wspólnie z Donem Andersonem opracowali obraz wnętrza Ziemi na podstawie szczegółowego badania wielkiego trzęsienia ziemi, które miało miejsce na Alasce 27 marca 1964 r. Ustalili, że jądro Ziemi nie jest jednolite, ale składa się z jądra stałego wewnętrznego, zbudowanego głównie z żelaza i niklu, które jest otoczone płynnym jądrem zewnętrznym. Między innymi na tę pracę powołują się w publikacji *Nature Communications* australijscy naukowcy.

Thanh-Son Pham i Hrvoje Tkalčić zebrali dane z istniejących sond, aby zmierzyć różne czasy odbijania się fal sejsmicznych powstałych na skutek trzęsień ziemi. Po raz pierwszy zaobserwowali fale odbijające się aż pięciokrotnie wzdłuż całej średnicy Ziemi.

„Rewerberacja to proces wielokrotnego dwukrotnego odbicia fal. Zjawisko dobrze znane w akustyce, ale także w sejsmice” – powiedział PAP prof. Stanisław Lasocki z Instytutu Geofizyki PAN.



„Energia sejsmiczna dużych trzęsień ziemi jest tak duża, że fale sejsmiczne mogą wielokrotnie okrążyć Ziemię. Podstawowe typy fal to fale bezpośrednie i ich odbicia od granic pomiędzy częściami wnętrza Ziemi. Ale bardzo długookresowe fale powierzchniowe (R,L), po dużym trzęsieniu mogą okrążyć Ziemię parę razy. Myślę, że te fale wywoływały rewerberacje pomiędzy powierzchnią Ziemi, granicą pomiędzy zewnętrznym fragmentem jądra wewnętrznego, a tą, nowo odkrytą żelazną piłką” – wytłumaczył Lasocki.

„Praca jest ciekawa. Naukowcy wykorzystali sieć obserwacji sejsmografów z globalnej sieci i pokazali dokładnie, jak wygląda struktura wnętrza Ziemi. Dowiedzieliśmy się, że promień żelaznej kuli wynosi 650 km i że ma niejednorodny rozkład – to jest nowe ustalenie. Ponieważ Ziemia powstała w wyniku ruchu obrotowego Ziemi, teraz trzeba by się zastanowić czy i jaki jest wpływ jądra w jądrze wewnętrznym na ruch obrotowy” – powiedziała w rozmowie z PAP prof. Jolanta Nastula z Centrum Badań Kosmicznych PAN.

# Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba – część II

W pierwszej części rozważań związanych z mechaniką nieba zostało przedstawione między innymi zagadnienie dwóch punktów materialnych oraz na tej podstawie przedstawiono wyprowadzenie trzech prawa Keplera. Kontynuując dalsze rozważania w drugiej części rozpoczynamy również od praw Keplera ale w nieco innym podejściu.

Marcin Wesołowski

Rozpatrujemy wzajemne oddziaływanie planety o masie  $m$  i Słońca o masie  $M$ . Ponieważ  $m \ll M$ , więc Słońce praktycznie nie „odczuwa” oddziaływania grawitacyjnego planety. Dlatego też, jeśli z jego środkiem zwiążemy układ współrzędnych, to możemy uważać go za inercjalny. Jeśli w tym układzie  $r$  oznacza promień wodzący planety, to równanie jej ruchu przyjmie postać:

$$m\ddot{\mathbf{r}} = -\frac{GMm}{r^3}\mathbf{r} \quad (1)$$

Całkowanie równania ruchu (1) można znaleźć w każdym podręczniku mechaniki teoretycznej. Przedstawiona w tym artykule metoda będzie nieco inna niż klasyczne rozwiązanie tego zagadnienia. Schemat ten nie wymaga całkowania równania ruchu, lecz wykorzystamy następujące dwie tożsamości, które zostały wyrażone poprzez dwa równania (2-3):

$$\mathbf{a} \times (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) = \mathbf{b} \cdot (\mathbf{a} \cdot \mathbf{c}) - \mathbf{c} \cdot (\mathbf{a} \cdot \mathbf{b}) \quad (2)$$

$$(\mathbf{a} \times \mathbf{b}) \cdot \mathbf{c} = \mathbf{a} \cdot (\mathbf{b} \times \mathbf{c}) \quad (3)$$

