FIZYKA
w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

392 (LXV) indeks 35810X **Nr 3 maj/czerwiec 2024** CENA 45,00 zł (w tym 8% VAT)

ŚWIATOWY DZIEŃ KWANTA

TECHNIKI WYSOKIEJ PRÓŻNI

UFO OKIEM FIZYKA

DYDAKTYKA DYDAKTYCZNA

RACHUNEK KSIĘŻYCOWY NEWTONA I NIE TYLKO...

DOŚWIADCZENIA

DYFRAKCJA

RODZINNE EKSPERYMENTOWANIE ELEMENT EDUKACJI DOMOWEJ

TWÓRCY NIEBIESKIEJ DIODY LED

ISSN 0426-3383

FIZYKA U PULMONOLOGA

eprasa.pl 8ee85682dd

Roczniki 2023 z rabatem 75%!

Oferta ważna do wyczerpania nakładu!

Szczegóły i formularz zamówienia na www.aspress.com.pl/roczniki/

eprasa.pl 8ee85682dd

Drodzy Czytelnicy!

Mam przyjemność przekazać w Państwa ręce trzeci numer *Fizyki w Szkole*. Wakacyjna pora sprzyja trochę lżejszemu, spojrzeniu na rzeczywistość, dlatego m.in. zdecydowaliśmy się opublikować artykuł Macieja Panczykowskiego poświęconego kwestii UFO. Istnienie UFO jest kwestią nad wyraz wątpliwą, autor wspomnianego artykułu dosyć skrupulatnie wymienia, jednak ograniczenia jakim musiałoby sprostać UFO, aby zaistnieć. Najważniejszym z nich jest kwestia olbrzymich odległości jakie musiałby pokonać taki obiekt, aby do nas dotrzeć, a w związku z tym czasu, ile musiałaby trwać sama misja. Należy pamiętać, że wbrew pozorom Kosmos to dość puste miejsce, raczej z rzadka wypełnione materią. Nie za bardzo więc wiadomo jak „*UFIKI*", które musiałyby wyruszyć do nas kilka tysięcy lat temu miałyby nas wypatrzeć, skoro w tamtych czasach nasza planeta nie emitowała żadnego specyficznego promieniowania, za pomocą którego można by nas wypatrzyć. Co jednak jeszcze ciekawsze zwolennicy teorii o istnieniu UFO nie odpowiedzieli jeszcze na jeszcze jedno ważne pytanie, w jakim celu „Ufiki" miałyby do nas przylatywać?

Czy jednak to oznacza, że nie mamy co liczyć na to, że odwiedzi nas kosmiczny gość? Otóż nie. Nasza planeta jest ciągle odwiedzana przez różne obiekty np. przez cząsteczki gwiezdnego pyłu. Spotkania takie mają jednak zazwyczaj formę zderzeń. Zderzenia odegrały ważną rolę w kształtowaniu powierzchni Ziemi jak też i innych obiektów. Wystarczy spojrzeć na Księżyc, który zresztą podobno sam powstał w wyniku takiej kolizji. Tego typu kosmicznym spotkaniom poświęcony jest artykuł „Zderzenia w Układzie Słonecznym – fakty i mity" autorstwa Marcina Wesołowskiego.

Fizyka jest nauką eksperymentalną. Jeśli chcemy wychować dobrego badacza lub ucznia/studenta rozumiejącego fizykę powinniśmy od najmłodszych lat rozbudzać w nim zmysł samodzielnego badacza, o czym z kolei jest artykuł „Rodzinne eksperymentowanie…" Kazimierza Mikulskiego

Kończąc życzę Państwu miłej i udanych wakacji!

Z poważaniem

Zbigniew Wiśniewski

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

4 **Fizyka u pulmonologa** ▮ Tomasz Kubiak

Pulmonologia staje się coraz bardziej pożądaną specjalizacją. Ten dział medycyny, zajmujący się rozpoznawaniem i leczeniem chorób układu oddechowego, jest ściśle powiązany z fizyką.

14 **Światowy Dzień Kwantu** ▮ Kazimierz Mikulski

17 **Przewidziany 90 lat temu kryształ istnieje** ▮ Kazimierz Mikulski

18 **Techniki wysokiej próżni w fizyce doświadczalnej** ▮ Andrzej Wasiak

23 **Co w fizyce piszczy – Wibracje nanorurek. Wykrywanie fal grawitacyjnych** ▮ opr. redakcyjne

24 **Żywoty fizyków – Robert Hall, Marshall I. Nathan, Nick Holonyak i Robert H. Rediker** ▮ Tadeusz Wibig

Z naszych lekcji

26 **Dydaktyka dydaktyczna – esej** ▮ Grzegorz Karwasz, Katarzyna Wyborska

Zadania maturalne układane są tak, jakby zamierzeniem było, aby uczeń matury nie zdał: co się da skomplikować, to zostanie skomplikowane.

30 **Dyfrakcja** ▮ Stanisław Bednarek

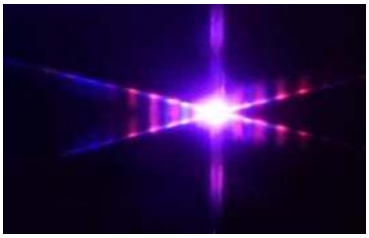
Siatka dyfrakcyjna jest tak tanim i prostym przyrządem, że znajduje się prawie w każdej pracowni fizycznej. Dzięki tym przedmiotom można wykonać kilka interesujących doświadczeń.

36 **Rodzinne eksperymentowanie jako element edukacji domowej** ▮ Kazimierz Mikulski

Dostarczanie dziecku w przedszkolu oraz wieku szkolnym nowych wrażeń emocjonalnych podczas eksperymentów realizowanych w domu, stanowi nowe, lepsze podejście do edukacji domowej.

40 **Rachunek księżycowy Newtona i nie tylko... miniatura dydaktyczna** ▮ Waldemar Reńda

43 **XIX edycja konkursu *Fizyczne Ścieżki* rozstrzygnięta!**



Astronomia dla każdego

44 **UFO a fizyka** ▮ Maciej Panczykowski

46 **Zderzenia w Układzie Słonecznym – fakty i mity. Cz. II** ▮ Marcin Wesołowski

Rozważmy prawdopodobieństwo zderzenia małego ciała niebieskiego z innym ciałem. W celu uproszczenia naszych rozważań załóżmy, że ciało krąży wokół Słońca po orbicie eliptycznej.

FIZYKA w Szkole z Astronomią
CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

NUMER 3 MAJ/CZERWIEC 2024
392 (LXV) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 45,00 zł (w tym 8% VAT)

Redakcja Zbigniew Wiśniewski (redaktor prowadzący – fizykcs@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 Szelatyńska **Druk i oprawa** Paper & Tinta, ul. Ceglana 34, 05-270 Nadma
Zdjęcie na okładce: Dreamstime

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

Zapraszamy do odwiedzenia naszej strony w Internecie www.aspress.com.pl

Foto – Dreanstime

Fizyka u pulmonologa

W dobie postępującego zanieczyszczenia powietrza, szerzących się infekcji oraz plagi nowotworów wywołanych paleniem tytoniu, pulmonologia staje się coraz bardziej pożądaną specjalizacją. Niewiele osób zdaje sobie jednak sprawę, że ten dział medycyny, zajmujący się rozpoznawaniem i leczeniem chorób układu oddechowego, jest ściśle powiązany z fizyką.

Tomasz **Kubiak**

Związki te nie ograniczają się tylko do ilościowego wyjaśnienia mechanizmu wentylacji płucnej. Wykorzystywane przez pulmonologów zaawansowane metody diagnostyki i terapii opierają się przecież na odkryciach i osiągnięciach fizyków oraz inżynierów biomedycznych. Warto zatem właśnie z ich perspektywy przyjrzeć się aspektom pracy lekarzy chorób płuc.

Prawidłowa wentylacja płuc

Aby nasz organizm mógł właściwie funkcjonować, powietrze musi zostać pobrane z atmosfery i w sposób niezakłócony poprzez górne i dolne drogi oddechowe dotrzeć do płuc. Tam dzięki zjawisku dyfuzji następuje wymiana O_2 i CO_2 pomiędzy pęcherzykami płucnymi a krwią. Zużyte powietrze, nieco bogatsze w ditlenek węgla, trafia następnie z powrotem tą samą drogą do atmosfery. Na pozór wszystko wydaje się proste, ale tak naprawdę kluczowe jest zrozumienie, co właściwie napędza wspomniany przepływ powietrza. Na lekcjach biologii raczej się tego nie dowiemy, trzeba zatem sięgnąć do wiedzy z biofizyki.

Wypada zacząć od tego, że w określonych miejscach układu oddechowego w danej chwili panują odmienne wartości ciśnienia. We wnętrzu pęcherzyków płucnych, których w naszym organizmie jest 300 - 500 mln, mamy tzw. ciśnienie śródpęcherzykowe p_P.[1] Z kolei w jamie opłucnej, czyli szczelinowatej przestrzeni zawierającej się pomiędzy dwiema blaszkami nazywanymi opłucną trzewną i opłucną ścienną, występuje ciśnienie wewnątrzopłucnowe p_{WO}. W opisie funkcjonowania układu oddechowego jego wartość przyjmujemy za ujemną w stosunku do poziomu odniesienia, czyli panującego na zewnątrz ciała ciśnienia atmosferycznego p_A. Wykresy zmienności wspomnianych ciśnień w trakcie procesu wentylacji płuc obrazuje rys. 1. Warto go prześledzić, zauważywszy w pierwszej kolejności, iż prawidłowo zawsze $p_P > p_{WO}$.

Podczas wdechu jama klatki piersiowej powiększa się na skutek skurczu mięśni międzyżebrowych i obniżenia przepony, czemu towarzyszy spadek ciśnienia wewnątrzopłucnowego od -330 Pa do około -800 Pa. Z kolei ob-

[1] Wprawdzie średnica pojedynczego pęcherzyka płucnego wynosi tylko od 150 - 600 µm, ale łączna powierzchnia wszystkich może dochodzić nawet do 140 m^2, co odpowiada obszarowi ponad połowy kortu tenisowego.

eprasa.pl 8ee85682dd

jętość pęcherzyków płucnych rośnie. Ciśnienie śródpęcherzykowe p_P maleje zatem od wartości spoczynkowej ($p_P = p_A$) do około -200 Pa. Powietrze napływa z dróg oddechowych do pęcherzyków. Te stopniowo wypełniają się, a ponieważ ich objętość jest oczywiście ograniczona, od pewnego momentu p_P zaczyna wzrastać. Wciąganie powietrza do płuc ustaje, gdy p_P ponownie zrówna się z atmosferycznym. Podczas normalnego, spokojnego oddechu u osoby dorosłej do płuc wprowadzane jest około 0,5 l powietrza, nazywane objętością oddechową.

Kolejną fazą wentylacji płucnej jest wydech, mający bierny charakter. Gdy mięśnie międzyżebrowe rozkurczają się a przepona rozluźnia się i unosi ku górze jama klatki piersiowej zmniejsza się, powracając do spoczynkowych wymiarów. Ciśnienie p_{WO} rośnie zatem stopniowo aż do maksymalnej wartości, przy czym pamiętamy już, że ta ostatnia i tak musi mieć wartość ujemną (-330 Pa) w stosunku do p_A. Płuca a wraz z nimi pęcherzyki kurczą się pod wpływem sił sprężystości.[2] Stąd p_P rośnie do wartości maksymalnej ≈ 200 Pa, co wymusza usuwanie powietrza z dróg oddechowych.

W miarę opróżniania pęcherzyków ciśnienie p_P w ich wnętrzu maleje, aby na końcu wydechu zrównać się z atmosferycznym. Wywód na temat zmian ciśnień w układzie oddechowym może na pierwszy rzut oka wydawać się nieco zawiły, ale warto z niego zapamiętać, że ciśnienie śródpęcherzykowe p_P jest ujemne w fazie wdechu, dodatnie podczas wydechu, natomiast ciśnienie wewnątrzopłucnowe p_{WO} zmienia się tylko w obrębie ujemnych wartości.

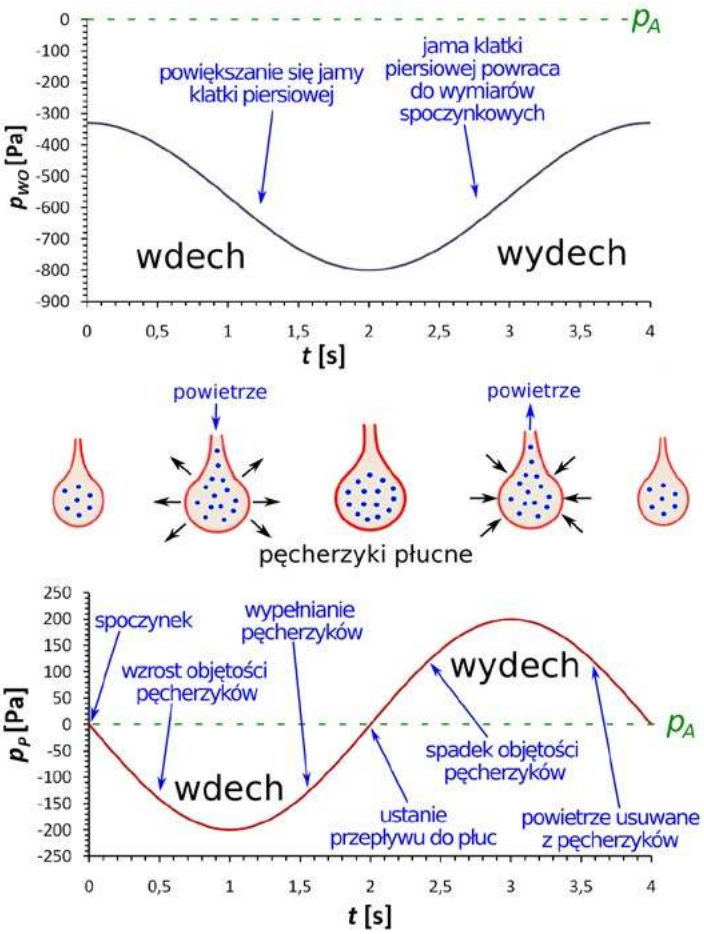
Dla biofizyka dokładne poznanie sposobu działania płuc, czyli zarówno omówionej skrótowo czynności mechanicznej jak i procesów związanych z dyfuzją gazów oraz perfuzją tego narządu krwią, stanowi ciekawe zagadnienie naukowe i jest potencjalną inspiracją do prowadzenia zaawansowanych badań.

Czytelnikom, którzy chcieliby zgłębić nieco więcej tajników funkcjonowania układu oddechowego, np. przyjrzeć się bliżej właściwościom elastycznym tkanki płucnej, dowiedzieć się, czym skutkuje występowanie napięcia powierzchniowego warstewki wody pokrywającej nabłonek pęcherzyków i jaka jest rola surfaktantu w procesie wentylacji płuc polecam dedykowany artykuł w „Fizyce w Szkole".[3]

W dalszej części obecnego tekstu przyjrzymy się natomiast, w jaki sposób lekarz pulmonolog, wykorzystując aparaturę bazującą na osiągnięciach fizyki, może diagnozować oraz leczyć choroby i nieprawidłowości, występujące w układzie oddechowym.

Badanie osłuchowe płuc

Pacjent, który udał się do gabinetu pulmonologa po przeprowadzonym wywiadzie w pierwszej kolejności na pewno zostanie poddany badaniu osłuchowemu. Pozwoli ono wstępnie ocenić dźwięki towarzyszące wentylacji płuc pod kątem występowania takich patologii, jak np.: zapalenie, odma opłucnowa czy rozedma. Odbiór sygnałów bioakustycznych odbywa się z powierzchni ciała przy użyciu stetoskopu.[4] Wielu lekarzy wciąż posługuje się klasycznym urządzeniem, którego pierwowzór opracował amerykański kardiolog David Littmann już w 1961 r.



Rys. 1. *Przebieg zmienności ciśnienia wewnątrzopłucnowego p_{WO} i śródpęcherzykowego p_P w trakcie wdechu i wydechu. Ciśnienie atmosferyczne p_A stanowi poziom odniesienia, stąd na rys. przypisano mu wartość 0.*

Do klatki piersiowej pacjenta, gdy ten spokojnie oddycha, z przodu, z tyłu i z boków przykładana jest specjalna głowica. Jej czaszę zamyka elastyczna membrana, która, kontaktując się bezpośrednio ze skórą, oscyluje pod wpływem docierającej z wnętrza ciała fali mechanicznej. Fizyków na pewno zainteresuje fakt, że podstawową częstotliwość rezonansową f_r membrany wykonanej z materiału o gęstości powierzchniowej σ [kg/m^2] i charakteryzującej się średnicą d oraz napięciem T możemy obliczyć ze wzoru:

$$f_r = \frac{0,765}{2d}\sqrt{\frac{T}{\sigma}}$$

[2] Siły sprężystości generują ciśnienie p_s, przeciwdziałające zwiększaniu objętości płuc.

[3] T. Kubiak, Biofizyka układu oddechowego - od teorii do eksperymentu, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 1 (2018), s. 4-8.

[4] O działaniu, historii oraz wykorzystaniu stetoskopu w szeroko pojętej medycynie wewnętrznej przeczytać można w artykule: T. Kubiak, Fizyka u internisty, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 2 (2018), s. 4-7.

eprasa.pl 8ee85682dd

Wywołane drganiami membrany zmiany ciśnienia akustycznego propagują dalej przez słup powietrza, wypełniający kanał elastycznego przewodu. Posiada on kształt litery Y i jest określany mianem drenu. Nie tylko transmituje dźwięki, ale także izoluje od zakłóceń zewnętrznych. Z kolei połączone sprężyną, sztywne metalowe ramiona tzw. liry umożliwiają umieszczenie w uszach lekarza zamykających tor akustyczny końcówek, nazywanych oliwkami. Klasyczny stetoskop wraz ze wskazaniem najważniejszych elementów jego budowy przedstawia fot.1.

Należy pamiętać, że badanie osłuchowe przeprowadzane tego typu urządzeniem niesie za sobą duże ryzyko popełnienia błędu.[5] Pulmonolog musi bowiem nie tylko poprawnie usłyszeć dźwięki, dobiegające z klatki piersiowej, ale przede wszystkim je poprawnie zinterpretować, co wymaga dużej wiedzy oraz doświadczenia. Różne czynniki mogą zakłócić prawidłową percepcję dźwięku, która zależy nie tylko od czynników fizycznych (np. jakości przewodzenia fal akustycznych przez dren stetoskopu), ale także aspektów psychoakustycznych.[6]

Odgłosy słyszane przez klasyczny stetoskop nie są ponadto nigdzie zapisywane, stąd wynik badania jest całkowicie subiektywny i niemożliwy do weryfikacji przez innego lekarza w przyszłości. Dlatego współcześnie zamiast tradycyjnych „słuchawek lekarskich" w pulmonologii coraz częściej stosuje się stetoskopy elektroniczne. W zależności od modelu i przyjętych rozwiązań technicznych głowica urządzenia wychwytuje docierające z wnętrza ciała fale akustyczne przy użyciu wbudowanego mikrofonu, połączonych z membraną elementów piezoelektrycznych, pojemnościowych przetworników akustyczno-elektrycznych a nawet czujników optycznych, wykrywających oscylacje membrany.