Zauważmy, że dowody powyższych dwóch twierdzeń zaliczane są do klasycznej teorii wektorów i tensorów, które można znaleźć np. w podręczniku Karaśkiewicza „Zarys teorii wektorów i tensorów” PWN, Warszawa, 1976. Zresztą równości te łatwo dowieść, jeśli pamiętamy o tym, że:

$$\begin{aligned} \mathbf{a} \times \mathbf{b} &= \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} \\ &= \mathbf{i}(a_y b_z - a_z b_y) + \mathbf{j}(a_z b_x - a_x b_z) + \mathbf{k}(a_x b_y - a_y b_x), \end{aligned} \quad (4a)$$

oraz:

$$\mathbf{a} \circ \mathbf{b} = a_x b_x + a_y b_y + a_z b_z. \quad (4b)$$

Potrzebna nam będzie jeszcze jedna tożsamość, którą możemy wyrazić jako:

$$\mathbf{r} \circ \dot{\mathbf{r}} = \mathbf{r} \cdot \dot{\mathbf{r}}. \quad (4c)$$

Zauważmy że tożsamość (4c) jest oczywista, jeśli  $\dot{\mathbf{r}}$  oznacza składową  $\dot{r}$  w kierunku wektora  $\mathbf{r}$ . Pomnożmy teraz obustronnie równanie (1) przez następującą zależność  $\dot{\mathbf{r}} = \frac{d\mathbf{r}}{dt}$  i wykorzystajmy następującą relację, że:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{1}{r} \right) = -\frac{1}{r^2} \frac{dr}{dt} = -\frac{r}{r^3} \frac{dr}{dt} = -\frac{\mathbf{r}}{r^3} \frac{d\mathbf{r}}{dt}. \quad (4d)$$

Wówczas równanie (1) możemy zapisać jako:

$$m \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} + GMm \cdot \left( \frac{\mathbf{r}}{r^3} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) = 0 \quad (5)$$

Co dalej daje nam:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{m}{2} \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right)^2 - \frac{d}{dt} \left[ GMm \left( \frac{1}{r} \right) \right] = 0 \quad (6)$$

Teraz łatwo już zauważyć, że z równania (6) wynika:

$$\frac{m}{2} \left( \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right)^2 - \frac{GMm}{r} = \text{const} = E \quad (7)$$

W ten sposób otrzymaliśmy prawo zachowania całkowitej energii mechanicznej układu.

Łatwo również dowieść, że moment pędu  $\mathbf{K}$  planety również nie zmienia się w czasie. W tym celu na podstawie rozważań przedstawionych w pierwszej części artykułu możemy zapisać, że:

$$\mathbf{K} = m \cdot \mathbf{r} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt}. \quad (8)$$

Skoro mamy dowieść, że moment pędu  $\mathbf{K}$  planety również nie zmienia się w czasie to musimy wykazać słuszność następującej zależności  $\frac{d\mathbf{K}}{dt} = \mathbf{0}$ . Zauważmy, że po prawej stronie tej zależności występuje tzw. wektor zerowy. W tym miejscu należy pamiętać, że wektor zerowy  $\mathbf{0}$  w przestrzeni liniowej pełni rolę elementu neutralnego dodawania wektorów. Wówczas mamy:

$$\frac{d\mathbf{K}}{dt} = m \frac{d\mathbf{r}}{dt} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} + m \mathbf{r} \times \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} = \mathbf{0} + m \mathbf{r} \times \left( -\frac{GMm}{r^3} \mathbf{r} \right) = \mathbf{0}$$

Zatem  $\mathbf{K} = \text{const}$ , a co wynika z równania (8) wektor  $\mathbf{K}$  jest prostopadły do płaszczyzny ruchu, co oznacza że mamy do czynienia z ruchem płaskim.

Następnie sprawdzimy czy wektor  $\mathbf{C}$ , który został zdefiniowany równaniem (9) jest stały, co oznacza, że  $\frac{d\mathbf{C}}{dt} = \mathbf{0}$ .

$$\mathbf{C} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \times \mathbf{K} - GMm \frac{\mathbf{r}}{r}. \quad (9)$$

W tym celu przeprowadźmy następujące rozważania:

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{C}}{dt} &= \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \times \mathbf{K} + \frac{d\mathbf{r}}{dt} \times \frac{d\mathbf{K}}{dt} - GMm \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) \\ &= m \frac{d^2\mathbf{r}}{dt^2} \times \left( \mathbf{r} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) - GMm \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) \\ &= -\frac{GMm}{r^3} \mathbf{r} \times \left( \mathbf{r} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) - GMm \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) \\ &= -\frac{GMm}{r^3} \left[ \mathbf{r} \cdot \left( \mathbf{r} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) - \mathbf{r} \left( \mathbf{r} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) \right] + \left[ -GMm \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) \right] \\ &= -\frac{GMm}{r^3} \left( \mathbf{r} \cdot \mathbf{r} \cdot \frac{d\mathbf{r}}{dt} - \mathbf{r} \cdot \mathbf{r}^2 \right) - GMm \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) \\ &= +\frac{GMm}{r^2} \left( \mathbf{r} \cdot \mathbf{r} - \mathbf{r} \cdot \mathbf{r} \right) - GMm \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) \\ &= GMm \frac{\mathbf{r} \cdot \mathbf{r} - \mathbf{r} \cdot \mathbf{r}}{r^2} - GMm \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) \\ &= GMm \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) - GMm \frac{d}{dt} \left( \frac{\mathbf{r}}{r} \right) = \mathbf{0}. \end{aligned} \quad (9b)$$

Na podstawie powyższych rozważań możemy zauważyć, że wektory  $\mathbf{K}$  i  $\mathbf{C}$  są stałe, tzn. mają stały kierunek oraz wartość. Trzy wielkości fizyczne  $E$ ,  $\mathbf{K}$  i  $\mathbf{C}$  jednoznacznie określają orbitę ciała o masie  $m$ .

Wyznamy teraz zależność na  $K^2$ , co możemy zrobić w następujący sposób:

$$\begin{aligned} K^2 &= m \left( \mathbf{r} \times \frac{d\mathbf{r}}{dt} \right) \cdot \mathbf{K} = m \mathbf{r} \cdot \left( \frac{d\mathbf{r}}{dt} \times \mathbf{K} \right) = m \mathbf{r} \cdot \left( \mathbf{C} + GMm \frac{\mathbf{r}}{r} \right) \\ &= m \mathbf{C} \cdot \mathbf{r} + GMm^2 r. \end{aligned} \quad (9c)$$

Zauważmy, że w tożsamości (9c) został wykorzystany warunek pochodzący z równania (9):

$$\mathbf{r} \times \mathbf{K} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \times \mathbf{K} = \mathbf{C} + GMm \frac{\mathbf{r}}{r}. \quad (9d)$$

Dlatego też ostatecznie zależność (9c) dana jest jako:

$$K^2 = m C r \cos \varphi + GMm^2 r \quad (10)$$

Podzielmy teraz obustronnie równanie (10) przez czynnik  $GMm^2$  wówczas otrzymujemy:

$$\frac{K^2}{GMm^2} = \frac{C r \cos \varphi}{GMm} + r. \quad (10a)$$

Następnie zauważmy, że po prawej stronie równania (10a) możemy parametr  $r$  wyciągnąć przed nawias, co daje nam:

$$\frac{K^2}{GMm^2} = r \cdot \left( \frac{C \cos \varphi}{GMm} + 1 \right). \quad (10b)$$

Z równania (10b) łatwo wykazać że  $r$  dane jest jako:

$$r = \frac{\frac{K^2}{GMm^2}}{\left( \frac{C}{GMm} \cdot \cos \varphi + 1 \right)}. \quad (10c)$$

Uwzględniając wyniki otrzymane w pierwszej części łatwo zauważyć, że zależność (10c) jest określana jako równanie określające krzywą stożkową typu:

$$r = \frac{p}{(1 + e \cdot \cos \varphi)}, \quad (10d)$$

gdzie:  $p$  jest parametrem elipsy, a  $e$  jest jej mimośrodem. Ponadto zauważmy, że w równaniu (10d) skorzystaliśmy z prawa przemienności dodawania.