W tym miejscu warto doprecyzować, jakie właściwie dźwięki możemy zarejestrować stetoskopem. W pierwszej kolejności są to fizjologiczne szmery oddechowe, generowane na skutek przepływu powietrza przez kolejne odcinki układu oddechowego. Przykładowo szmer oskrzelowy, posiadający szeroki zakres częstotliwości, prawidłowo wykryć można tylko nad tchawicą lub dużymi oskrzelami.

Fot. 1. *Podstawowe elementy budowy klasycznego stetoskopu.*

Nad płucami podczas wdechu oraz w początkowej fazie wydechu, gdy powietrze turbulentnie przepływa przez oskrzela płatowe i segmentowe, słyszalny jest natomiast symetryczny szmer pęcherzykowy. Jego ściszenie, zanik czy asymetria są oczywiście objawami patologii. Do nieprawidłowych dźwięków osłuchowych zaliczmy z kolei szmery dodatkowe. W zależności od jednostki chorobowej i fizycznego mechanizmu powstawania pojawić się mogą różne ich rodzaje, co obrazuje tabela 1.

Warto uświadomić sobie, że częstotliwości podstawowych dźwięków związanych z przepływami powietrza przez dolne drogi oddechowe zawierają się zazwyczaj w przedziale 100-1000 Hz. Medycy umownie dzielą go na podzakresy: 100-300 Hz (dźwięki o niskiej częstotliwości *f*), 300-600 Hz (o średniej *f*), powyżej 600 Hz (dźwięki o wysokiej *f*).[7]

Podczas tradycyjnego osłuchiwania lekarz może jedynie orientacyjnie ocenić charakter brzmienia szmerów, ich

Tabela 1. Dźwięki świadczące o wystąpieniu nieprawidłowości w układzie oddechowym.

rodzaj dźwięku	przyczyny powstania	potencjalna jednostka chorobowa
rzężenia – drobnobańkowe, tzw. trzeszczenia (o wysokiej *f*); – grubobańkowe (o niskiej *f*).	Nagłe wyrównanie ciśnienia powietrza po otwarciu zamkniętej uprzednio struktury dróg oddechowych.	– zapalenie płuc, włóknienie płuc, obrzęk płuc (drobnobańkowe); – rozstrzenie oskrzeli (grubobańkowe)
świsty (syczenia o wysokiej częstotliwości *f*)	Turbulentny przepływ powietrza przez zwężone drogi oddechowe.	– zmiany zapalne krtani i tchawicy, ciało obce (świsty wdechowe); – astma, przewlekłe zapalenie oskrzeli, przewlekła obturacyjna choroba płuc (świsty wydechowe)
furczenia (świsty o niskiej *f*)	Obecność wydzieliny w drogach oddechowych.	– zapalenie płuc, zapalenie oskrzeli
skrzeczenia	Złożenie trzeszczeń oraz krótkich świstów.	- alergiczne zapalenie pęcherzyków płucnych
tarcie opłucnowe	Ocieranie się o siebie blaszek opłucnej ściennej i trzewnej.	- stan zapalny lub proces nowotworowy.

[5] Problem ten jest poruszany w wielu artykułach, np. H. Hafke-Dys i inni, The accuracy of lung auscultation in the practice of physicians and medical students, PLoS One 14(8), 2019, e0220606.

[6] Osobom zainteresowanym biofizycznymi aspektami funkcjonowania zmysłu słuchu polecam artykuł: T. Kubiak, Biofizyka zmysłu słuchu i ochrona przed hałasem, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 2 (2021), s. 4-10.

[7] Podział na podstawie: V. Gross i inni, The Relationship between Normal Lung Sounds, Age, and Gender. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 162 (2000), s. 905-909.

eprasa.pl 8ee85682dd

intensywność czy czas trwania poszczególnych faz oddechu. Stetoskop elektroniczny daje zdecydowanie większe możliwości, gdyż sygnał jest zapisywany w formie cyfrowej.[8] i dzięki temu może być dalej poddany zaawansowanej obróbce i analizie zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości.[9] Warto również wspomnieć, iż urządzenia elektroniczne zapewniają redukcję szumów oraz nawet stukrotne wzmocnienie dźwięku w tym uwypuklenie tonów o wybranym zakresie częstotliwości. Ponadto wyniki badania mogą zostać zaprezentowane w formie graficznej w postaci spektrogramu.

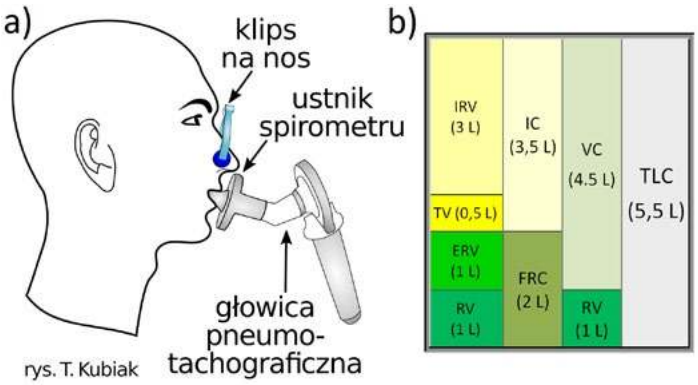
Warto nadmienić, że nowoczesne stetoskopy elektroniczne wykorzystywane są m.in. do telemedycznego monitorowania dzieci chorych na astmę. W przypadku zaostrzenia objawów rodzic może samodzielnie wykonać badanie, którego wynik dzięki dedykowanej aplikacji zdalnie trafia do pulmonologa w celu interpretacji. Co więcej, trwają prace nad wykorzystaniem algorytmów sztucznej inteligencji do analizy dźwięków rejestrowanych elektronicznym stetoskopem, aby zminimalizować ryzyko popełnienia błędów przez lekarza i ograniczyć subiektywność jego diagnozy.

Czytelnicy, którzy zapoznali się z tabelą 1 od razu zorientowali się zapewne, że badanie osłuchowe, nawet jeśli przeprowadzone jest przez doskonałego specjalistę, stosującego najnowocześniejszy stetoskop, nie może być raczej podstawą do jednoznacznego ustalania, na jaką jednostkę chorobową cierpi pacjent. W zasadzie bowiem każdy szmer dodatkowy może mieć zróżnicowane przyczyny. Pulmonolodzy w swej pracy wykorzystują zatem jeszcze inne, bardziej zaawansowane metody diagnostyczne.

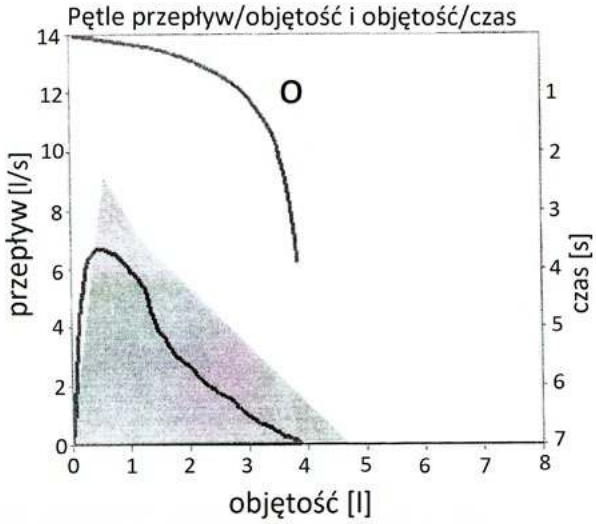
Spirometria

Osoby, u których podejrzewa się występowanie przewlekłych schorzeń układu oddechowego, takich jak astma czy POChP kierowane są na spirometrię. Podczas tego podstawowego badania czynnościowego pacjent pozostaje w wyprostowanej pozycji siedzącej i oddycha przez ustnik głowicy urządzenia (rys. 2a). Przepływ powietrza przez nos pozostaje w tym czasie zamknięty w wyniku założenia na niego klamerki. Ważne jest, aby chory współpracował z diagnostą i na jego znak wykonywał zadane czynności, np. maksymalne nabranie powietrza do płuc, szybkie jego wypuszczenie albo przedłużenie i pogłębienie wydechu.

Na wyniki spirometrii (fot. 2) składają się zarówno parametry liczbowe jak i wykresy. W tym miejscu należy jeszcze uściślić, że wyróżniamy tzw. badanie statyczne, wykonywane przy spokojnym oddechu pacjenta oraz pomiar dynamiczny, gdzie musi on wykonywać natężone wdechy oraz wydechy. W pierwszym przypadku wyznacza się m.in. objętość oddechową **TV** (*ang. **T**idal **V**olume*), czyli ilość powietrza wchodzącą do (ale też wychodzącą z) płuc podczas pojedynczego, spokojnego oddechu (≈500 ml u mężczyzn i ≈400 ml u kobiet).



Rys. 2. (a) *Schematyczne przedstawienie badania spirometrycznego.* **(b)** *Przyczynki składające się na całkowitą pojemność płuc, czyli TLC. Pozostałe skróty oznaczają odpowiednio: TV - objętość oddechową; IRV - zapasową objętość wdechową; ERV – zapasową objętość wydechową; RV - objętość zalegającą, IC - pojemność wdechową; FRC – czynnościową pojemność zalegającą, VC - pojemność życiową.*



Parametry		LLN	ULN	Pred	PRZED # 1	%Zdef	Z-score
FVC	l	3,81	5,59	4,70	3,83	81	-1,60
FEV1	l	2,86	4,37	3,62	2,97	82	-1,75
FEV1/VC	%	67,2	86,6	76,9			
FEV1/FVC	%	67,2	86,6	76,9	77,5	101	0,10
PEF	l/s	7,06	11,50	9,28	**6,74**	73	-1,89

Fot. 2. *Wynik badania spirometrii dynamicznej z krzywą przepływ - objętość oraz wartościami parametrów, które zostały opisane w artykule.*

Jeśli pacjent zrobi powolny, ale możliwie najgłębszy wydech, w płucach pozostanie mu tylko tzw. objętość zalegająca **RV** (*ang. **R**esidual **V**olume*), której, niestety, nie można zmierzyć w badaniu spirometrycznym. Gdy następnie weźmie maksymalny wdech, osiągnie całkowitą pojemność płuc, czyli **TLC** (*ang. **T**otal **L**ung **C**apacity*), jej także w badaniu nie wyznaczmy, bo nie wiemy, ile wynosiło RV. Na polecenie diagnosty można jednak nabierać do płuc maksymalną ilość powietrza, aby osiągnąć TLC; następnie powoli wydmuchać wszystko, co tylko możliwe, aby w płucach pozostało tylko RV. Wówczas powie-

[8] Fale akustyczne z wnętrza ciała są rejestrowane przez przetwornik elektroakustyczny, który zamienia dźwięk na analogowy sygnał elektryczny. Ten przekształcany jest na postać cyfrową z wykorzystaniem przetwornika analogowo-cyfrowego ADC (*ang. analog-to-digital converter*).

[9] Technikom przetwarzania sygnałów z urządzeń diagnostycznych poświęcono artykuł: T. Kubiak, Sygnały i obrazy, czyli fizyka w przetwarzaniu i analizie danych biomedycznych, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 3 (2020), s. 4-12.

eprasa.pl 8ee85682dd

trze wypchnięte przez ustnik spirometru będzie odpowiadało tzw. pojemności życiowej płuc, czyli **VC** (*ang. **V**ital **C**apacity*). Jest to druga podstawowa wielkość mierzona w spirometrii statycznej.

Aby lepiej zrozumieć wszystkie przyczynki składające się na całkowitą pojemność płuc, czyli TLC, warto spojrzeć na rys. 2b. Spokojny wdech (czyli objętość oddechową TV) można jeszcze pogłębić o tzw. zapasową objętość wdechową, nazywaną **IRV** (*ang. **I**nspiratory **R**eserve **V**olume*). Zatem suma TV i IRV, określana mianem pojemności wdechowej **IC** (*ang. **I**nspiratory **C**apacity*), to największa objętość powietrza, jaką możemy wciągnąć do płuc w wyniku maksymalnego wdechu, który nastąpił po spokojnym wydechu. Trzeba również pamiętać, iż po spokojnym wydechu w płucach pozostaje jeszcze powietrze w ramach tzw. czynnościowej pojemności zalegającej **FRC** (*ang. **F**unctional **R**esidual **C**apacity*), z której można jeszcze pozbyć się zapasowej objętości wydechowej, czyli **ERV** (*ang. **E**xpiratory **R**eserve **V**olume*). Objętość zalegająca RV, jak już wspomniano, zawsze pozostaje w płucach.

Oprócz klasycznej spirometrii statycznej powszechnie wykonywane jest też badanie dynamiczne. Nazwa ma związek z natężoną aktywnością oddechową pacjenta, obywającą się przy częściowym zaangażowaniu mięśni brzucha oraz międzyżebrowych. Przykładowo, jeśli na polecenie diagnosty chory po maksymalnym powolnym wdechu zrobi forsowny, trwający możliwie długo (> 6 s) nasilony wydech o odpowiednio szybkim początku, możliwe będzie wyznaczenie kilku istotnych parametrów, jakie znajdziemy w wynikach badania przedstawionych na fot. 2. **FVC** (*ang. **F**orced **V**ital **C**apacity*) to natężona pojemność życiowa płuc, która odpowiada ilości powietrza (w litrach), jaką pacjent wydmuchał w czasie całego natężonego wydechu, rozpoczętego z poziomu TLC.

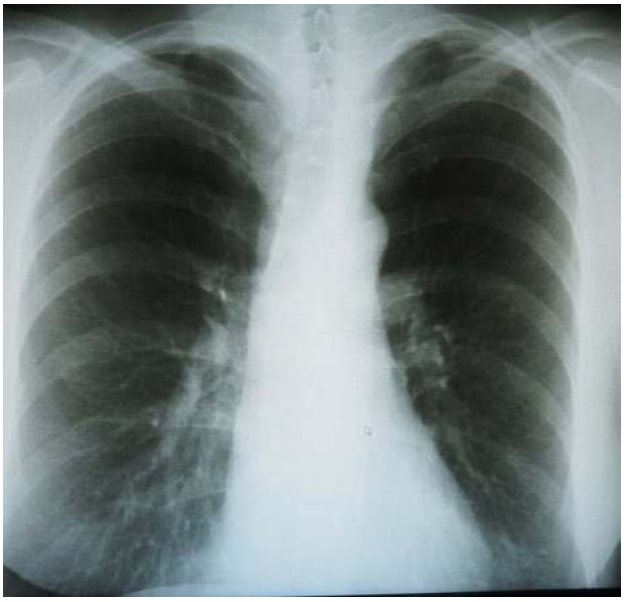
Z kolei natężona objętość wydechowa pierwszosekundowa FEV_1 (*od ang. **F**orced **E**xpiratory **V**olume 1sec*) wskazuje, ile powietrza zostało usunięte z płuc tylko w pierwszej sekundzie wzmożonego wydechu. Wartość tę możemy również odnieść do pojemności życiowej VC i wyrazić w procentach, co da nam tzw. wskaźnik Tiffeneau (FEV_1/VC %) albo do natężonej pojemności życiowej, aby uzyskać wskaźnik pseudo-Tiffeneau (FEV_1/FVC %).[10]

Ostatnim z parametrów widocznych na fot. 2 jest **PEF** (*ang. **P**eak **E**xpiratory **F**low*), co możemy przetłumaczyć jako szczytowy przepływ wydechowy. Ukazuje on maksymalne natężenie przepływu powietrza (w l/s). Wartość PEF można wyznaczyć z krzywej przepływ - objętość, podobnie jak wartości maksymalnych przepływów wydechowych (*ang. **M**aximal **E**xpiratory **F**low*) MEF_{75}, MEF_{50}, MEF_{25}, odpowiednio w punktach stanowiących 75, 50 i 25 % FVC. Warto zwrócić uwagę, iż jeśli na osi poziomej zaznaczymy wyrażoną w litrach objętość wydychanego powietrza a na osi pionowej przepływ w litrach na sekundę, to u osób zdrowych pole pod wykresem przyjmuje kształt zbliżony do trójkąta (patrz ponownie fot.2).

Gdy badanie spirometrii dynamicznej jest wykonane poprawnie (zalecane są przynajmniej trzy powtórzenia forsownego wydechu), pulmonolog jest w stanie na jego podstawie wyciągnąć szereg wniosków na temat ewentualnych zaburzeń funkcjonowania układu oddechowego, np. obturacji (ograniczenia przepływu powietrza) lub restrykcji (zmniejszenia całkowitej pojemności) płuc. Warto jeszcze wspomnieć, że występujący podczas badania istotny wzrost ciśnienia w klatce piersiowej sprawia, iż przeciwwskazaniem do spirometrii dynamicznej jest m.in. obecność tętniaków, przebyte odwarstwienie siatkówki[11] czy odma opłucnowa. Ta ostatnia może być łatwo wykryta w badaniach rentgenowskich, które mają również kluczowe znaczenie w pracy pulmonologa.

Badania wykorzystujące promienie X

Badania obrazowe, bazujące na promieniowaniu rentgenowskim, są kluczowe w rozpoznawaniu chorób płuc.[12] Konwencjonalne radiogramy klatki piersiowej wykonuje się zawsze w pozycji stojącej, wykorzystując zazwyczaj uniwersalny, stacjonarny aparat RTG z tzw. ścianką płucną.[13] Chory wykonuje głęboki wdech a następnie wstrzymuje oddech na czas przechodzenia promieni X przez



Fot. 3. *Klasyczne, wykonane w projekcji tylno-przedniej zdjęcie RTG płuc bez zmian ogniskowych.*

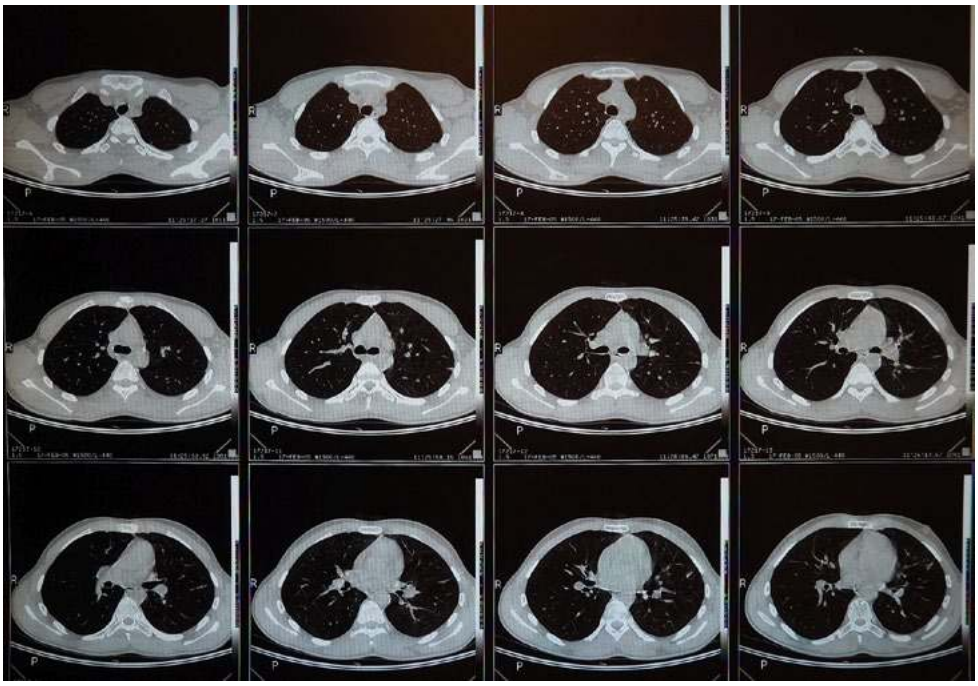
[10] Nazwa wskaźnika upamiętnia francuskiego fizjologa Roberta Tiffeneau, który już w 1947 roku (wraz z André Pinelli) zaproponował, jak wykonywać natężony manewr wydechowy, o czym można przeczytać w artykule: J.C. Yernault, The birth and development of the forced expiratory manoeuvre: a tribute to Robert Tiffeneau (1910–1961), Eur Respir J. 10 (1997), 2704-2710.