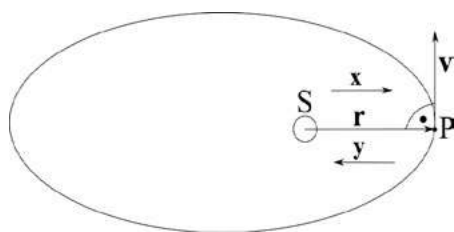
Skoro wektory  $\mathbf{C}$  i  $\mathbf{K}$  są stałe, więc można obliczyć ich wartość w dowolnym punkcie orbity. Najłatwiej jest to zrobić w peryhelium (bo wtedy bez względu na to, czy orbita jest elipsą, parabolą czy hiperbolą) ponieważ w tym punkcie wektor prędkości  $\mathbf{v}$  jest prostopadły do wektora  $\mathbf{r}$  ( $\mathbf{v} \perp \mathbf{r}$ ). Wówczas moment pędu  $\mathbf{K}$  i całkowita energia mechaniczna dane są jako:

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= m \mathbf{r} \mathbf{v}, \\ E &= \frac{m v^2}{2} - \frac{GMm}{r}. \end{aligned} \quad (11)$$

Schematycznie stwierdzenie to możemy przedstawić na rysunku (1):

Następnie ponownie wykorzystajmy równanie (9) oraz powyższe założenia:

$$\mathbf{C} = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \times \mathbf{K} - GMm \frac{\mathbf{r}}{r} = \mathbf{v} \times \mathbf{K} - GMm \frac{\mathbf{r}}{r}. \quad (12)$$



Rys. 1. Ruch planety P w peryhelium jej orbity. Pozostałe symbole oznaczają: S – Słońce,  $v$  – wektor prędkości linowej,  $r$  – odległość Słońca do planety w peryhelium jej orbity.

Zauważmy, że wektory zaznaczone na rys. 1:  $\mathbf{x} = \mathbf{v} \times \mathbf{K}$  i  $\mathbf{y} = -GMm \frac{\mathbf{r}}{r}$  są antyrównoległe, co oznacza, że ich kierunki są identyczne a zwroty są przeciwne. Wówczas wektor  $\mathbf{C}^2$  możemy obliczyć jako:

$$\begin{aligned} C^2 &= (mrv^2 - GMm)^2 = m^2 r^2 v^4 - 2GMm^2 v^2 r + (GMm)^2 \\ &= m^2 r^2 v^2 \left( v^2 - \frac{2GM}{r} \right) + (GMm)^2 \\ &= (GMm)^2 + K^2 \cdot \frac{2E}{m}, \end{aligned} \quad (13)$$

czyli ostatecznie mamy:

$$C = \sqrt{(GMm)^2 + \frac{2K^2 E}{m}}. \quad (14)$$

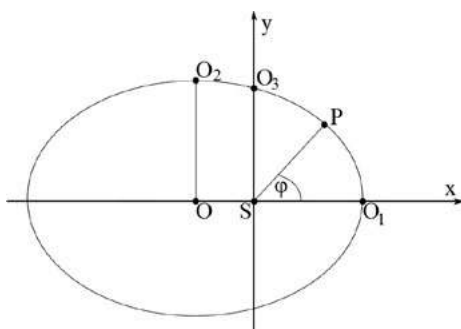
Zatem wszystkie występujące wielkości  $E$ ,  $K$ ,  $C$  można wyznaczyć za pomocą warunków początkowych – prędkości i położenia. Dlatego na podstawie tych warunków możemy wyznaczyć orbitę planety, jeśli:

- $e < 1$  – orbita jest elipsą,
- $e = 1$  – orbita jest parabolą,
- $e > 1$  – orbita jest hiperbolą.

Zauważmy, że o wartości mimośrodu decyduje wartość energii  $E$ . Jeżeli  $E < 0$ , jest to elipsa, gdy  $E = 0$  – parabola, gdy  $E > 0$  – hiperbola, co wynika ze wzoru.

$$e = \frac{C}{GMm} = \sqrt{1 + \frac{2K^2 E}{G^2 M^2 m^3}}. \quad (15)$$

Dla wszystkich planet  $E < 0$  i dlatego poruszają się one po elipsach – w ten sposób zostało udowodniono I prawo Keplera.