[11] O siatkówce i chorobach oczu można przeczytać w artykułach: T. Kubiak, Od biofizyki układu wzrokowego do złudzeń optycznych, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 6 (2019), s. 4-10 oraz T. Kubiak, Fizyka u okulisty i optometrysty, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 5 (2023), s. 4-13.

[12] O historii odkrycia promieni X oraz innych zastosowaniach badań rentgenowskich przeczytać można w artykule: T. Kubiak, Fizyczne podstawy badań rentgenowskich kości i stawów, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 6 (2021), s. 16-21.

[13] W przypadku chorego w bardzo ciężkim stanie ogólnym badanie RTG można wykonać urządzeniem przyłóżkowym w pozycji leżącej, ale wówczas jego wartość diagnostyczna jest ograniczona.

eprasa.pl 8ee85682dd



Fot. 4. *Zestawienie wybranych przekrojów tomograficznych klatki piersiowej.*

jego ciało. Standardowo używa się projekcji tylno-przedniej (PA od *łac. posterior-anterior*), co oznacza, że lampa rentgenowska usytuowana jest za plecami pacjenta a kaseta z kliszą bądź detektor przed nim. Warto zaznaczyć, iż zdjęcie rtg płuc można wykonać również z boku.

Czytelnicy „Fizyki w Szkole" wiedzą już zapewne, że podstawą radiodiagnostyki jest absorpcja energii promieniowania X w tkankach na skutek zajścia efektu fotoelektrycznego. Promieniowanie rozproszone w wyniku zjawiska Comptona pogarsza tylko kontrast obrazu. Należy je zatem eliminować, wykorzystując kratki przeciwrozproszeniowe, umieszczane między ciałem pacjenta a detektorem.

W przeszłości obraz RTG klatki piersiowej utrwalany był na kliszy, czyli prostokątnym arkuszu halogenosrebrowej błony światłoczułej. Wymagała ona dalszej obróbki z wykorzystaniem specjalnej wywoływarki oraz odczynników chemicznych. Dopiero tak przygotowane zdjęcie rentgenowskie lekarz mógł oglądać i oceniać z wykorzystaniem negatoskopu, czyli jednolicie podświetlanej płyty wieszanej na ścianie.

Wykonane w projekcji PA analogowe przeglądowe zdjęcie RTG klatki piersiowej osoby zdrowej przedstawia fot. 3. Struktury anatomiczne, w zależności od swej gęstości, osłabiają promieniowanie w nieco różnym stopniu, co umożliwia ich identyfikację na obrazie. Przykładowo kości charakteryzują się dużym pochłanianiem fotonów X, co sprawia, że klisza w ich rzucie pozostaje biała. Przez powietrze w płucach promieniowanie przechodzi natomiast praktycznie bez osłabienia i po wyjściu z ciała zaczernia błonę.

Wprawny lekarz na zdjęciu RTG dostrzeże szereg szczegółów, nie tylko kości, sylwetkę serca, drzewo oskrzelowe czy duże naczynia krwionośne (np. tętnice płucne), ale również wszelkiego typu zmiany patologiczne. Obecnie w diagnostyce coraz powszechniejszym standardem są radiogramy cyfrowe, które nie tylko oferują lepszy kontrast, ale przede wszystkim dają możliwość przeprowadzania analiz telemedycznych (np. zdalnego opisu przez radiologa) i archiwizowania wyników w postaci plików, a nie trudnych w przechowywaniu i występujących w pojedynczym egzemplarzu klisz.

Należy mieć świadomość, że wykonywane od końca XIX w. klasyczne badania RTG nie są idealną metodą diagnostyczną.[14] Rentgenogram przedstawia bowiem tylko rzut trójwymiarowego obiektu na płaszczyznę, co nie pozwala na dokładne uwidocznienie nakładających się struktur anatomicznych. Na szczęście zawsze można skorzystać z bardziej zaawansowanej metody obrazowania, jaką jest rentgenowska tomografia komputerowa. Fizycznym podstawom tej techniki poświęcono już w przeszłości osobny tekst w „Fizyce w Szkole".[15]

Warto jednak przypomnieć, że ideą CT (*od ang.* ***C****omputed* ***T****omography*) jest rejestracja wielu cienkich poprzecznych przekrojów ciała (warstw tomograficznych) w płaszczyźnie prostopadłej do osi długiej ciała. Podczas badania pacjent leży na plecach na stole, który wjeżdża w otwór zasadniczej części urządzenia, czyli tzw. gantry. Ukryte wewnątrz okola jedna lub dwie lampy rentgenowskie wirują wokół chorego wraz ze zlokalizowanym po przeciwnej stronie wielorzędowym układem detektorów. Złożenie ruchu postępowego stołu i odbywającego się w płaszczyźnie prostopadłej ruchu obrotowego źródła promieniowania sprawia, że torem poruszania się układu projekcyjnego względem badanego jest spirala.

[14] Pierwszy zakład radiologii otwarto w Glasgow Royal Infirmary już w 1896 roku z inicjatywy dr Johna Macintyre.

[15] T. Kubiak, Tomografia komputerowa, Fizyka w Szkole nr 1 (2014), s. 7- 10.

eprasa.pl 8ee85682dd

Uzyskanie kolejnych przekrojów anatomicznych jest zatem skomplikowane i wymaga zastosowania złożonych algorytmów rekonstrukcyjnych. Przykładowe tomogramy klatki piersiowej ukazuje fot. 4. Oczywiście oprócz zestawu przekrojów możliwe jest uzyskiwanie rekonstrukcji wielopłaszczyznowych oraz prezentacji trójwymiarowych. Dla pulmonologa szczególnie interesująca będzie na pewno wirtualna bronchoskopia, pozwalająca m.in. wykonać przelot wirtualnej kamery przez światło tchawicy i dużych oskrzeli wyłącznie na podstawie danych z CT, czyli bez konieczności wprowadzania tam endoskopu. Badania rentgenowskie mogą dostarczyć naprawdę dużo informacji o stanie naszego układu oddechowego. Warto zatem jeszcze przyjrzeć się bliżej podstawowym nieprawidłowościom związanym z jego funkcjonowaniem.

Wybrane problemy z układem oddechowym oczami fizyka

Czynnikami motywującymi pacjenta do wizyty u pulmonologa mogą być pojawiające się duszności (subiektywne wrażenie braku tchu), zmniejszona zdolność wykonywania wysiłków czy występujący kaszel. Ten ostatni stanowi reakcję odruchową na podrażnienia zakończeń nerwowych w błonie śluzowej drzewa oskrzelowego i opłucnej przez różne czynniki. Mają one charakter termiczny (zmiana temperatury), chemiczny (np. mediatory zapalenia obecne w wydzielinie albo dym tytoniowy czy różne toksyczne opary) bądź mechaniczny (wydzielina lub ciało obce w drogach oddechowych). Kaszel stanowi zatem fizjologiczny odruch obronny organizmu, który pomaga oczyścić i udrożnić drogi oddechowe, w tym krtań, tchawicę i oskrzela. Z punktu widzenia biofizyki składa się z trzech faz: nasilonego wdechu (faza wdechowa), wzmożonego wydechu przy zamkniętej głośni (faza sprężania, w której zwiększa się ciśnienie powietrza w wyniku ściskania płuc i zwężenia dróg oddechowych) oraz szybkiego wypuszczenia powietrza (wraz z napotkanymi drobinami) po gwałtownym otwarciu głośni (faza wypierania).

Należy mieć na uwadze, iż kaszel nie zawsze pomoże usunąć substancję obcą z organizmu. Szczególne niebezpieczeństwo niesie za sobą aspiracja materiału stałego lub płynnego. Duże fragmenty pokarmu mogą nawet zamknąć drogi oddechowe, wywołując dławienie, duszność i sinicę, natomiast mniejsze cząstki, które przejdą pomiędzy strunami głosowymi, przyczynić się do powstania ropnia płuca.

Szczególnie niebezpieczna jest sytuacja, w jakiej cofająca się treść pokarmowa dostanie się do tego narządu a jej kwaśny odczyn spowoduje uszkodzenie błony pęcherzykowo-włośniczkowej oraz zniszczenie surfaktantu pęcherzyków. Rozwijający się stan zapalny będzie wówczas odpowiedzią dróg oddechowych i miąższu płuc na drażniące działanie soku żołądkowego (zawierającego kwas solny i enzymy trawienne), kwasów żółciowych czy innych egzogennych substancji, które przedostały się z przewodu pokarmowego. Warto wspomnieć, że zachłystowe zapalanie płuc stanowi częstą przyczyną zgonu u osób starszych i leżących z zaburzeniami połykania.

W przypadku zakrztuszenia ciałem stałym lub zachłyśnięcia płynem często zachodzi konieczność wykonania bronchoskopii, aby usunąć materiał zalegający w oskrzelach. Co ciekawe, pierwszą w historii bronchoskopię wykonał już w 1897 roku niemiecki laryngolog Gustav Killian, aby wyciągnąć kość wieprzową z dróg oddechowych nieuważnego rolnika. Współcześnie oprócz sztywnych bronchoskopów ze światłowodem stosowane są cienkie i giętkie bronchofiberoskopy. Fizyczne podstawy zabiegów endoskopowych to jednak temat na odrębny artykuł.

Abstrahując od przypadku aspiracji ciała obcego, najczęstszą przyczyną ostrego kaszlu jest infekcja dróg oddechowych. To właśnie opisane wcześniej metody diagnostyki ułatwiają wówczas pulmonologowi rozpoznanie wirusowego czy bakteryjnego zapalenia oskrzeli albo płuc. Dla przykładu podczas osłuchiwania pacjenta z tym ostatnim schorzeniem ujawniają się trzeszczenia oraz tzw. egofonia (wzmożone drżenie głosowe nad obszarem nacieku); badanie przedmiotowe wykazuje lokalne stłumienie odgłosu opukowego a RTG klatki piersiowej zacienienia plamiste o różnej lokalizacji.

Poprawne rozpoznanie ułatwia wprowadzenie skutecznej terapii. Należy bowiem pamiętać, że w przebiegu zapalenia dochodzi do nagromadzenia mikroorganizmów, komórek zapalnych oraz płynu wysiękowego w pęcherzykach płucnych, co utrudnia wymianę gazową, istotnie zaburzając funkcję płuc. W skrajnym przypadku może nawet rozwinąć się niewydolność oddechowa, przebiegająca z hipoksemią (obniżeniem prężności tlenu we krwi tętniczej $PaO_2 < 8$ kPa) oraz towarzyszącą jej hiperkapnią (patologicznie podwyższonym ciśnieniem parcjalnym ditlenku węgla, $PaCO_2 > 6{,}6$ kPa), stanowiącą przyczynek do rozwoju kwasicy oddechowej. Dla zainteresowanych warto dodać, że ocena równowagi kwasowo-zasadowej oraz prężności gazów oddechowych polega na wykonaniu gazometrii krwi tętniczej. W badaniu tym wykorzystywany jest specjalistyczny analizator, którego działanie opiera się oczywiście na fizyce.

Niewiele osób zdaje sobie sprawę z faktu, że oprócz zapalenia płuc o etiologii wirusowej czy bakteryjnej istnieje także zapalenie popromienne. Jak sama nazwa wskazuje nie wynika ono z zakażania patogenami, lecz z narażania na promieniowanie jonizujące pośrednio (rentgenowskie), stosowane podczas radioterapii klatki piersiowej.[16] Wzrost prawdopodobieństwa wystąpienia zapalenia popromiennego ma związek z wielkością dawki pochłoniętej[17], objętością miąższu płuca objętego wiązką, faktem napromieniania węzłów chłonnych oraz prowadzeniem jednoczesnej chemioterapii z użyciem taksanów czy gemcytabiny.[18] Przy ocenie ryzyka często uwzględnia się

[16] O radioterapii nowotworów przeczytać można w artykule: T. Kubiak, Od konwencjonalnej radioterapii fotonowej do terapii hadronowej, czyli fizyka w leczeniu nowotworów, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 6 (2015), s.4-7.

[17] O wpływie promieniowania jonizującego na organizmy żywe traktuje tekst: T. Kubiak, Od naturalnej promieniotwórczości do medycyny nuklearnej. Człowiek a promieniowanie jonizujące, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 5 (2020), s. 4-11.

[18] Wspomnianym chemioterapeutykom poświęcono artykuł: T. Kubiak, Leki cytostatyczne, czyli jak chemia pomaga zwalczać nowotwory, Chemia w Szkole, nr 2 (2017), s. 16-21.

eprasa.pl 8ee85682dd

parametr V20. Stanowi on objętość zdrowych płuc (wyrażoną w % całkowitej objętości tego narządu pomniejszonej o objętość guza), która pochłonęła dawkę ≥ 20 Gy. Co ciekawe, kliniczne objawy zapalenia popromiennego ujawniają się dopiero po 3-12 tygodniach od ekspozycji, a struktura płuca odbudowuje się z silnym włóknieniem.

Wracając do tematyki kaszlu jego przewlekły charakter często wynika z astmy oskrzelowej bądź przewlekłej obturacyjnej choroby płuc, określanej skrótowo mianem POChP. W tym ostatnim przypadku nadmierna obecność wydzieliny w drogach oskrzelowych może stać się przyczyną pojawienia się niedodmy, czyli niewłaściwego upowietrznienia pęcherzyków płucnych. Jest ono widoczne zarówno w badaniu RTG jak i CT. Generalnie POChP to bardzo niebezpieczne schorzenie, które stwierdza się nawet u 10% Polaków po 40 roku życia a na świecie jest jedną z głównych przyczyn zgonów. Czynnik ryzyka stanowi oczywiście palenie tytoniu oraz postępujące zanieczyszczenie środowiska (tzw. niska emisja). Choroba powoduje liczne zmiany patofizjologiczne.

Dla biofizyka istotna jest obturacja, pociągająca za sobą zwiększenie oporów przepływu powietrza w małych oskrzelach i oskrzelikach oraz zmniejszenie sprężystości płuc. Próba kompensacji ograniczonego przepływu powietrza (widocznego w badaniu spirometrycznym) w trakcie spokojnego wydechu wymusza dodatkowe zaangażowanie mięśni wydechowych a tym samym znacznie zwiększa wydatek energetyczny związany z wentylacją.

Gdy chory podejmuje wysiłek fizyczny, może nawet dojść do uwięzienia powietrza w płucach a tym samym ich dynamicznego rozdęcia. Ciśnienie śródpęcherzykowe p_P po zakończeniu wydechu nie będzie wówczas równe atmosferycznemu, tylko nadal od niego wyższe. Konsekwencja to znaczne utrudnienie rozpoczęcia kolejnego wdechu z uwagi na konieczność przezwyciężenia przez mięśnie oddechowe wewnętrznego dodatniego ciśnienia końcowowydechowego (auto-PEEP *od ang.* ***P****ositive* ***E****nd-****E****xpiratory* ***P****ressure*).

Z czasem u chorych na POChP rozwija się rozedma. Jest to trwałe powiększenie przestrzeni powietrznych z towarzyszącym uszkodzeniem ścian pęcherzyków płucnych. Warto podkreślić, iż rozedma, widoczna w badaniu radiologicznym, stanowi nieodwracalne uszkodzenie anatomiczne. Ćwiczenia oddechowe, poprawiające ruchomość przepony, mogą jedynie usprawnić funkcjonowanie tej części płuc, która nie została zniszczona przez chorobę. Z czasem jednak postępujące POChP doprowadza do zaburzenia wymiany gazowej a nawet całkowitej niewydolności oddechowej.

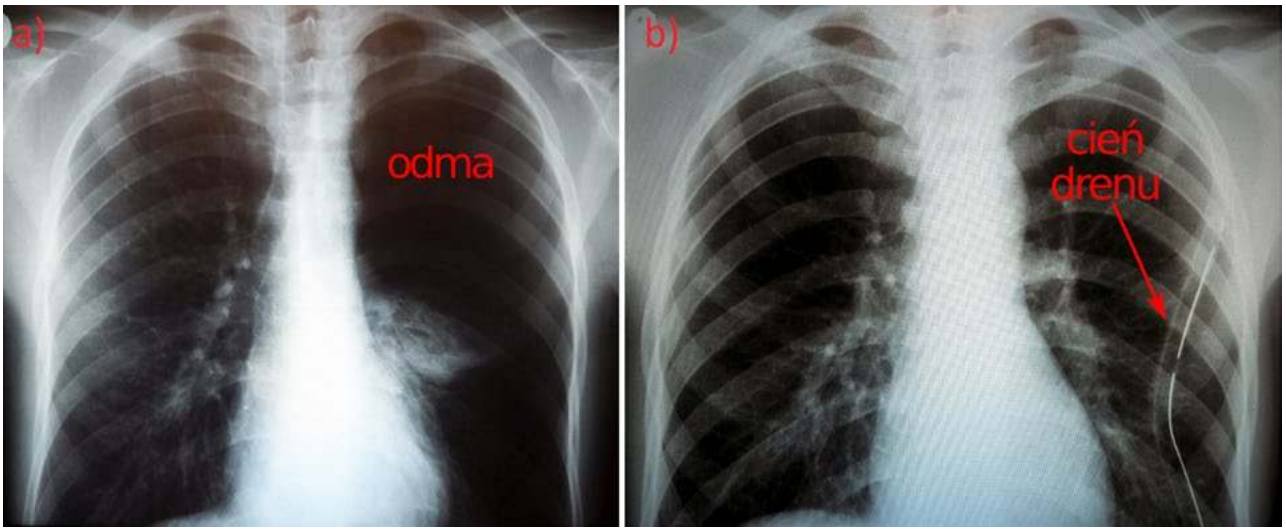
Odma opłucnowa

W pierwszej części artykułu opisano fizyczny mechanizm wentylacji płucnej u osoby zdrowej. W takim przypadku wciąganie powietrza do dróg oddechowych i jego przepływ do pęcherzyków napędza tzw. ciśnienie przezpłucne p:

$$p = p_P - p_{WO}$$

Przypomnijmy także, że w normalnych warunkach ciśnienie wewnątrzopłucnowe p_{WO} jest zawsze niższe niż atmosferyczne p_A i śródpęcherzykowe p_P. Jeśli jednak z jakiś przyczyn do jamy opłucnej dostanie się powietrze, panujące tam ciśnienie p_{WO} zrówna się z ciśnieniem śródpęcherzykowym p_P. Wówczas ciśnienie przezpłucne będzie równe zero a płuco zapadnie się pod wpływem sił sprężystości. Taki stan nazywany jest odmą opłucnową. Jej przyczyną może być zarówno uszkodzenie płuca jak i ściany klatki piersiowej. Mamy zatem odmy samoistne, występujące u młodych, wysokich, wcześniej zdrowych osób, u których pęknięcie pęcherzyków płucnych następuje z nie do końca poznanych powodów oraz odmy pourazowe, będące następstwem obrażeń klatki piersiowej. W tym ostatnim przypadku odma może mieć charakter zarówno zamknięty jak i otwarty a nawet prężny.

Odma zamknięta jest częsta w przypadku ofiar wypadków drogowych, które nie były przypięte pasami w momencie zdarzenia. Uderzenie klatką piersiową w kierownicę lub deskę rozdzielczą często powoduje u nich złamanie żeber, które uszkadzają powierzchnię płuca. Jeśli



Fot. 5. *RTG klatki piersiowej pacjenta* **(a)** *z dużą samoistną, lewostronną odmą opłucnową zaciskającą lewe płuco na szypule naczyniowej;* **(b)** *po całkowitym rozprężeniu lewego płuca, ale z widocznym cieniem drenu.*

eprasa.pl 8ee85682dd

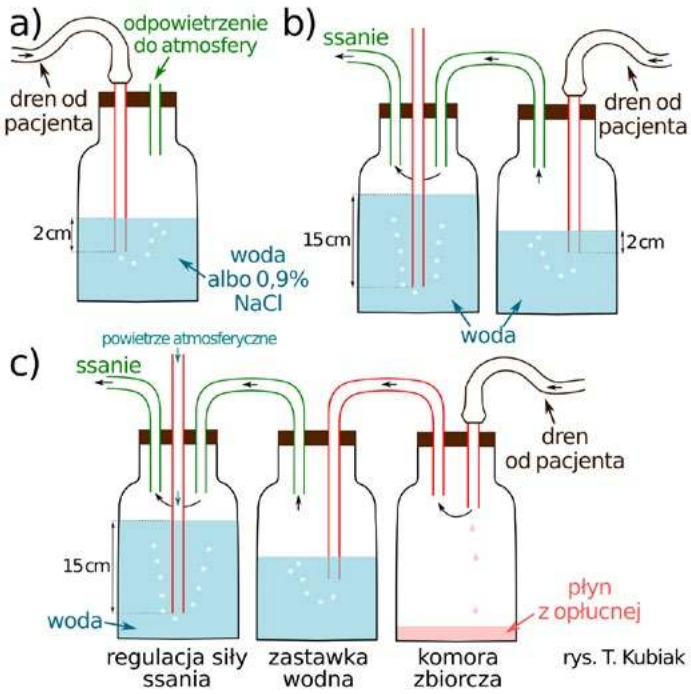
nie doszło do naruszenia powłok ciała do jamy opłucnej jednorazowo dostała się pewna ilość powietrza. Nie ma jednak ona możliwości przechodzić do otoczenia i z powrotem.

Z zupełnie inną sytuacją mamy natomiast do czynienia w odmie otwartej. Przez otwór w klatce piersiowej, powstały np. w wyniku jej przebicia ostrym narzędziem, powietrze swobodnie dostaje się i wydostaje z jamy opłucnej. W płucu z odmą otwartą panuje zatem ciśnienie atmosferyczne, natomiast w drugiej, zdrowej części klatki piersiowej ciśnienie w jamie opłucnej obniża się podczas wdechu a podnosi podczas wydechu.[19] Te cykliczne zmiany ciśnienia spowodowane pracą zdrowego płuca wywołują wówczas tzw. trzepotanie śródpiersia, czyli jego wahadłowe przesuwanie się w lewo i prawo.

W medycynie mówi się też o tzw. oddechu opacznym. Osoba z przebitą klatką piersiową podczas wdechu wciąga bowiem do płuca po zdrowej stronie ciała nie tylko powietrze docierające fizjologicznie przez tchawicę, ale również to pochodzące z drugiego, uszkodzonego płuca, co oczywiście powoduje jego dalsze zapadanie. Z kolei przy wydechu zużyte, bogatsze w CO_2 powietrze nie jest w całości usuwane z organizmu przez tchawicę. Jego część przez oskrzele przedostaje się bowiem do chorego płuca. Mamy zatem patologiczny ruch powietrza między płucami. Oddech paradoksalny pogłębia zaburzoną wentylację i w perspektywie prowadzi do znacznej niewydolności oddechowej. Dlatego w tym przypadku ważne jest szybkie zamknięcie połączenia jamy opłucnej z atmosferą.

Najbardziej niebezpieczną dla życia człowieka postacią odmy jest jej odmiana prężna (nazywana też wentylową lub zastawkową). Dopełnia się ona przy każdym wdechu. Powietrze jest bowiem zasysane przez ranę do uszkodzonej części klatki piersiowej, ale przy wydechu nie może jej opuścić (w otworze wytwarza się mechanizm zastawkowy). W skutek tego $p_{WO} > p_A$ a do tego stale rośnie, gdyż coraz więcej powietrza zbiera się w opłucnej nawet wówczas, gdy płuco zapadanie się już całkowicie. Patologiczne nadciśnienie przesuwa śródpiersie wraz z mieszczącymi się w nim narządami w stronę zdrowego płuca. W konsekwencji ucisk dużych naczyń krwionośnych wywołuje zaburzenia krążenia (np. ograniczenie powrotu żylnego) i upośledzenie pracy serca (np. zmniejszenie jego rzutu).[20]

Aby zapobiec sytuacji, w której ruchy oddechowe (wykonywane coraz szybciej przez pacjenta odczuwającego duszność) będą skutkować postępującym zwiększeniem ciśnienia wewnątrzopłucnowego a tym samym nacisku na obkurczone płuco, należy jak najszybciej ewakuować powietrze z jamy opłucnej. Doraźnie, na miejscu zdarzenia, osoba udzielająca pierwszej pomocy może wykonać to poprzez wkłucie grubej igły z zastawką zrobioną np. z odciętego z obu stron palca rękawiczki gumowej (podczas wydechu powietrze będzie wypływać, natomiast przy wdechu guma zapadnie się i zamknie wylot igły). Ratownicy medyczni, po dokonaniu wkłucia do klatki piersiowej, kaniulę pozostawioną w miejscu odbarczenia odmy zabezpieczają natomiast za pomocą specjalnego opatrunku z zastawką jednokierunkową. Dalej odma leczona jest już szpitalnie z wykorzystaniem drenażu opłucnowego.



Rys. 3. *Różne rozwiązania stosowane przy drenażu jamy opłucnej.* **(a)** *Drenaż bierny, podwodny jednobutlowy,* **(b)** *drenaż czynny (ssący) w systemie dwubutlowym,* **(c)** *układ trójkomorowy.*

W przypadku wszystkich opisanych rodzajów odmy opłucnowej przed podjęciem decyzji o postępowaniu terapeutycznym pulmonolog (bądź torakochirurg)[21] musi przeprowadzić odpowiednią diagnostykę. Wstępem jest oczywiście badanie osłuchowe. W nim stwierdza się brak lub ściszenie szmeru pęcherzykowego po stronie chorej. Przy sprawdzaniu opukowym ujawnia się natomiast odgłos bębenkowy. Najważniejsze jest jednak wykonanie badania obrazowego, czyli RTG klatki piersiowej lub CT. Zdjęcie rentgenowskie, które rejestruje się oczywiście w pozycji stojącej we wspomnianej już projekcji PA, ukaże odsunięcie granicy płuca od ściany klatki piersiowej, brak rysunku naczyniowo-oskrzelowego po stronie chorej oraz ewentualne przesunięcie śródpiersia.[22] Przykładowe RTG klatki piersiowej pacjenta z dużą samoistną, lewostronną odmą opłucnową zaciskającą lewe płuco na szypule naczyniowej pokazuje fot. 5a. Badanie rentge-

[19] Należy pamiętać, że lewe i prawe płuco rozdziela śródpiersie a każde z nich jest otoczone osobnym workiem opłucnej.

[20] O biofizycznych podstawach działania układu sercowo-naczyniowego traktuje artykuł: T. Kubiak, Fizyka u kardiologa, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 3 (2023), s. 4-11.

[21] Torakochirurg zajmuje się operacyjnym leczeniem chorób i urazów klatki piersiowej (z wyjątkiem serca).

[22] RTG nie wykonuje się w pozycji leżącej na plecach, bo wolne powietrze w jamie opłucnowej przesuwa się do przodu i zrzutowane na płaszczyznę obrazu krawędzie płuc mogą wówczas sięgać ścian nawet przy dużej odmie.

eprasa.pl 8ee85682dd

nowskie pozwala ocenić wielkość odmy, a zatem ułatwia podjęcie decyzji o sposobie jej odbarczenia.

Jeśli szerokość komory odmowej jest mała, istnieje szansa, że gazy oddechowe ulegną samoistnej resorpcji. W takim przypadku stosuje się leczenie zachowawcze, tzn. pacjent pozostaje w spoczynku w domu, wystrzega się wysiłków fizycznych i wykonuje zalecone ćwiczenia oddechowe. Duża odma musi być odbarczana z zastosowaniem drenażu jamy opłucnej (rys. 3). Może on mieć formę czynną (ciśnienie ssania od -10 do -20 cmH_2O) lub bierną (drenaż podwodny). Lekarz nacina skórę, wytwarza niewielki otwór w tkankach międzyżebrza, przedziurawia opłucną ścienną a następnie wprowadza dren, kierując go do szczytu płuca i mocując szwem do ściany klatki piersiowej. Poprawność założenia drenu powinna zostać zweryfikowana radiologicznie. Wychodzący z klatki piersiowej przewód musi zostać połączony z układem przepływu jednokierunkowego.[23]

W najprostszym przypadku (drenaż bierny, podwodny jednobutlowy, rys. 3 a) koniec rurki zostanie po prostu zanurzony w jałowej wodzie lub roztworze soli fizjologicznej na głębokość 2-3 cm.[24] Najistotniejsze jest, aby górna granica cieczy w zbiorniku znajdowała się co najmniej 40 cm poniżej klatki piersiowej pacjenta. W początkowej fazie leczenia gaz ulatuje z jamy opłucnej w sposób ciągły. Po osiągnięciu ujemnego ciśnienia wewnątrzopłucnowego powietrze wydobywa się przez ciecz tylko podczas wydechu, natomiast podczas wdechu woda jest lekko zasysana ku górze (ruchy małych objętości cieczy w drenie podczas oddechu potwierdzają jego drożność). W miarę normującej się sytuacji pęcherzyki powietrza uchodzą do wody tylko przy siłowym wydechu. Zniknięcie bąbelków z układu z zastawką wodną wskazuje, iż odma została ewakuowana i nastąpiło swobodne rozprężenie płuca. Po kontroli RTG można wówczas usunąć dren.

Nieco bardziej zaawansowaną i zdecydowanie częściej współcześnie stosowaną formą drenażu jest układ czynny dwu (rys. 3 b) lub trójkomorowy (rys. 3 c). W systemie z dwiema butlami, pierwsza z nich (patrząc od strony pacjenta) stanowi zastawkę wodną. Drugie naczynie, również częściowo wypełnione H_2O, umożliwia regulację siły ssania. Oprócz dwóch wlotów przewodów (jeden z nich połączony jest z instalacją próżni medycznej) posiada ono rurkę, która z jednej strony zanurzona jest w cieczy, a z drugiej otwarta na powietrze atmosferyczne. Zagłębienie rurki na głębokość 15 cm w wodzie sprawi, że ciśnienie ssące nie przekroczy 15 cm słupa H_2O, czyli $\approx$ 1,5 kPa.[25]

Warto dodać, iż zestaw trójkomorowy posiada jeszcze położony od strony chorego dodatkowy pojemnik, pozwalający gromadzić płyn ewentualnie wydostający się z opłucnej. Kluczem do poprawnego działania systemu i utrzymania ujemnego ciśnienia jest szczelność wszystkich elementów, drenów oraz łączników. Ewentualny transport pacjenta z drenem (np. do pracowni rentgenowskiej) wymusza zaciśniecie przewodu i odłączenie od urządzenia. Dlatego współcześnie coraz popularniejsze są przenośne, jednorazowe zestawy do drenażu opłucnej. Sprawiają, że pacjent nie musi być na stałe przykuty do łóżka. W stosunkowo niewielkim, lekkim pojemniku z poliwęglanów znajdują się trzy rozdzielone komory: zbiorcza, zastawki wodnej, regulująca siłę ssania oraz dodatkowo: automatyczny zawór upustowy, manometr pacjenta i regulator mechaniczny (dodatkowa korekta siły ssania bez konieczności zmiany poziomu wody). Dzięki takiej konstrukcji możliwy jest zarówno drenaż czynny, jak i bierny grawitacyjny. Fot. 5b ukazuje RTG klatki piersiowej pacjenta już po całkowitym rozprężeniu lewego płuca, ale jeszcze z widocznym cieniem drenu, który po tym badaniu został wyjęty.

Pulmonologia to niezwykle ciekawy dział medycyny. Szczególną rolę odgrywa w nim znajomość praw fizyki a w szczególności mechaniki płynów. Diagnostyka chorób układu oddechowego bazuje również na wiedzy z akustyki oraz odpowiednim wykorzystaniu promieniowania rentgenowskiego. Miejmy zatem świadomość, że osiągnięcia fizyki to nie tylko wzory i teorie, ale przede wszystkim praktyczne rozwiązania służące społeczeństwu.

dr Tomasz Kubiak
biofizyk i fizyk medyczny
Akademia Nauk Stosowanych im. Hipolita Cegielskiego w Gnieźnie

LITERATURA:

[1] C. Peracchia, Respiratory Mechanics [w:] Lung Function In Health And Disease: Basic Concepts of Respiratory Physiology and Pathophysiology, Bentham Science Publishers, Sharjah, 2014, s. 47-79.
[2] A. Michajlik, W. Ramotowski, Anatomia i fizjologia człowieka, PZWL, Warszawa 2007, s. 264-279.
[3] A. Pilawski, K. Narożny, Biofizyka układu oddechowego [w:] Biofizyka pod. red. F. Jaroszyka, PZWL, Warszawa 2008, s. 593-604.
[4] Anestezjologia i intensywna terapia, pod red. B. Kamińskiego i A. Küblera, PZWL, Warszawa, 2002, s. 181-184, 209-210.
[5] Jan Fibak, Chirurgia klatki piersiowej [w:] Chirurgia podręcznik dla studentów. PZWL, Warszawa, 2002, s. 231-271.
[6] A. Zasowska-Nowak, Zaburzenia ze strony układu oddechowego [w:] Medycyna paliatywna, pod. red. A. Ciałkowskiej-Rysz oraz T. Dzierżanowskiego, Termedia, Poznań, 2019, s. 168-218.
[7] H. Hafke-Dys, Artificial Intelligence Approach to the Monitoring of Respiratory Sounds in Asthmatic Patients, Front. Physiol. 12, (2021), 745635.
[8] R. Filipowicz, Historia stetoskopu, Warszawa 2012 (https://www.stetoskop.pl/o-stetoskopach/historia-stetoskopu; dostęp 24 II 2024 r.) oraz „Budowa i działanie stetoskopu", (https://www.stetoskop.pl/o-stetoskopach/budowa-i-dzialanie; dostęp 24 II 2024 r.).
[9] M. Wiercińska, Osłuchiwanie płuc i szmery oddechowe: szmer pęcherzykowy, szmer oskrzelowy, rzężenie, świst i furczenie w płucach. Medycyna Praktyczna z 18.05.2022. (https://www.mp.pl/pacjent/objawy/298316,osluchiwanie-pluc-i-szmery-oddechowe, dostęp 24 II 2024 r.).
[10] W. Droszcz, Choroby układu oddechowego, [w:] Choroby wewnętrzne, pod red. F. Kokota, PZWL Warszawa, 2003, s. 201-256.
[11] Badania czynnościowe układu oddechowego [w:] Interna Szczeklika. Praca zbiorowa. Podręcznik chorób wewnętrznych 2014, Medycyna Praktyczna. Kraków 2014, s. 600-611.
[12] M. Świerczyńska-Krępa i inni, Choroby dróg oddechowych [w:] Interna Szczeklika. Praca zbiorowa. Podręcznik chorób wewnętrznych 2014, Medycyna Praktyczna. Kraków 2014, s. 635-681.

[23] Miłośników historii zainteresuje fakt, że pierwszy przyrząd do drenażu (tzw. aspirator) skonstruował francuski kardiolog Pierre'a Potain w połowie XIX wieku.

[24] O wodzie i soli fizjologicznej w kontekście biofizyki oraz medycyny przeczytać można w artykule: T. Kubiak, Biofizyka a niezwykłe właściwości wody, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 4 (2021), s. 4-11.

[25] W praktyce stosuje się ciśnienia ssące 1-1,5 kPa

eprasa.pl 8ee85682dd

Światowy Dzień Kwantu

Foto – Dreamstime

***Światowy Dzień Kwantu*, który przypadał w niedzielę 14 kwietnia 2024 r. jest od trzech lat corocznym świętem promującym świadomość społeczną i zrozumienie nauki i technologii kwantowej na całym świecie.[1]**

Kazimierz **Mikulski**

Teoria kwantowa jest teorią naukową, która odniosła największy sukces w historii. Wiele wielkich nazwisk fizyki jest związanych z teorią kwantową. Heisenberg i Schrödinger ustalili matematyczną formę teorii, podczas gdy Einstein i Bohr przeanalizowali wiele jej ważnych cech. Jednak to John Bell najgłębiej zbadał teorię kwantową i ustalił, co ta teoria może nam powiedzieć o podstawowej naturze świata fizycznego.[2]

Dlaczego akurat 14 kwietnia? Jest to nawiązanie do liczby 4,14, czyli zaokrąglonych pierwszych cyfr stałej Plancka: $4{,}1356677\times10^{-15}$ eV·s = 0,000 000 000 000 004 1356677 (elektronowolt sekunda) – iloczyn energii i czasu, jako podstawowa stała rządząca fizyką kwantową.[3]

Cele

Obchody *Światowego Dzienia Kwantu* mają na celu zaangażowanie opinii publicznej w zrozumienie i dyskusję na temat nauki i technologii kwantowej, a mianowicie: jak pomaga nam zrozumieć naturę na jej najbardziej podstawowym poziomie, jak pomaga nam opracować technologie, które są kluczowe dla naszego dzisiejszego życia i jak może doprowadzić do przyszłych rewolucji naukowych i technologicznych oraz jak mogą one wpłynąć na nasze społeczeństwo.