Rys. 2. Przykładowa orbita keplerowska. Poszczególne symbole oznaczają: S – Słońce, P – planeta, O – środek elipsy,  $OO_1 = a$  – duża oś elipsy,  $OO_2 = b$  – mała oś elipsy,  $OS = c$ ,  $e = ca^{-1}$ ,  $SO_3 = p$ ,  $p = a(1-e^2)$ .

Zauważmy, że możemy również mimośród orbity eliptycznej wyrazić jako iloraz odległości ogniska S od środka elipsy O przez długość dużej osi elipsy:

$$e = \frac{OS}{a} = \frac{c}{a}. \quad (16)$$

Drugie prawo Keplera wynika bezpośrednio z faktu, iż wektor  $\mathbf{K} = \text{const}$ .

$$K = |\mathbf{K}| = |\mathbf{r} \times m \cdot \mathbf{v}| = m |\mathbf{r} \times \mathbf{v}| = 2m \cdot S_0, \quad (17)$$

gdzie  $S_0$  jest polem, jakie zakreśla promień wodzący w jednostce czasu (jak na rys.3). Dlatego też prędkość polowa jest równa:

$$S_0 = \frac{K}{2m} = \text{const}. \quad (18)$$

Trzecie prawo Keplera można udowodnić następująco. Niech  $T$  oznacza okres obiegu planety po orbicie eliptycznej, wówczas:

$$T = \frac{S}{S_0} = \frac{2mS}{K}, \quad (19)$$

gdzie  $S$  oznacza pole powierzchni elipsy. Podnosząc równanie (19) do kwadratu i pamiętając o tym, że pole powierzchni elipsy jest równe  $S = \pi \cdot a \cdot b$ , gdzie  $a$  i  $b$  oznacza dużą i małą półoś elipsy. Dodatkowo wykorzystamy jeszcze parametr elipsy, który możemy wyrazić jako:

$$p = a(1 - e^2) = \frac{K^2}{GMm^2}. \quad (20)$$

Wówczas mamy:

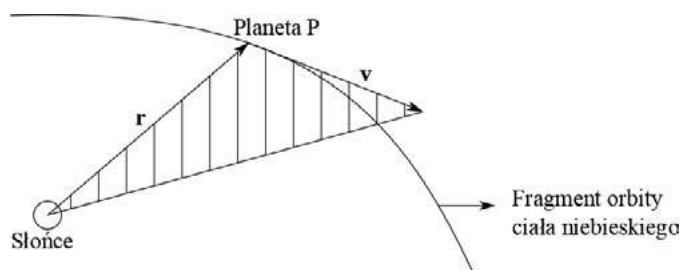
$$\begin{aligned} T^2 &= \frac{4m^2 S^2}{K^2} = \frac{4m^2 \pi^2 a^2 b^2}{GMm^2 a(1-e^2)} = \frac{4\pi^2 a b^2}{GM(1-e^2)} \\ &= \frac{4\pi^2 a^3 (1-e^2)}{GM(1-e^2)} = \frac{4\pi^2 a^3}{GM}, \end{aligned} \quad (21)$$

gdzie:  $b = a\sqrt{1-e^2}$ . Ostatecznie możemy zapisać, że:

$$\frac{T^2}{a^3} = \frac{4\pi^2}{GM} = \text{const}. \quad (22)$$

Zauważmy, że równanie (22) określane jest jako matematyczna postać III prawa Keplera.

Wykorzystując powyższe rozważania przeprowadźmy dwa elementarne dowody odpowiednio dla energii  $E$  oraz momentu pędu  $K$ .



Rys. 3. Ilustracja służąca do wyprowadzenia zależności opisującej II prawo Keplera.