Światowy Dzień Kwantu to inicjatywa naukowców zajmujących się kwantami z całego świata, zapoczątkowana 14 kwietnia 2021 r. w ramach odliczania do pierwszego światowego święta przypadającego 14 kwietnia 2022 r. Jest to inicjatywa zdecentralizowana i oddolna, zapraszająca wszystkich naukowców, inżynierów, pedagogów, komunikatorów, przedsiębiorców, technologów, historyków, filozofów, artystów, muzealników, producentów itp. oraz ich organizacje do rozwijania własnych działań, takich jak docieranie do odbiorców poprzez pogadanki, wystawy, zwiedzanie laboratoriów, dyskusje panelowe, wywiady, kreacje artystyczne itp. na całym świecie. Święto „*promujące świadomość społeczną i zrozumienie nauki i technologii kwantowej na całym świecie*" to oddolna inicjatywa naukowców z ponad 65 krajów, od Algierii po Zambię.

Może trochę irytująca jest sama data. Jeśli nie mieszkamy w USA, 14 kwietnia to na pewno 14,4, a nie 4,14. Poza tym zawsze znamy i najczęściej stosujemy stałą Plancka jako $6{,}63 \times 10^{-34}$ Js, a nie $4{,}14 \times 10^{-15}$ eVs.

Ta inicjatywa to zarazem wspaniałe czasy dla fizyki kwantowej, w której rozwijają się zastosowania technologii „**kwantowej 2.0**", takie jak obliczenia kwantowe, wykrywanie i kryptografia.

James McKenzie w swoim artykule[4], informuje, że według raportu *State of Quantum 2024,*[5] całkowite inwestycje prywatne w technologię kwantową wyniosły w 2023 r. 1,2 miliarda dolarów. Niestety, liczba ta gwałtownie

[1] https://worldquantumday.org/
[2] https://physicsworld.com/a/john-bell-profound-discovery-science/
[3] Ibidem
[4] https://physicsworld.com/a/why-you-shouldnt-be-worried-about-talk-of-a-quantum-winter/
[5] Raport o stanie kwantowym 2024 min. https://www.meetiqm.com/newsroom/press-releases/state-of-quantum-report-2024

eprasa.pl 8ee85682dd

spadła w stosunku do 2021 r. oraz 2022 r. Wówczas w naukę kwantową przeznaczono aż 2,2 miliarda dolarów każdego roku ze środków publicznych.

Na finansowanie z publicznych środków badań nad technologią kwantową zdecydowało się ponad 30 rządów. Zobowiązano się przeznaczyć ponad 40 miliardów USD w ciągu najbliższych 10 lat. Dzięki temu krajowe laboratoria i centra obliczeń kwantowych przyspieszyły prace nad praktycznymi zastosowaniami powstało też wiele dedykowanych centrów i węzłów obliczeń kwantowych.

Kluczowe tematy

W raporcie zwrócono uwagę na „*kluczowe tematy z wywiadów z liderami w całym kwantowym łańcuchu wartości:*

- *Rozwijanie wewnętrznej wiedzy kwantowej i gotowości staje się najwyższym priorytetem dla wiodących organizacji w sektorach takich jak usługi finansowe i farmaceutyka.*
- *Eksperci są zgodni co do krótkoterminowego znaczenia kwantowych systemów hybrydowych, uznając ich potencjał w zakresie odblokowania natychmiastowej wartości dla przedsiębiorstw.*
- *Kwantowej zimy nie ma, ale krajobraz inwestycyjny jest z pewnością chłodniejszy. Start upy muszą zachować realizm i ostrożnie zarządzać planami finansowania.*
- *Rządy są ważnym źródłem cierpliwego kapitału, który zapewnia długoterminowe wsparcie dla technologii kwantowych i pozwala przezwyciężyć wysokie początkowe koszty badań i rozwoju.*
- *Sztuczna inteligencja i obliczenia kwantowe to technologie, które mogą czerpać wzajemne korzyści, co wynika z wielu wczesnych badań dotyczących przypadków użycia, takich jak chemia generatywna i cyfrowe bliźniaki. Inwestorzy powinni jednak zadbać o to, aby szum wokół sztucznej inteligencji nie kanibalizował uwagi na technologię kwantową.*”

Jedną z osób posiadających przegląd technologii kwantowej jest Mauro Paternostro z Queens' University w Belfaście, redaktor naczelny czasopisma *Quantum Science and Technology*.[6] To multidyscyplinarne czasopismo poświęcone publikowaniu badań o najwyższej jakości i znaczeniu, obejmujących naukę i zastosowanie wszystkich technologii kwantowych. Mauro Paternostro w obszernym wywiadzie, przekonuje, że najbardziej zaawansowaną technologią kwantową jest tak naprawdę wykrywanie kwantowe.

Z kolei, jak wskazuje Steve Brierley, dyrektor naczelny Riverlane,[7] w swojej opinii, komputery kwantowe będą właściwie użyteczne tylko wtedy, gdy będziemy w stanie właściwie poradzić sobie z korekcją błędów pomiarowych. Steve Brierley założył Riverlane w 2016 r., aby zbudować stos korekcji błędów dla komputerów kwantowych. Kierując się przekonaniem, że odporne na awarie komputery kwantowe przyspieszą postęp ludzkości, Riverlane współpracuje z wiodącymi producentami sprzętu kwantowego, aby stało się to szybciej.[8]

Technologia kwantowa jest bardzo obiecująca, także w Afryce, gdzie następuje „*stały postęp*”. Dorobek afrykańskich badaczy w dziedzinach związanych z kwantami jest stosunkowo niewielki, ale biorąc pod uwagę młodą, cyfrową populację i rosnącą siłę roboczą kwantową, uważa się, że kontynent jest „*gotowy do wykorzystania nadchodzącej «drugiej rewolucji kwantowej»*”.[9]

Technologia „kwantowa 2.0”

Cytowany wcześniej James McKenzie wskazuje „*Dlaczego nie powinieneś się martwić mówieniem o „zimie kwantowej*” pod adresem w Internecie https://physicsworld.com/a/why-you-shouldnt-be-worried-about-talk-of-a-quantum-winter/

Niedawny spadek globalnych inwestycji prywatnych w technologię kwantową doprowadził do sugestii, że sektor zmierza w stronę pogorszenia koniunktury. James McKenzie jest niewzruszony i wierzy, że przyszłość sektora jest jasna. Technologia kwantowa to już nie tylko półprzewodniki, kropki kwantowe, mikroskopy elektronowe i lasery, które są technologiami „*pierwszej generacji*”. Zamiast tego skupiamy się na wykorzystaniu superpozycji, niepewności i splątania do opracowania technologii kwantowych „*drugiej generacji*”.

Taka technologia „*kwantowa 2.0*” mogłaby zrewolucjonizować wszystko, od obliczeń i pomiarów po wykrywanie, synchronizację i obrazowanie. Niezależnie od tego, czy chodzi o inżynierię, transport, nawigację, finanse, obronność czy lotnictwo, technologia kwantowa może również zakłócić gospodarkę. W rzeczywistości większość wiodących krajów ma obecnie strategię kwantową, chociaż Chiny przodują pod tym względem – przeznaczają prawie dwukrotnie więcej środków niż kraje EU i ośmiokrotnie więcej niż USA. r.[10]

Spadek inwestycji doprowadził do sugestii, że zmierzamy w stronę „*zimy kwantowej*”,[11] co wydaje się

[6] https://iopscience.iop.org/journal/2058-9565
[7] https://www.riverlane.com/
[8] https://www.riverlane.com/team/steve-brierley
[9] *Kwantowa przyszłość Afryki jest światełkiem nadziei*, https://physicsworld.com/a/africas-quantum-future-offers-a-beacon-of-hope/
[10] Więcej na stronie o adresie https://www.mckinsey.com/featured-insights/sustainable-inclusive-growth/chart-of-the-day/betting-big-on-quantum
[11] https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/tech-forward/is-winter-coming-quantum-computings-trajectory-in-the-years-ahead

eprasa.pl 8ee85682dd

dramatyczne, ale być może po prostu odzwierciedla pogląd, że inwestorzy coraz bardziej dostrajają się do rynków wschodzących i uznają, że praktyczne zastosowania obliczeń kwantowych mogą nadal być wiele lat stąd. Pomimo całego szumu technologia kwantowa pozostaje sektorem niszowym, stanowiącym mniej niż 1% całkowitego finansowania kapitału wysokiego ryzyka na całym świecie. Według raportu opublikowanego w zeszłym roku przez *Markets and Markets*, do 2028 r. sektor obliczeń kwantowych może być wart oszałamiającą kwotę 4,4 miliarda dolarów.[12]

1000 kubitowy komputer IBM

W tym sektorze trwa wyścig, a IBM ogłosił niedawno **komputer o pojemności 1000 kubitów** (*Sprzęt i oprogramowanie na miarę ery użyteczności kwantowej już tu są. Wkroczyliśmy w nową erę obliczeń kwantowych***.**)[13] Firma podąża za planem obliczeń kwantowych, który co roku mniej więcej podwaja liczbę kubitów. W 2021 r. IBM miał urządzenie o pojemności 127 kubitów, a w 2022 r. o pojemności 433 kubitów. Jego najnowszy chip, nazwany ***Condor***, ma 1121 kubitów nadprzewodzących. Firma twierdzi, że teraz zmieni bieg i skupi się na zwiększaniu odporności swoich maszyn na błędy, ponieważ wyraźnie będzie to miało wpływ na możliwość korzystania z nich przez potencjalnych klientów w najbliższej przyszłości.

Jednym z zastosowań technologii kwantowej 2.0 jest kwantowe wykrywanie grawitacji, którego celem jest uzyskanie urządzeń możliwych do zastosowania w terenie. Zrozumienie tego, co kryje się pod ziemią, może wpłynąć na nasze codzienne życie, a mapowanie za pomocą kwantowych czujników grawitacji jest pomocne, a Delta.g, spółka z Uniwersytetu w Birmingham, zebrała już 1,5 miliona funtów w 2023 r. na budowę czujników grawitacji kwantowej do mapowania pod ziemią. Pete Stirling, współzałożyciel i dyrektor naczelny firmy, twierdzi, że jej celem jest opracowanie technologii do zastosowania w rzeczywistych warunkach, takich jak wyszukiwanie ukrytej infrastruktury i przeprowadzanie napraw.[14]

„*Biorąc pod uwagę szerokie zastosowania w niezliczonych branżach, jesteśmy niezwykle podekscytowani możliwością wykorzystania gradiometrii kwantowej do osiągnięcia ogromnych oszczędności i przyspieszenia prac nad mapowaniem w sposób poprawiający codzienne życie*" – mówi Stirling. Przydatna byłaby baza danych „Mapy Google" z możliwością powiększania i przeszukiwania, zawierająca wszystkie niezliczone rury, tunele i kable ukryte pod naszymi stopami.

Chociaż osiągnięcie pełnego potencjału komputerów kwantowych może zająć wiele lat, istnieją zastosowania bardziej długoterminowe, w wykrywaniu i synchronizacji, w przypadku których cele końcowe są jasne. Komercjalizacja produktów w tej, jednej z najbardziej ekscytujących gałęzi fizyki jest w pełnym rozkwicie.

dr Kazimierz Mikulski
Maksymilianowo

[12] https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/quantum-computing-market-144888301.html
[13] https://www.ibm.com/quantum/blog/quantum-roadmap-2033
[14] https://www.delta-g.co.uk/

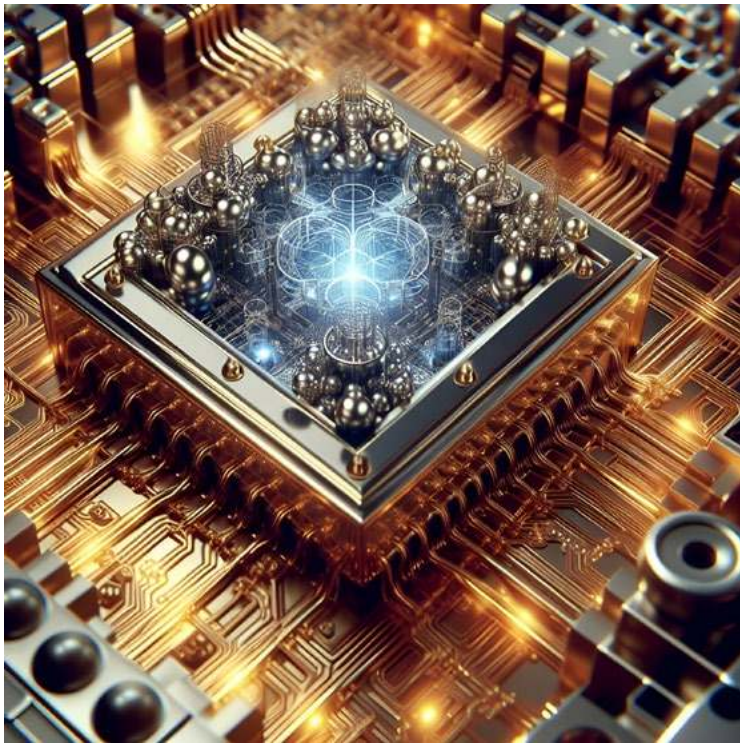
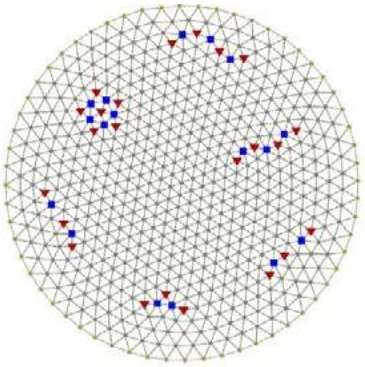


Foto – Adobe Stock

eprasa.pl 8ee85682dd

Przewidziany 90 lat temu kryształ istnieje

W „Nature" ukazał się artykuł, w którym zespół naukowców z Uniwersytetu Princeton w USA podali, żę znaleziono pośrednie dowody na powstanie kryształu Wignera.



Fotografia 1. Eugene Paul Wigner (1902-1995) był węgiersko-amerykańskim fizykiem teoretycznym, który również wniósł wkład w fizykę matematyczną. W 1963 r. otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki „za wkład w teorię jądra atomowego i cząstek elementarnych, w szczególności poprzez odkrycie i zastosowanie podstawowych zasad symetrii". https://en.wikipedia.org/wiki/Eugene_Wigner. Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/e/ef/Wigner.jpg

Rysunek 1. Struktura dwuwymiarowego kryształu Wignera w parabolicznej pułapce potencjału z 600 elektronami. Trójkąty i kwadraty oznaczają położenie defektów topologicznych. Źródło: https://en.wikipedia.org/wiki/Wigner_crystal#/media/File:Wigner_cluster_600.png

Kryształ Wignera to stała (krystaliczna) faza elektronów, przewidziana przez Eugene'a Wignera w 1934 r. Gaz elektronów poruszający się w jednolitym, obojętnym, neutralizującym tle (tj. *Model Jellium*)[1] wykrystalizuje i utworzy sieć jeśli gęstość elektronów jest mniejsza niż wartość krytyczna. Dzieje się tak, ponieważ energia potencjalna dominuje nad energią kinetyczną przy niskich gęstościach, dlatego ważny staje się szczegółowy układ przestrzenny elektronów. Aby zminimalizować energię potencjalną, elektrony tworzą siatkę bcc[2] w 3D, trójkątną siatkę w 2D i równomiernie rozmieszczoną siatkę w 1D.[3]

Twierdzenie Wignera, udowodnione przez Eugene'a Wignera w 1931 r., jest kamieniem węgielnym matematycznego sformułowania mechaniki kwantowej. Twierdzenie to określa, w jaki sposób symetrie fizyczne, takie jak rotacje, translacje i transformacje CPT, są reprezentowane w przestrzeni stanów Hilberta.[4]

– *Kryształ Wignera to jedna z najbardziej fascynujących faz kwantowych materii, jaka została przewidziana* – mówi Al Yazdani, profesor fizyki na Uniwersytecie Princeton, jeden z autorów badania. - *Wizualizacja tego kryształu pozwala nam nie tylko obserwować jego powstawanie, potwierdzając wiele jego właściwości, ale także badać w nowy sposób, którego nie znaliśmy w przeszłości.*[5]

Czym w ogóle miał być kryształ Wignera i jak wyglądały jego poszukiwania?

Jak przewidywał wspomniany naukowiec, badany przez niego kryształ powinien tworzyć się w bardzo niskich temperaturach i gęstościach. W takich warunkach odpychanie zachodzące między elektronami powinno prowadzić do zdominowania energii potencjalnej nad ich potrzebą powiększania się. Tak tworzyłyby się krystaliczne sieci podlegające zasadom mechaniki kwantowej.

Przy licznych pośrednich dowodach na istnienie kryształu Wignera, członkowie zespołu badawczego odpowiedzialnego za najnowsze ustalenia zaprojektowali własny eksperyment. Wykorzystali pola magnetyczne, aby wywołać wzbudzenie elektronowe kryształu Wignera w grafenie. Arkusze tego ostatniego materiału zostały schłodzone do temperatury o ułamek stopnia Celsjusza powyżej zera absolutnego, czyli najniższej temperatury spotykanej we wszechświecie.[6] Później trzeba było przeprowadzić bardzo szczegółowe obserwacje, które miały wykazać, czy przewidywania mają odzwierciedlenie w rzeczywistości. W tym celu fizycy posłużyli się skaningową mikroskopią tunelową, która pozwala dostrzec to, czego nie uwiecznią klasyczne mikroskopy optyczne. W takich okolicznościach udało się uzyskać ostateczny dowód na istnienie kryształu Wignera, a niemal stuletnia zagadka może zostać uznana za rozwikłaną.

Dalsze analizy wykazały jeszcze jedną cechę tej unikalnej struktury. Okazało się, że gdy już kryształ Wignera powstanie, utrzymuje on swoją strukturę w znacznie większym zakresie gęstości, niż zakładano wcześniej. Warto zauważyć, że w przeciwieństwie do klasycznych kryształów, elektrony nie zajmują punktowych miejsc w sieci, a wykazują silny ruch w punkcie zerowym. Elektrony poruszają się w zakresie odległości równym 1/3 odległości między elektronami tworzącymi sieć. Mamy zatem do czynienia z zupełnie nowym rodzajem kryształu kwantowego.

Opr. Kazimierz Mikulski

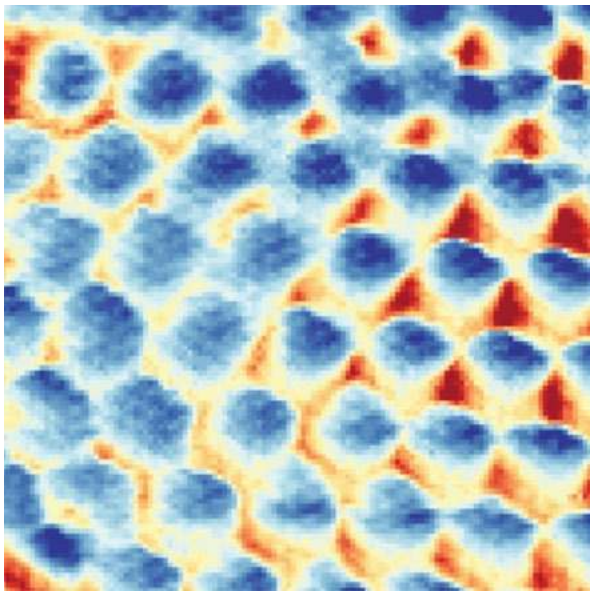


Foto 3. Obraz kryształu Wignera uzyskany dzięki skaningowemu mikroskopowi tunelowemu. Yen-Chen Tsui, Princeton University.

[1] Więcej na stronie o adresie https://en.wikipedia.org/wiki/Jellium
[2] https://en.wikipedia.org/wiki/Cubic_crystal_system
[3] https://en.wikipedia.org/wiki/Wigner_crystal
[4] https://en.wikipedia.org/wiki/Wigner%27s_theorem
[5] https://wyborcza.pl/7,75400,30889357,krysztal-wignera-fizycy-po-raz-pierwszy-sfotografowali-kwantowy.html
[6] https://www.chip.pl/2024/04/krysztal-wignera-potwierdzone-istnienie

eprasa.pl 8ee85682dd

Techniki wysokiej próżni w fizyce doświadczalnej

Wysoka próżnia, do niedawna stosowana w ograniczonym zakresie w jedynie nielicznych badaniach fizycznych oraz fabrykach lamp elektronowych, zaczęła szybko przenikać do innych działów nauki i techniki, zwłaszcza w związku z pojawieniem się nowych przyrządów elektronowych opartych na różnych zastosowaniach ciała stałego. Stało się to możliwe dzięki różnym pracom teoretycznym i doświadczalnym prowadzonych przez fizyków i inżynierów z całego świata w zakresie nauki i techniki próżniowej.

Andrzej **Wasiak**

Wiele badań doświadczalnych i procesów technologicznych nowoczesnego przemysłów jak również liczne urządzenia techniczne wymagają wysokiej próżni, tj. takich warunków, w których nie występują niepożądane gazy czy to w postaci swobodnej, tj. jako gazy objętościowe, czy to w postaci związanej, tzn. gazy powierzchniowe i gazy wewnątrz ciał.

Gazy objętościowe w urządzeniach takich jak mikroskopy elektronowe, akceleratory, implantatory, napylarki itp. mogą zakłócić ruch różnych cząstek, w urządzeniach takich jak żyroskopy – ruch wirowy tarcz lub innych ruchomych części. Gazy powierzchniowe utrudniają otrzymywanie czystych powierzchni niezbędnych przy badaniu własności ciał lub przy prowadzeniu niektórych procesów technologicznych.

W innych zastosowaniach wysokiej próżni zachodzi konieczność szybkiego usuwania dużych ilości gazów, wydzielanych podczas procesów badawczych (np. w urządzeniach plazmy wysokotemperaturowej) lub procesów przemysłowych na przykład (metalurgii próżniowej).

Jeśli chodzi o samą technikę wysokiej próżni to w chwili obecnej stała się samodzielną dziedziną techniki i podobnie jak wiele innych dziedzin techniki wyłoniła się z fizyki, podstawy wszystkich nauk technicznych.

1. Pompy próżniowe

W naszym czasopiśmie opisywano już budowę i działanie pompy rotacyjnej łopatkowej i pompy dyfuzyjnej.

Oprócz tych pomp istnieje wiele różnych pomp próżniowych, których opisem zajmiemy się poniżej.

1.1. Pompy bezsmarowe obrotowe

Zalety pomp bezsmarowych

Głównymi wadami pomp obrotowych jest zmniejszenie się szybkości pompowania w zakresie niskich ciśnień ($p<1$ Pa) oraz wprowadzanie par oleju do obszaru pompowanego. Wady te są usunięte w znacznym stopniu w pompach obrotowych bezsmarowych.

Wśród pomp bezsmarowych główne znaczenie mają pompy typu Rootsa.

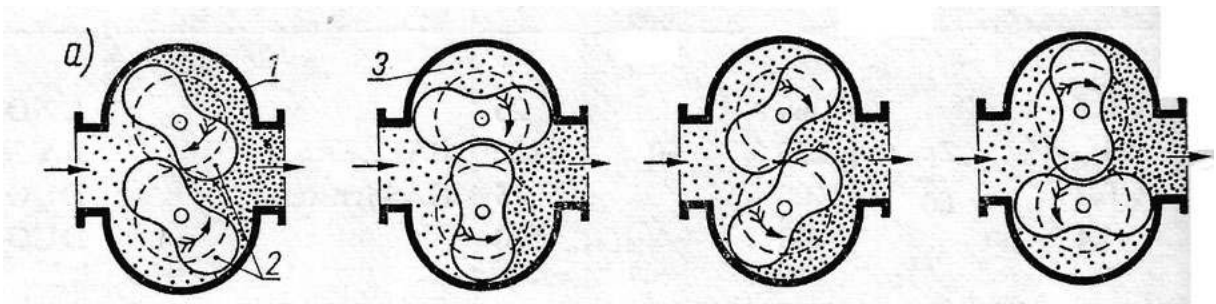
Pompy typu Rootsa

Do pokrycia zakresu ciśnień 0,1 do 100 Pa stosuje się pompy, których działanie na zasadzie zastosowanej w 1867 roku przez Rootsa do budowy dmuchaw.

Pompy obrotowe (wielowirnikowe) typu Rootsa nie wymagają smarów dla zmniejszenia tarcia, gdyż unika się styku przez wprowadzenie bardzo małych szczelin. Nieszczelności te powodują zmniejszenie szybkości pompowania i podwyższają ciśnienie końcowe, jednak „czystość" próżni końcowej, jak również duża szybkość pompowania uzyskana dzięki dużym szybkościom obrotowym stanowią poważne zalety pomp Rootsa.

Warto wspomnieć, że pompy Rootsa znalazły również zastosowanie w motoryzacji. Stosuje się one jako kompresory służące do „doładowania" silników spalinowych celem zwiększenie ich mocy.

Na rysunku 1 przedstawiono schematycznie przekrój tego rodzaju pompy oraz położenia wirników w kolejnych



Rys. 1. Zasada budowy i działania pompy Rootsa. 1 – stator, 2 – wziernik, 3 – wnęka

eprasa.pl 8ee85682dd

fazach obrotu. Ma ona dwa wirniki takiego kształtu, iż przy synchronicznym ich obracaniu (w kierunku strzałek) szczelina między nimi jest dostatecznie mała (rzędu kilku setnych milimetra). Również mała jest szczelina między wirnikami a statorem. Wirniki obracają się z prędkością rzędu kilkuset radianów na sekundę.

Efekt pompowania pompy Rootsa wynika z różnicy natężenie przepływu gazu I_+ (od wlotu pompy do wylotu pompy) wywołanego wirowaniem wirników i natężenia przepływu pierwotnego I_- (od wylotu pompy, gdzie panuje ciśnienie p_0 do wlotu pompy, gdzie panuje niższe ciśnienie p); ten przepływ powrotny zachodzi wskutek istnienia szczelin między wirnikami oraz między wirnikami a statorem.

Natężenie przepływu w kierunku pompowania, wywołane wirowaniem wirników można przedstawić wzorem

$$I_+ = S_g \cdot p\,, \tag{1}$$

w którym S_g jest szybkością pompowania wynikającą z objętości wnęk V_{wn}, tzn. z obszaru między wirnikami a statorem, oraz prędkość wirników N'_ω, przy czym

$$S_g = V_{wn} \cdot N'_\omega\,. \tag{2}$$

Natężenie przepływu w kierunku przeciwnym, wywołane nieszczelnościami, wyraża się wzorem

$$I_- = G_s \cdot (p_0 - p)\,, \tag{3}$$

gdzie G_s jest przewodności szczelin; p – ciśnienie u wlotu; p_0 zaś na wylocie pompy.

Efekt pompowania skutecznego jest różnicą wyrażeń (3) i (1)

$$I_p = I_+ - I_- = S_g \cdot p - G_s \cdot (p_0 - p)\,, \tag{4}$$

1.2. Pompy prędkościowe

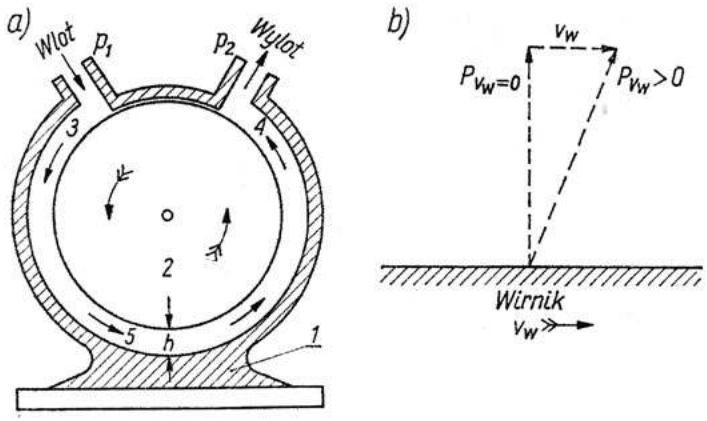
W pompach prędkościowych cząsteczki gazów otrzymują od szybko poruszających się elementów – prędkości dodatkowe do ich chaotycznych ruchów termicznych, dzięki czemu następuje przepływ gazu w kierunku ruchu tych elementów od wlotu do wylotu pompy.

W grupie pomp prędkościowych rozróżniamy:

- molekularne (oraz turbomolekularne), w którym cząsteczki gazu otrzymują prędkości dodatkowe od poruszającej się powierzchni ciała stałego;
- pompy strumieniowe, w których cząsteczki gazu otrzymują prędkości dodatkowe od poruszającego się czynnika pompującego, ciekłego lub gazowego;
- pompy elektropolowe, w których cząsteczki gazu obdarzone (dzięki zjonizowaniu) ładunkiem elektrycznym, są poruszane przez siły pola elektrycznego.

Pompy molekularne (właściwe)

Budowa i zasada działania pompy molekularnej wynika z rysunku 2, na którym przedstawiono, w uproszczeniu, pierwsze rozwiązanie pompy Gaedego. Wewnątrz cylindrycznej wnęki statora 1, znajduje się wirnik 2. Stator jest tak ukształtowany, iż w pewnej części obwodu 3,4 szczelina między nim a wirnikiem jest bardzo mała (o stosunkowo dużej impedancji dla przepływu), na pozostałej zaś części



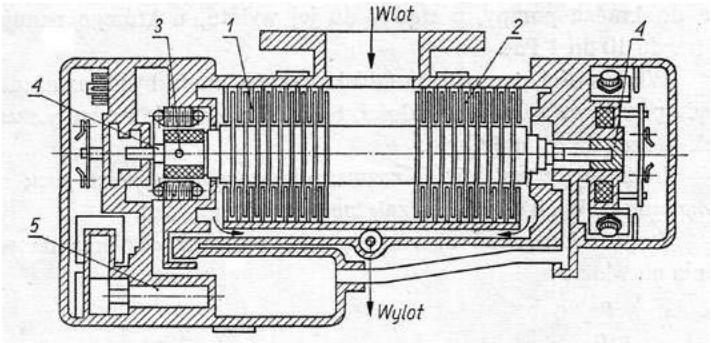
Rys. 2. Zasada budowy i działania pompy molekularnej: a) budowa; b) wykres rozkładu prawdopodobieństwa kątowego startu cząstek z powierzchni wirnika: 1 – stator; 2 – wirnik; 3,4,5 – części obwodu wirnika

3,4,5 tworzy się komora o wysokości h. Działanie pompujące zachodzi na odcinku 3,4,5 dzięki temu, że cząsteczki gazu wpadają w otwór wlotowy uderzając w powierzchnię wirnika zostają na niej pewien czas (czas przebywania) przytrzymywane, a następnie startują z rozkładem kątowym kosinusowym. Ponieważ powierzchnia wirnika na prędkość obwodową v_w, cząsteczki otrzymują prędkości składowe w kierunku stycznym do okręgu wirnika.

Cząsteczki gazu – po wielu odbiciach zbliżają się do wylotu pompy, gdzie następuje wzrost koncentracji gazu, w wyniku tego gaz wypływa do próżni wstępnej, istniejącej przy wylocie pompy. Szczelina 3,4 o dużej impedancji utrudnia wsteczny przepływ gazu. Niemniej jednak przepływ taki istnieje w obszarze 3,4,5 w kierunku 4,5,3 tak, że natężenie skuteczne pompowanie jest różnicą od natężenia przepływu I_+ (wskutek porywania cząstek przez wirnik) i natężenia wstecznego I_- (wskutek obecności szczelin). Pompy molekularne umożliwiają uzyskanie ciśnienie rzędu 10^{-12} Pa.

Pompy turbomolekularne

Głównymi wadami pomp molekularnych jest mała szybkość pompowania wskutek niewielkiego przekroju kanałów między statorem i wirnikiem oraz małe szczeliny sprawiające poważne trudności konstrukcyjne i eksploatacyjne. Wady te w znacznym stopniu usunięto w pompach turbomolekularnych.



Rys. 3. Łopatki pompy turbomolekularnej: a) konstrukcja statora; b) konstrukcja zamknięta (optycznie gęsta); s – stator; w – wirnik

eprasa.pl 8ee85682dd

Pompa turbomolekularna przypomina wielostopniową sprężarkę turbinową, czy też turbinę parową. Zarówno stator jak i wirnik są zaopatrzone w łopatki ustawione pod odpowiednimi kątami.

Działanie pomp turbomolekularnych, podobnie jak molekularnych polega na tym, iż cząsteczki gazu, wpadające przez wlot pompy, trafiają na szybko poruszające się ruchem obrotowym łopatki wirnika i otrzymują przy zetknięciu się z nimi prędkości składowe w kierunku wylotu pompy. Cząsteczki gazu po wielokrotnym odbiciu od łopatek wirnika, kierowane łopatkami statora, dochodzą do króćca pompy, a stąd do jej wylotu, u którego panuje próżnia wstępna.

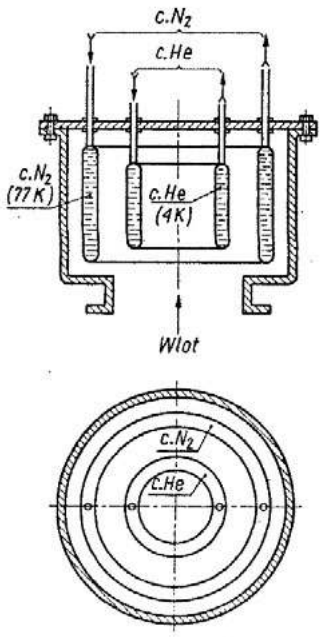
1.3. Pompy sorpcyjne

Działanie pomp sorpcyjnych polega na wiązaniu gazów i par na powierzchniach odpowiednich do tego przygotowanych. Aby pompowanie było skuteczne, współczynnik przylegania gazów γ na powierzchni sorbującej powinien być możliwie bliski jedności, a czas przebywania τ – możliwie długi.

Szybkość pompowania pomp sorpcyjnych jest na ogół proporcjonalna do pola powierzchni sorbującej. Ciśnienie końcowe zależy od stopnia absorpcji, jaka stale zachodzi z powierzchni pompującej.

W grupie pomp sorpcyjnych można rozróżnić:

- pompy kriogeniczne, w których czas przebywania cząsteczek gazu zaabsorbowanych dzięki niskiej temperaturze powierzchni jest bardzo długi;
- pompy zeolitowe, w których wiązanie gazów odbywa się na bardzo rozwiniętych powierzchniach porowatych;
- pompy sublimacyjne, w których czyste powierzchnię silnie sorbujących uzyskuje się przez naparowanie lub rozpylanie specjalnych metali sorbujących;
- pompy jonowe, w których pompowane gazy poddawane są uprzednio jonizacji w celu aktywizacji i ewentualnie nadanie jonom prędkości dla lepszego ich wbijania w powierzchnie sorbujące.



Rys. 4. Pompa kriogeniczna helowa. Powierzchnia kriogeniczna helowa (o temperaturze ~4K) jest otoczona powierzchnię kriogeniczną azotową (~77K), która ma na celu – między innymi zmniejszenie strat promieniowania cieplnego

Zasada działania pomp kriogenicznych

Działanie pomp kriogenicznych polega na adsorbowaniu i kondensowanie par i gazów na powierzchni o temperaturze znacznie niższej od temperatury otoczenia. Cząsteczki uderzające w taką powierzchnię zostają w niej związane, przy czym dla danego ciśnienia, liczba wiązanych cząstek jest tym większa dla danego gazu i dla danego materiału im niższa jest temperatura powierzchni. Temperatura ta jest zwykle niższa niż 30K, tzn. temperatura wytwarzane przez ciekły wodór lub hel.

Pompy kriogeniczne służą przeważnie do uzyskiwania bardzo wysokiej próżni. Włącza się do pracy zwykle dopiero po uzyskaniu dostatecznie niskiego ciśnienia za pomocą innych pomp (dyfuzyjnych, bezsmarowych, zeolitowych).

Pompy zeolitowe. Zasada działania i konstrukcja

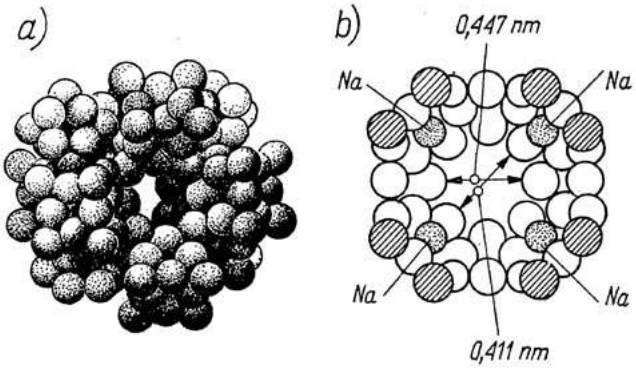
W pompach zeolitowych powierzchnie absorbujące gazy i pary są utworzone przez substancje zwane zeolitami (greckie: *zein* = gotować, *litos* = kamień). Zeolitami są zwykle minerały naturalne, przede wszystkim uwodnione krzemiany metali alkalicznych, o trójwymiarowy siatce krystalicznej utworzonej przez czworościany AlO_4^- i SiO_4^-. Obecnie zeolity wytwarza się syntetycznie.