### Dowód dla energii:

W tym celu wykorzystamy równanie (15):

$$e = \sqrt{1 + \frac{2K^2 E}{G^2 M^2 m^3}}. \quad (23)$$

Podnieśmy do kwadratu równanie (23) wówczas mamy:

$$e^2 - 1 = \frac{2K^2 E}{G^2 M^2 m^3}. \quad (24)$$

Zauważmy, że w równaniu (24) po jego prawej stronie występuje kwadrat momentu pędu  $K^2$ , który możemy wyrazić poprzez parametr elipsy  $p$  na podstawie zależności (20), co możemy zapisać jako:

$$e^2 - 1 = \frac{2E p m^2 G M}{G^2 M^2 m^3}. \quad (25)$$

Po redukcji wyrazów podobnych otrzymujemy:

$$e^2 - 1 = \frac{2E p}{G M m}, \quad (26)$$

gdzie parametr  $p$  ponownie na podstawie zależności (20) jest równy:  $p = a(1 - e^2)$ . Wówczas równanie (26) jest równe:

$$e^2 - 1 = \frac{2E a (1 - e^2)}{G M m}. \quad (27)$$

Na podstawie równania (27) łatwo można pokazać, że:

$$E = -\frac{G M m}{2a}. \quad (28)$$

### Dowód na pęd:

Skorzystajmy w tym miejscu z następującego równania:

$$p = \frac{K^2}{G M m^2}. \quad (29)$$

Wówczas kwadrat momentu  $K^2$  pędu wynosi:

$$K^2 = p G M m^2. \quad (30)$$

Postępując w analogiczny sposób jak w dowodzie na energię możemy zapisać, że:  $p = a(1 - e^2)$ , wówczas pęd wynosi:

$$\begin{aligned} K &= \sqrt{p G M m^2} = \sqrt{a(1 - e^2) G M m^2} \\ &= m \sqrt{a(1 - e^2) G M}. \end{aligned} \quad (31)$$

Na podstawie równań (28) i (31) możemy zauważyć, że wartość energii zależy od dużej pół osi  $a$  orbity eliptycznej, a moment pędu zależy zarówno od dużej pół osi  $a$  orbity eliptycznej jak i od jej mimośrodowości  $e$ .

### Prędkości kosmiczne

W mechanice nieba prędkości kosmiczne (prędkości ucieczki) oznaczają minimalne prędkości, które należy nadać satelicie, aby dzięki energii kinetycznej mógł on pokonać grawitację pochodzącą od ciała macierzystego. Wyróżniamy cztery prędkości kosmiczne:

**Pierwsza prędkość kosmiczna  $V_I$**  dla kulistego obiektu kosmicznego jest to prędkość jaką należy nadać w kie-

runku poziomym małemu ciału (np. satelicie) aby krążyło po orbicie kołowej tuż nad powierzchnią rozważanego obiektu kosmicznego (np. planety (Ziemi)).

Wyprowadzenie równania na pierwszą prędkość kosmiczną uwzględnia następującą zależność, że siła grawitacji spełnia rolę siły dośrodkowej i nadaje satelicie przyspieszenie dośrodkowe oczywiście podczas ruchu po orbicie kołowej. Wówczas na podstawie II zasady dynamiki Newtona możemy zapisać, że:

$$\frac{G m M_Z}{R_Z^2} = \frac{m V_I^2}{R_Z}, \quad (32)$$

gdzie  $G$  jest stałą grawitacji ( $G = 6.67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$ ),  $m$  jest masą satelity,  $M_Z$  jest masą Ziemi ( $M_Z = 5.972 \cdot 10^{24} \text{ kg}$ ), a  $R_Z$  jest promieniem (promieniem równikowym Ziemi,  $R_Z = 6378,137 \text{ km}$ ). Ponadto zauważmy, że satelita porusza się tuż nad powierzchnią planety (np. Ziemi) więc możemy przyjąć że  $R \approx R_Z$ .