Ze sposobu wiązań atomów tlenu z atomami glinu i krzemu wynika szczególna struktura zeolitu, formą się wnęki o objętości kilku nanometrów sześciennych, połączone kanalikami o średnicy kilku nanometrów (Rys. 5), przez co tworzy się w substancja porowata o bardzo rozwiniętej powierzchni dochodzącej do 1000 m^2 na 1 g substancji zeolitowej.

W technice wysokiej próżni zeolity znajdują zastosowanie głównie jako pochłaniacze w temperaturze otoczenia lub jako pompy o temperaturze obniżonej.

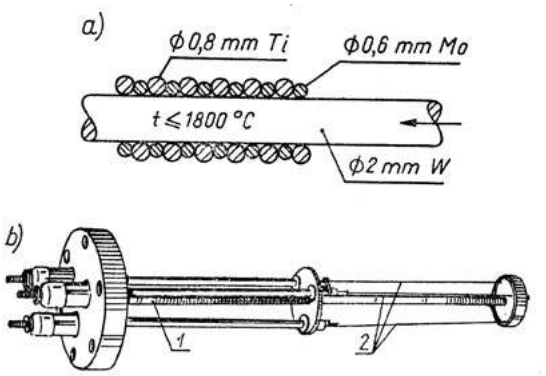
W temperaturach obniżonych, np. w ciekłym azocie, zeolity znajdują zastosowanie jako pompy wysokiej próżni, dające czystą, znaczy wolną od par wysoką próżnię.

Najprostsza pompa zeolitowa ma postać cylindrycznego zbiornika (np. ze stali nierdzewnej), którego – między przegrodami z blachy miedzianej – umieszcza się od granulki zeolitu. Przegrody miedziane o dobrej przewodności cieplnej pozwalają na szybkie ogrzewanie lub szybkie chłodzenie całej masy za litowej. W tym celu zbiornik ogrzewa się (dla aktywacji) lub zanurza się w naczyniu Dewara z ciekłym azotem (dla pompowania).



Rys. 5. Struktura zeolitu: a) model kryształu; b) przekrój kryształu typu NaA

eprasa.pl 8ee85682dd



Rys. 6. Element sublimacyjny: a) fragment rdzenia wolframowego z drutem molibdenowym tworzącym rynienkę dla nawinięcie na niej drutu tytanowego; b) zamocowanie elementu sublimacyjnego pompy

Pompy sublimacyjne. Zasada działania i konstrukcja

W pompach sublimacyjnych gazy są wiązane przez stosunkowo duże ilości metalu, który zostaje naparowany wewnątrz ściany obudowy pompy albo umieszczone w opóźnionej komorze na specjalne powierzchnie lub też wprost – na ściany komory roboczej. Świeżo naparowane warstwy czystego metalu wiążą (głównie chemicznie) gazy objętościowe, jak również unieruchamiają – przez „zamurowanie" gazy, które zostały zaadsorbowane na naparowanej powierzchni.

Jako metalu, który zostaje naparowany używa się obecnie prawie wyłącznie tytanu (w rzadkich przypadkach cyrkonu). Tytan wiąże chemicznie gazy czynne (O_2, N_2, H_2O) tworząc tlenki, azotki itp., wykazując znikomy ciśnienie par (w temperaturze poniżej 1500°C).

Szybkość pompowania zależy od pola powierzchni naparowanej, szybkości wyparowywania metalu i panującego ciśnienia.

Sublimator

Tytan jest sublimowany z tak zwanego sublimatora, tj. urządzenia utworzonego przez drut wolframowy (rdzeń), na którym jest nawinięty cienki drut tytanowy. W celu uniknięcia spływania ciekłego tytanu, równolegle z drutem tytanowym zostaje nawinięty nieco cieńszy drut molibdenowy, tworząc rodzaj rynienki, w której znajduje się roztopiony, (lub bliski topnienia) tytan. Temperatura wyparowania tytanu wynosi blisko 1500°C.

Pompy tytanowe najlepiej pracują w zakresie ciśnień 10^{-4} … 10^{-7} Pa, przy ciśnieniu wyższym niż 10^{-3} Pa następuje natychmiastowe nasycenie naparowanego tytanu.

1.4. Pompy jonowe

Za pierwowzór pompy jonowej właściwie należy uważać próżniomierz Penninga, w którym podczas pomiaru ciśnienia zauważono silne pompowanie gazów. Zjawisko to jest wywołane – z jednej strony – skuteczną jonizacją gazu dzięki obecności pola magnetycznego (zwiększającego drogę jonizacji elektronów), a z drugiej – rozpylanie metalu katody pod wpływem bombardowania jonami.

Pompowanie gazów chemicznie nieczynnych, a zwłaszcza szlachetnych, uzyskuje się przez nadanie atomom dużej prędkości, i „wbijanie" ich w powierzchnię metalu, a następnie „zamurowywanie" warstwami rozpylonego lub naparowego metalu. Nadawanie atomom prędkości odbywa się za pomocą pola elektrycznego po uprzednich im zjonizowaniu. Proces tego rodzaju zachodzi w pompach jonowych.

Pompy i jonowe można podzielić na pompy z gorącą katodą (termokatodowe, oraz pompy z zimną katedrą (jarzeniowe).

Pompy jonowe z gorącą katodą

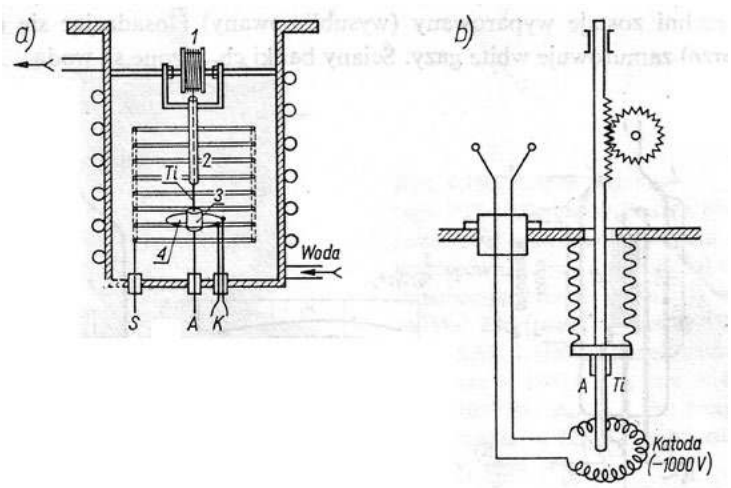
Prototypem pompy jonowej z gorącą katodą jest próżniomierz triodowy, w którym zachodzi jonizacja przez bombardowanie atomów elektronami emitowanym z gorącej katody.

Wytwarzane jony są sorbowane na powierzchni kolektora oraz na ściankach bańki, warstwa napylonego na ściany metalu (pochodzącego z anody lub katody).

Próżniomierz triodowy jako pompa jonowa był w swoim czasie i bywa obecnie stosowany do otrzymywania bardzo wysokiej próżni w małych objętościach. Okazuje się jednak, za najbardziej istotne dla skutecznego działania pompy w stosunku do gazów czynnych jest rozpylanie metalu. Z tego powodu pompa jonowa z gorącą katodą nie ma właściwie większego znaczenia, należy ją jedynie rozpatrywać jako część składową pompy sublimacyjnej, w której wywołuje się jonizację niezbędną do pompowania gazu chemicznie nieczynnych.

Pompy sublimacyjno-jonowe z podawaniem tytanu

Przykład pompy sublimacyjno-jonowej z urządzeniem do podawania tytanu przedstawiono na rysunku 7. Jest to rodzaj triody cylindrycznej, w której rolę anody spełnia siatka A (mająca potencjał do dodatni ~1000 V), katoda K (o potencjale dodatnim około ~100 V) ma kształt pierścienia, podczas gdy w uziemiony cylinder zewnętrzny – obudowa, spełnia rolę elektrody zbiorczej dla jonów, a więc jest elektrodą, która pompuje gazy. W osi elektrod znajduje się prowadnica 2 dla drutu tytanowego, który rozwijany



Rys. 7. Pompa sublimacyjno-jonowa z podawaniem tytanu: a) z drutem tytanowym w wprowadzonym do tygla; b) prętem tytanowym wprowadzonych do obszaru z bombardującymi elektronami; 1 – rolka z drutem tytanowym; 2 – prowadnica drutu; 3 – tygiel (anoda A); K – katoda

eprasa.pl 8ee85682dd

z rolki, dochodzi do tygla 3. Tygiel (mający potencjał siatki) jest podgrzewany przez bombardowanie elektronami do temperatury, jaka jest niezbędna do wyparowania tytanu. Tytan osadza się na ściankach obudowy chłodzonej płaszczem wodnym lub wężownicą.

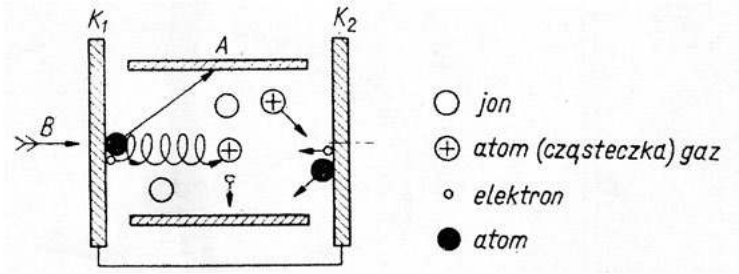
Pompy jonowe z chłodną katodą (jarzeniowe)

W pompach jarzeniowych pod wpływem wysokiego napięcia następuje w gazie rozrzedzonym wyładowanie elektryczne, któremu towarzyszy jonizacja gazu. Wyładowanie elektryczne podtrzymuje się dzięki temu, iż wytwarzane jony uderzając w elektrodę ujemną (katodę), wywołują z niej emisję elektronów, która wystarcza, aby przy zderzeniach elektronów cząsteczkami gazu została wyprodukowana dostateczna liczba jonów do otrzymania dostatecznej emisji elektronów z katody (Rys. 8). Tego rodzaju samopodtrzymujące się wyładowanie elektryczne jest tzw. wyładowaniem jarzeniowym. Wyładowanie to zachodzi znacznie łatwiej w obecności pola magnetycznego wydłużającego drogę elektronów jonizujących gaz w zakresie wysokiej próżni.

Prąd elektryczny wyładowania, utworzony głównie przez elektrony, bardziej ruchliwe niż jony, jest to w przybliżeniu proporcjonalny do ciśnienia gazu. Dla dobrej pracy pompy ciśnienie powinno być niższe od paru paskali.

Podczas wyładowania jarzeniowego katoda jest bombardowana jonami gazów, które wbijają się w siatkę krystaliczną katody i wiele z nich tam pozostaje. Równocześnie jony o dużej masie rozpylają metal katody, którego atomy osadzają się na ściankach pompy, elektrodach, itp. tworząc czystą powierzchnię sorbującą. W ten sposób rozpylanie metali i czyste jego powierzchnie zapewniają dla zjonizowanego gazu dobre warunki pompowania, szczególnie dla gazów czynnych, a w pewnym stopniu dla gazów nieczynnych. Te ostatnie są usuwane z objętości głównie przez „wbijanie i zamurowywanie" w powierzchniach, które są pokryte naparowanym metalem.

Ilość rozpylonego metalu jest w przybliżeniu proporcjonalna do prądu przepływającego między elektrodami pompy a więc do ciśnienia, dzięki temu ilość rozpylonego metalu reguluje się samoczynnie w zależności od stanu próżni, a wartość prądu jest miarą ciśnienia w układzie.



Rys. 8. Wyładowanie jarzeniowe w układzie z chłodną katodą: A – anoda cylindryczna; K_1 i K_2 – dwie części katody tytanowej (chłodniej); B) – indukcja magnetyczna

Pole magnetyczne powinno być możliwie silne (rzędu kilku dziesiątych tesli, a napięcie rzędu kilku kilowoltów) oraz najkorzystniejszy kierunek (prostopadły do płaszczyzny katody).

W wyładowaniach jarzeniowych rozróżnia się dwa zakresy. W zakresie niskich ciśnień ($p < 10^{-2}$Pa) wyładowanie jest typowo jarzeniowe w postaci kolumnowej, a rozpylanie katody zachodzi na niewielkiej powierzchni (tzw. krater). W zakresie wyższych ciśnień ($p > 10^{-1}$Pa) wyładowanie (przechodzące w łukowe) wypełnia cały układ elektrod i powoduje rozpylenie dużej powierzchni katody.

Dla ciśnień nieco wyższych ($10^{-2} < p < 10^{-1}$ Pa) moc wydzielana w pompie zwiększa się, elektrody silnie się rozgrzewają, czemu towarzyszy wydzielanie się gazów, które zostały zaabsorbowane w elektrodach.

Prawidłowa praca pompy odbywa się przy dostatecznie niskim ciśnieniu ($p < 10^{-2}$ Pa).

Szybkość pompowania pomp jarzeniowych zależy od rodzaju gazu, przy czym pewne trudności sprawiają gazy szlachetne. W związku z tym stosuje się specjalnie rozwiązania konstrukcyjne.

Innym zagadnieniem związane z eksploatacją pomp próżniowych – to silne pole magnetyczne oraz jonizacja gazów, oddziałujące na procesy w pobliżu pompy jarzeniowej. W celu zmniejszenia szkodliwych wpływów stosuje się ekrany magnetyczne oraz elektryczne.

Andrzej Wasiak

LITERATURA

[1] Janusz Groszkowski., Technika wysokiej próżni. Wydanie drugie zaktualizowane i rozszerzone. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1978.

W następnych wydaniach polecamy m.in.

- **Od reaktorów jądrowych do superkomputerów, czyli Forschungszentrum Jülich w pigułce**

W ramach cyklu, który prezentuje największe europejskie centra naukowe, przybliżono już infrastrukturę badawczą oraz działalność eksperymentalną szwajcarskiego CERN (Europejskiej Organizacji Badań Jądrowych) oraz niemieckiego GSI (Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung) w Darmstadt. Następny tekst poświęcony będzie Forschungszentrum Jülich (FZJ). Ten ogromny ośrodek, położony w zachodnioniemieckiej Nadrenii Północnej-Westfalii, znany jest chociażby ze słyszenia każdemu, kto na poważnie zajmuje się fizyką. Dokonano tu bowiem wielu przełomowych i spektakularnych odkryć, które istotnie wpłynęły na nasze codzienne życie.

eprasa.pl 8ee85682dd

Co w fizyce piszczy

Wibracje nanorurek

Wiemy już o wyjątkowych właściwościach elektrycznych, mechanicznych, stabilności i podatności na modyfikacje nanorurek węglowych. Jednak cały czas są wdzięcznym obiektem badań specjalistów z różnorodnych dziedzin, którzy nie ustają w poszukiwaniu ich nietypowych cech i możliwości zastosowań.

W artykule współautorstwa dr inż. Anny Wróblewskiej z Wydziału Fizyki Politechniki Warszawskiej, który znalazł się w czasopiśmie naukowym *Carbon* (IF=10.9), został opisany eksperyment sprawdzający, jak różne formacje nanorurek węglowych wpływają na mody wibracyjne. Ich zrozumienie może pomóc w wytworzeniu materiałów przydatnych w sensorach i urządzeniach komunikacyjnych.

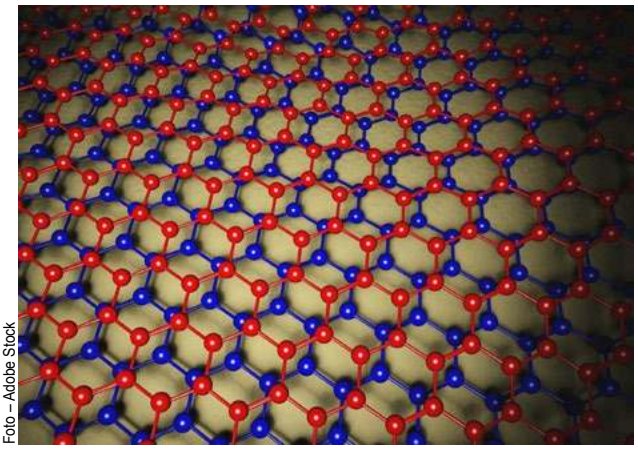


Foto – Adobe Stock

Wykorzystując spektroskopię Ramana grupa badaczy sprawdziła, jaka jest zależność sprzężenia drgań wynikających z jednorodnego łączenia jednościennych nanorurek węglowych od średnicy rurki oraz jak zmieniają się drgania kolektywne w tego typu strukturach. Sprawdzono dwie konfiguracje – nanorurki zwinięte w cewki i takie, które tworzyły cienką warstwę.

W widmie ramanowskim niskoczęstotliwościowe sygnały Ramana nazywane są modem oddychającym ze względu na kierunek drgań atomów węgla, który jest prostopadły do osi nanorurki. W pracy wykazano, że występują znaczące różnice w tym modzie dla quasi-nieskończonych skupisk, porównując je z pojedynczym radialnym trybem charakterystycznym dla izolowanych rurek.

Wykorzystując spektroskopię Ramana, naukowcy sprawdzili, jak te wibracje oddziałują z innymi właściwościami nanorurek. Za pomocą rezonansowej spektroskopii Ramana wykazano, że oba mody oddychające w strukturach połączonych nanorurek mają tę samą energię przejścia, co ma kluczowe znaczenie we właściwościach optycznych tych struktur otwierając nowe kierunki aplikacyjne.

Autorzy artykułu po przyjrzeniu się temu, jak zmieniają się wibracje w zależności od średnicy nanorurek oraz architekturze badanej struktury, potwierdzili wieloletnie przewidywania teoretyków. Wibracje rozdzielają się w mniejszym stopniu, gdy nanorurki są większe. Do tej pory empiryczne dowiedzenie tej tezy było niezwykle trudne – barierę stanowiło problematyczne wytworzenie i selekcja nanorurek o odpowiednich parametrach. Chiralnie czyste układy nanorurek reprezentują nowy schemat kryształów fononicznych w zakresie THz, prowadzący do nowych modów wibracyjnych. Ich przestrajalność częstotliwości w zależności od średnicy rurki oferuje doskonałe narzędzie do badania kolektywnej dynamiki sieci sprzężonych oscylatorów. Otwiera to drogę do dziedziny optomechaniki, z obiecującymi zastosowaniami w telekomunikacji i czujnikach.

Ułożone nanorurki węglowe (CNTs) to struktury węglowe o bardzo małej średnicy, które mogą mieć różne właściwości w zależności od ich ułożenia i chiralności. Mogą być wykorzystane jako podstawowy materiał do budowy struktury fotonicznych izolatorów topologicznych, czyli materiałów przewodzących światło w jednym kierunku, co może mieć zastosowanie m.in. w sieciach światłowodowych (zapobieganie odbiciom światła prowadzącym do interferencji i degradacji jakości sygnału). Fotoniczne izolatory optyczne mogą być wykorzystywane do zapewnienia jednokierunkowego przepływu danych optycznych, co może poprawić niezawodność i wydajność transmisji danych w sieciach 6G.

https://www.fizyka.pw.edu.pl/Aktualnosci/Oddech-nanorurek

Wykrywanie fal grawitacyjnych

Międzynarodowego zespołu naukowców badał sposoby sprawniejszego wykrywania fal grawitacyjnych – zmarszczek w przestrzeni i czasie.