Po prostych przekształceniach równania (32) otrzymujemy, że:

$$V_I = \sqrt{\frac{G M_Z}{R_Z}} = 7902.71 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 7.9 \frac{\text{km}}{\text{s}}. \quad (33)$$

**Dru ga prędkość kosmiczna  $V_{II}$**  to prędkość jaką należy nadać satelicie, aby mógł on pokonać grawitację ciała macierzystego i na zawsze opuścić to ciało. Oznacza to, że satelita będzie poruszał się ruchem swobodnym, a jego tor ruchu będzie krzywą stożkową otwartą (parabolą lub hiperbolą). Wyznaczając wartość drugiej prędkości kosmicznej porównamy energię satelity znajdującego się nad powierzchnią ciała macierzystego z energią w nieskończoności. Zauważmy, że im większa odległość  $R$  tym mniejsza jest energia. Oznacza to, że jeśli odległość  $R$  dąży do nieskończoności to energia satelity będzie dążyć do zera. Zatem sumaryczna energia (kinetyczna i potencjalna) też musi być bliska zeru lub nawet wynosić zero. Wówczas możemy zapisać, że:

$$\frac{m V_{II}^2}{2} + \left( -\frac{G M_Z m}{R_Z} \right) = 0. \quad (34)$$

Wówczas po prostych przekształceniach równania (34) mamy:

$$V_{II} = \sqrt{\frac{2 G M_Z}{R_Z}} = \sqrt{2} \sqrt{\frac{G M_Z}{R_Z}} = \sqrt{2} \cdot V_I.$$

Po podstawieniu odpowiednich wartości liczbowych otrzymujemy poszukiwaną wartość drugiej prędkości kosmicznej:

$$V_{II} = \sqrt{2} \cdot 7.9 \frac{\text{km}}{\text{s}} \approx 11.18 \frac{\text{km}}{\text{s}}. \quad (35)$$

Zauważmy, że druga prędkość kosmiczna bywa także nazywaną prędkością ucieczki. Równanie na drugą prędkość kosmiczną (prędkość ucieczki) możemy również wyprowadzić poprzez zastosowanie wybranych elementów analizy matematycznej.

Załóżmy, że  $G$  to stała grawitacji,  $M$  to masa Ziemi lub innego ciała niebieskiego, a  $m$  to masa ciała które ucieka.

Wówczas w odległości  $R$  od środka ciężkości na ciało działa siła przyciągania grawitacyjnego:

$$F = \frac{GMm}{R^2}. \quad (36)$$

Pracę jaką należy wykonać, aby ciało przesunąć o niewielką odległość  $dR$  wbrew sile grawitacji dana jest jako:

$$dW = F \cdot dR = \frac{GMm}{R^2} \cdot dR. \quad (37)$$

Z równania (37) należy obliczyć całkowitą pracę którą należy wykonać aby ciało przesunąć z odległości  $R_0$  do nieskończoności ( $\infty$ ), zatem możemy zapisać, że:

$$W = \int_{R_0}^{\infty} \frac{GMm}{R^2} \cdot dR. \quad (38)$$

Następnie wykorzystajmy jedną z podstawowych własności rachunku całkowego mówiącą o tym, że stały czynnik występujący w funkcji podcałkowej możemy wyłączyć przed znak całki, wówczas mamy:

$$W = GMm \int_{R_0}^{\infty} \frac{1}{R^2} \cdot dR. \quad (39)$$

Teraz została nam już do obliczenia prosta całka oznaczona w oparciu o wzór wynikający z rachunku całkowego:

$$\int_{R_0}^{\infty} \frac{1}{R^2} \cdot dR = \int_{R_0}^{\infty} \frac{dR}{R^2} = -\frac{1}{R} \Big|_{R_0}^{\infty} = -\frac{1}{\infty} - \left(-\frac{1}{R_0}\right) = \frac{1}{R_0}. \quad (40)$$

Wykorzystując równania (37-40) otrzymujemy, że:

$$W = GMm \cdot \frac{1}{R_0} = \frac{GMm}{R_0}. \quad (41)$$

Aby wykonać pracę w nieskończoności energia kinetyczna ciała musi być równa wykonanej pracy.

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{GMm}{R_0}. \quad (42)$$

Wówczas prędkość ucieczki wynosi:

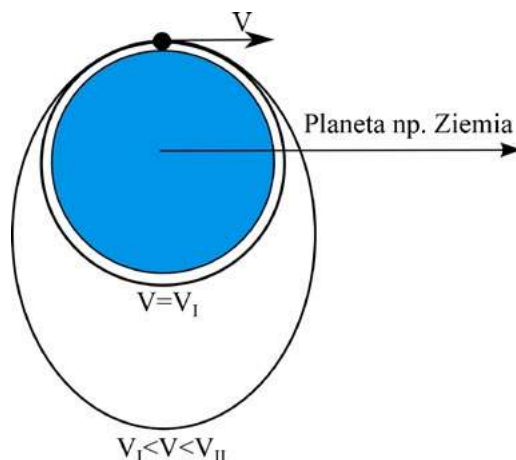
$$V = \sqrt{\frac{2GM}{R_0}}. \quad (43)$$

Dodatkowo możemy w tym miejscu wykorzystać definicję przyspieszenia grawitacyjnego  $g$ :

$$g = \frac{GM}{R_0^2}, \quad (44)$$

Wówczas prawą stronę równania (41) możemy wyrazić jako:  $W = \frac{GMm}{R_0} = mgR_0$ . W takim przypadku prędkość ucieczki dana jest następującą zależnością:

$$V = \sqrt{\frac{2GM}{R_0}} = \sqrt{2gR_0}. \quad (45)$$



Rys.4. Kształt dwóch przykładowych trajektorii dla ciała oraz zależności pomiędzy prędkościami kosmicznymi.

**Trzecia prędkość kosmiczna  $V_{III}$**  to prędkość którą należy nadać satelicie aby mógł on opuścić Układ Słoneczny. Minimalna wartość trzeciej prędkości kosmicznej wynosi  $V_{III} = 16.7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  i związana jest z ruchem obiegowym Ziemi wokół Słońca. Natomiast **czwarta prędkość kosmiczna  $V_{IV}$**  to prędkość, którą należy nadać satelicie aby mógł on opuścić Galaktykę czyli w naszym przypadku Drogę Mleczną. Minimalna wartość czwartej prędkości kosmicznej wynosi  $V_{IV} = 330 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$  i związana jest z ruchem Słońca dookoła środka Galaktyki.



Rys. 5. Orbita teleskopu Hubble'a (Foto. NASA).

dr hab. Marcin Wesołowski, prof. UR  
Uniwersytet Rzeszowski, Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych,  
Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy Techniczno – Przyrodniczej Uniwersytetu  
Rzeszowskiego.

#### LITERATURA:

- [1] Rybka, E., 1976, Astronomia ogólna, PWN, Warszawa.
- [2] Borkowski, K. M., 1991, Astronomiczne obliczenia nie tylko dla geografów, UMK Toruń.
- [3] Artymowicz, P. 1995, Astrofizyka układów planetarnych, Wyd. Naukowe PWN.
- [4] Stodółkiewicz J. S., 1978, Astrofizyka ogólna z elementami geofizyki, PWN Warszawa.
- [5] Kreiner, J. M., 1988, Astronomia z astrofizyką, PWN Warszawa.
- [6] Wesołowski M., 2023, Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba – część II, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 1, str. 44-50.

**NOWE! WYDANIE SPECJALNE 1/2023**

WERSJA ELEKTRONICZNA – PLIK PDF

  
**194**  
**POJĘĆ I TERMINÓW**  
**z astronomii i astrofizyki**  
**od ACHERNER**  
**po ZIEMIĘ**



**Cena 20 zł**  
w tym 8% VAT



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

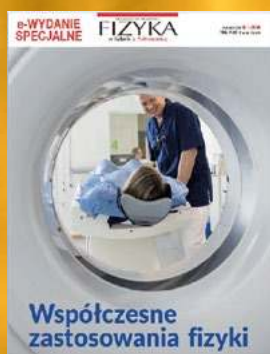
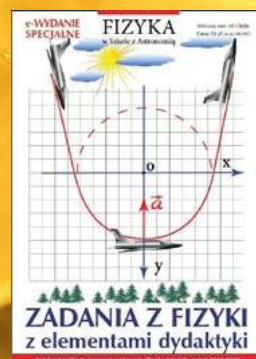
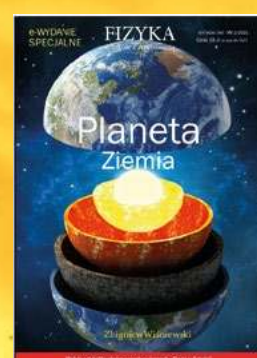
eprasa.pl 20f4d87c0d

# 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 20f4d87c0d