Fale grawitacyjne oddziałują z czasoprzestrzenią, ściskając ją w jednym kierunku i rozciągając w kierunku prostopadłym. Właśnie dlatego obecne, najnowocześniejsze detektory fal grawitacyjnych mają kształt litery L i mierzą względne długości lasera za pomocą interferometrii – metody pomiaru, która analizuje wzorce interferencji wytwarzane przez połączenie dwóch źródeł światła. Wykrywanie fal grawitacyjnych wymaga dokładnego pomiaru długości lasera: co odpowiada zmierzeniu odległości do najbliższej gwiazdy, oddalonej o około cztery lata świetlne, aż do szerokości ludzkiego włosa.

Opracowane przez naukowców oprogramowanie może wykryć kształt sygnału, śledzić jego zachowanie i oszacować, jakie masy wchodzą w skład zdarzenia, takiego jak gwiazdy neutronowe czy czarne dziury.

Gdy oprogramowanie wykryje sygnał fali grawitacyjnej, w ciągu 30 sekund wysyła alerty do abonentów, którymi zwykle są astronomowie lub astrofizycy, w celu poinformowania, gdzie na niebie znajdował się sygnał, co pomoże lepiej zrozumieć gwiazdy neutronowe i czarne dziury oraz sposób powstawania ciężkich pierwiastków, w tym złota i uranu.

Wyniki opublikowano niedawno w *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS).

eprasa.pl 8ee85682dd

Żywoty fizyków

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

Robert Hall, Marshall I. Nathan, Nick Holonyak i Robert H. Rediker

Robert Hall, Marshall I. Nathan, Nick Holonyak i Robert H. Rediker
Źródło: https://www.nytimes.com/2018/05/10/obituaries/robert-n-hall-96-whose-inventions-are-everywhere-is-dead.html, https://www.nae.edu/28259/Dr-Robert-H-Rediker, https://ethw.org/Marshall_I._Nathan.

Tadeusz **Wibig**

Rok 1962 był małym rokiem cudów, jeśli chodzi o technologię półprzewodnikowych źródeł światła, czegoś co potocznie nazywamy angielskim skrótem LED i co obecne jest niemal wszędzie wokół nas i w co wpatrujemy się średnio kilka godzin dziennie.

W odstępie miesiąca w czasopismach *Physical Review Letters* i *Applied Physics Letters* ukazały się cztery artykuły napisane przez cztery grupy naukowców z czterech różnych instytucji pracujących niezależnie nad tym samym problemem: jak zmusić przy użyciu prądu elektrycznego arsenek galu do wydania z siebie odrobiny światła. Wszystkie one donosiły o sukcesie i, jak to się często zdarzało, mogła rozpocząć się walka o pierwszeństwo, a zatem i o honory, i potencjalne profity. Dziwne, ale tak się nie stało i dziś uważa się liderów tych czterech grup za jednego zbiorowego twórcę lasera półprzewodnikowego (LED).

Pierwszą grupą, która wysłała we wrześniu 1962 roku do *Phys. Rev. Lett.* swój artykuł była grupa z *Laboratorium General Electric* w Schenectady w stanie Nowy Jork. Pierwszy autorem i szefem grupy był **Robert Hall**. Urodzony w New Haven, Connecticut w 1919 r. Już od młodości zapowiadał się obiecująco na tyle, że zaproponowano mu stypendium w Caltech. Mimo kłopotów finansowych ukończył studia i z tytułem magistra fizyki zaczepił się w *General Electric* w Schenectady, gdzie pracował do emerytury. Poza pionierskimi pracami nad diodą LED warto wspomnieć o jego pracy w czasie wojny nad magnetronem, podstawowym elementem konstrukcyjnym radaru, a po wojnie wynalazkowi solarnego „ogniwa w kropeczki", co po angielsku brzmi jeszcze śmieszniej „*polka-dot solar cell*". Hall zmarł w roku 2016.

Druga grupa naukowców z *Centrum Badawczego IBM im. Thomasa J. Watsona* w Yorktown Heights w stanie Nowy Jork przesłała swój artykuł do *Appl. Phys. Lett.* 5 października. Szefem tej grupy był **Marshall I. Nathan**. Urodził się w Lakewood, New Jersey w 1933 roku. Studiował najpierw w MIT, a potem na Uniwersytecie Harvarda, gdzie w wieku 25 uzyskał doktorat z fizyki stosowanej. Jego sukces, jaki osiągnął budując swoją diodę LED, zaowocował między innymi nagrodą im. Nicka Holonyaka Juniora za „pionierskie prace nad stworzeniem diody laserowej GaAs i twórczy wkład w fizykę złożonych układów półprzewodnikowych i laserów".

Nagroda Holonyaka (Jr.) przyznawana jest osobom, które wniosły znaczący wkład do optyki, do technologii półprzewodnikowych urządzeń optycznych tak w zakresie fizyce czystej, jak i stosowanej. Nagrodę te ustanowiono w roku 1997 dla uhonorowania Nicka Holonyaka (Jr.), lidera trzeciej grupy, która przesłała swój artykuł do *Appl. Phys. Lett.* 17 października. Swoich odkryć dokonał w *Laboratorium Zaawansowanych Półprzewodników/Zaawansowanym Laboratorium Półprzewodników (Advanced Semiconductor Laboratory) Oddziału Produktów Półprzewodnikowych General Electric Company* w Syracuse w stanie Nowy Jork.

Nick Holonyak urodzony w Zeigler, Illinois w 1928 roku był synem rosyjskich imigrantów. Jego ojciec ciężko pracował w kopalni. Los szykował Nickowi podobną przyszłość, aż tu kiedyś po przepracowaniu bez przerwy 30 godzin na

eprasa.pl 8ee85682dd

kolei Illinois Central Railroad, zdał sobie sprawę, że takie życie nie bardzo mu odpowiada i stwierdził, że chyba wolałby jednak pójść do szkoły. Była to słuszna decyzja!

Stopień licencjata osiągnął w roku 1951. Rok później był już magistrem, a w 1954 doktorem, który to tytuł uzyskał na Uniwersytecie Stanowym Illinois w Urbana-Champaign. Od 1957 roku pracował w *General Electric Company*. Po modyfikacji polegającej na dodaniu do arsenku galu nieco fosforu tworząc tym samym stop arsenofosforku galu, albo, jak kto woli fosforoarseneku galu co przesunęło długość emitowanego światła w obszar bardziej widzialny niż podczerwony charakterystyczny dla czystego GaAs, Holonyak został profesorem na Uniwersytecie Stany Illinois.

Ostatnia grupa, zgłosiła się ze swoim artykułem do *Appl. Phys. Lett.* 5 listopada była grupa z Laboratorium Lincolna w MIT. Szefem był był **Robert H. Rediker**. Urodził się na Brooklinie w 1924 roku, a dorastał w Hawanie na Kubie. W 1941 dostał się do MIT i tam zastała go wojna, którą przesłużył w wojsku na Filipinach jako fachowiec od radia. W 1950 roku dostał stopień doktora na MIT i zajął się świeceniem złączy opartych o arsenek galu. Poza zaprezentowaniem samego efektu emisji, dzięki czemu wszedł do wielkiej czwórki, o jakiej mówimy, użył on też świeżo odkrytej diody do przesłania sygnały telewizyjnego przez łącze podczerwone, co pokazało na potencjalne możliwości nowej technologii. Rediker zmarł w 2019 roku.

Tajemnicą pozostaje dlaczego żaden z twórców laserowej diody półprzewodnikowej nie został uhonorowany nagrodą Nobla. Kiedyś ktoś zapytał o to Holonyaka. Odpowiedział: „*Przypuszczenie, że ktoś jest mi coś winien, jest niedorzeczne. Mamy szczęście, że żyjemy i to wystarczy*”. W październiku 2014 roku, gdy Nobla dostali trzej twórcy niebieskiej diody LED: Japończycy Isamu Akasaki i Hiroshi Amano oraz Shuji Nakamura z USA, Holonyak zmienił swoje stanowisko, stwierdzając „*Uważam, że to uwłaczające*”.

Holonyak zmarł w 2022 roku w wieku 93 lat.

[1] R. N. Hall, G. E. Fenner, J. D. Kingsley, T. J. Soltys, and R. O. Carlson, *Coherent Light Emission From GaAs Junctions,* Phys. Rev. Lett. 9, 366; Published 1 November 1962

[2] M. I. Nathan, W. P. Dumke, G. Burns,F. H. Dill, G. Lasher, *Stimulated Emission of Radiation From GaAsP N Junctions*, Appl. Phys. Lett. 1 November 1962; 1 (3): 62–64.

[3] T. M. Quist, R. H. Rediker, R. J. Keyes, W. E. Krag, B. Lax, A. L. McWhorter, H. J. Zeigler*; Semiconductor Maser of GaAs*, Appl. Phys. Lett. 1 December 1962; 1 (4): 91–92.

[4] N. Holonyak, S. F. Bevacqua; *Coherent (Visible) Light Emission From Ga($As_{1-x}P_x$) Junctions*, Appl. Phys. Lett. 1 December 1962; 1 (4): 82–83.

Doświadczenie domowe:

RGB

A. Potrzebne materiały
1. Trzy diody LED: czerwona, zielona i niebieska (RGB)
2. Trzy małe płaskie baterie CR2032 (3V)
3. Tpinacze do bielizny, spinacze biurowe takie większe
4. Biała kartka papieru

B. Narzędzia – zbędne

C. Kolejność czynności
1. Kolorowe diody przymocować spinaczami do bateryjek i niech się świecą,
2. Ustawić przed nimi ekran.
3. Manipulować diodami przesuwając je, oddalając i przybliżając do ekranu starając się, aby wszystkie świeciły mniej więcej w to samo miejsce.
4. Przysuwanie i oddalanie zmniejsza oświetlenie w każdym kolorze; przy odrobinie cierpliwości i dobrej woli można uzyskać takie ustawienie, że w jakimś punkcie ekranu obserwowane kolory zleją się w światło białe (lub prawie białe).

Tak działają ekrany naszych telefonów, komputerów, telewizorów.

eprasa.pl 8ee85682dd

Dydaktyka dydaktyczna – esej

Foto – Dreamstime

Grzegorz **Karwasz**, Katarzyna **Wyborska**

Trafił się nam ostatnio artykuł w zagranicznym czasopiśmie dydaktycznym, całkiem niezłym – o nauczaniu fizyki. Wymowa tego artykułu była mocno niepokojąca. Na pierwszym roku studiów, w dość dobrze rozwiniętym kraju, uczono przez cały semestr podstaw fizyki (kinematyki i dynamiki). Po czym oceniono efektywność nauczania. Wynik był zatrważający. W testach wielokrotnego wyboru, przy czterech odpowiedziach możliwych, w niektórych zagadnieniach, i to dość prostych – odpowiedzi poprawnych było 4%. Jak żartuje nasz znajomy profesor matematyki, w populacji szympansów wynik byłby lepszy, oczywiście, o ile by NIE myślały przy rozwiązywaniu testu. Coś wyraźnie błędnego zaproponowano studentom.

Mit pre-koncepcji

W światowym środowisku tzw. dydaktyków fizyki „pokutuje", a raczej jest podsycany, mit pre-koncepcji: młodzi ludzie, a w zasadzie wszyscy ludzie, włączając Arystotelesa – w zakresie filozofii, sztuki, literatury wykazują się sporą inteligencją, natomiast na fizyce – „to się to oni zupełnie nie znają". Na przykład wierzą, że do podtrzymania ruchu jest potrzebne stałe działanie siły. „A tymczasem Newton pokazał, że jest inaczej." – mówią „dydaktycy".

Nawarstwiło się kilka nieporozumień. Po pierwsze nie Newton, ale jak pisaliśmy w „Fizyce w Szkole" dwa lata temu [1] już Jan Buridan, dwieście lat przed Kopernikiem zdefiniował pojęcie impetu, czyli bezwładności – dziś powiedzielibyśmy – wprowadził zasadę zachowania pędu. A właściwie to Arystoteles, w *Fizyce* (215a) napisał: „A zatem ciało albo się będzie znajdować w spoczynku, albo się będzie poruszać w nieskończoność, jeżeli tylko nie stanie mu na drodze jakieś inne silniejsze ciało". Sformułowanie proste i jasne.

Zresztą, i sam Newton swoje prawo zapisał zupełnie inaczej, niż to różni „przepisywacze" z kolorowych podręczników. Od niedawna mamy w Polsce aż dwa różne wydania „Matematycznych zasad filozofii przyrody". To, z Fundacji Copernicus [2] podaje następujące tłumaczenie z łaciny:

„Prawo I

Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku albo ruchu jednostajnego wzdłuż prostej, dopóki przez siły do niego przyłożone nie zostanie zmuszone do zmiany tego stanu.

Pociski zachowują swój ruch pod warunkiem, że nie są hamowane przez opór powietrza albo przyciągane w dół przez siłę ciężkości." […] Większe bryły planet i komet, napotykające w pustej przestrzeni na znikomy opór, przez znacznie dłuższy czas zachowują zarówno swój ruch postępowy jak obrotowy." (str. 95)

Newton znakomicie rozumiał, że *prawo* fizyki jest nieco bardziej skomplikowane, niż to, co obserwujemy: w rzucie ukośnym działa siła grawitacji cały czas w dół, a ciało leci po paraboli. A kulka tocząca się po poziomej podłodze porusza się ruchem prostoliniowym, ale zwalnia, bo działają (niewidoczne) siły tarcia. Stąd piękno fizyki – możliwość opisu matematycznego, a później – przetłumaczenie z suchego języka równań na opis zjawiska: kulka zwalnia.

Mit pre-koncepcji jest szkodliwy z kilku względów. Po pierwsze, dewaluuje ucznia, jako osoby – „ot! taki on niedouczony, że nic nie rozumie". Drugi aspekt szkodliwości dydaktycznej mitów pre-koncepcji to utracona szansa autokrytycznego samo-kształcenia się nauczycieli. „Jeśli ja jestem mądrzejszy niż uczeń, to po cóż się kształcić?"

Po trzecie, mit pre-koncepcji stanowi usprawiedliwienie dla zbytniego upraszczania obrazu świata zewnętrznego. Przykładowo, nawet w ruchu ciał w kosmosie istnieją opory, więc I prawo Newtona jest *idealizacją*, modelem rzeczywistości, a nie jego wiernym *opisem*. To uproszczenie jest również stratą okazji dla wzbogacenia dydaktyki o nowe treści, szczególnie te interdyscyplinarne. Księżyc „patrzy na nas" cały czas tą samą twarzą. Innymi słowy – okres obrotu Księżyca dookoła własnej osi i okres jego obiegu dookoła Ziemi są zsynchronizowane w stosunku 1:1 (jest wiele innych podobnych synchronizacji, np. Merkurego w stosunku 4:3 – odsyłamy Czytelnika do „Małego astronoma" [3]). Jaki jest powód tej synchronizacji? Przecież moment pędu powinien być zachowany w układach izolowanych. Tak, ale podział tego momentu pędu (na obrót wokół własnej osi Ziemi, Księżyca i wzajemne

eprasa.pl 8ee85682dd

obieganie się) może ulec zmianie. A powód? Na pewno w tej kwestii istnieją różne modele teoretyczne: przyczyną były (i są, choć mniejsze niż pierwotnie) siły dyssypacyjne, czyli siły tarcia – głównie pływy oceanów i niezastygłych jeszcze dwóch ciał niebieskich.

A czwarty, absolutnie najbardziej społecznie szkodliwy efekt mitu pre-koncepcji to „zabicie" w uczniu chęci i umiejętności obserwacji świata. Jeśli nie jest prawdą, że kulka puszczona po podłodze sama się zatrzyma, to lepiej grać w Roblocka lub inny wirtualny amok, niż eksperymentować z kulkami. Fizyka staje się trudna, niezrozumiała, oderwana od rzeczywistości, ba! niepotrzebna.

Dydaktyka dydaktyczna i dydaktyka sadystyczna

Należy więc przerwać narzekania na niską jakość nauczania fizyki, a poszukać przyczyn tych skarg nie po stronie „niedouczonego ucznia", „niekompetentnego ministra", „małej ilości godzin" czy „braku laboratoriów" a poszukać ich po stronie wykładowcy, w tym uniwersyteckiego.

Pozornie żartując, a w rzeczywistości bardzo serio, z żalem, dzielimy zadania z fizyki (ale też z matematyki, historii, biologii, geografii) na dwie klasy. Pierwszy rodzaj testów są to pytania *dydaktyczne* – tak ułożone, aby i w trakcie egzaminu/klasówki/ sprawdzianu uczeń czegoś się nauczył: dokonał rozumowania, poszukał porównań, przypomniał sobie materiał, przeprowadził elementarne operacje logiczne – tak aby jego wiedza się ugruntowała. W ten sposób, po egzaminie student wyjdzie mądrzejszy, a przy tym jest szansa, że go zaliczy pozytywnie.

Druga klasa pytań to zadania „sadystyczne" – dla wykazania niewiedzy ucznia. Przyglądając się szczegółowo testom ze wspomnianego artykułu, część z odpowiedzi jakby celowo wprowadza studenta w błąd. Pochodzą one, niestety, z renomowanego, zagranicznego źródła [4]. Cytujemy dwa tylko przykłady.

1. W jednostajnie przyspieszonym ruchu prostoliniowym
a) nie występuje przyspieszenie ani normalne, ani styczne,
b) przyspieszenie normalne jest stałe, podczas gdy przyspieszenie styczne (ang. *tangential*) wynosi zero,
c) przyspieszenie normalne wynosi zero, zaś przyspieszenie styczne jest niezależne od czasu,
d) przyspieszenie styczne jest równe przyspieszeniu normalnemu.

Odpowiedź na to pytanie w spontaniczny, tj. nienarzucony sposób jest prosta: w ruchu prostoliniowym jednostajnie przyspieszonym przyspieszenie jest stałe i działa w kierunku ruchu. Jakie wyniki osiągnęli badani studenci? Zarówno przed i po kursie, większość (ponad 50%) studentów wybrało odpowiedź b), zamiast c) – tę wybrało zaledwie 16% studentów. Jaka jest przyczyna? Uparte stosowanie przez „dydaktyków" słów z języka potocznego, dla słów *zastrzeżonych* w fizyce. „Normalny" oznacza w życiu zwykły, powszedni, codzienny. „Dydaktycy" (zgodnie z matematykami) rezerwują to słowo dla wektora prostopadłego do trajektorii ruchu. Aby więc odwrócić wynik, wystarczyłoby wyjaśnić odpowiedzi, np. w taki sposób:

b) przyspieszenie wzdłuż trajektorii ruchu jest stałe, natomiast przyspieszenie prostopadłe do trajektorii ruchu wynosi zero.

A dla jasności dydaktycznej, następne, komplementarne zadanie w teście powinno brzmieć:

W ruchu ze stałą prędkością liniową, ale po trajektorii kołowej (jakim jest w przybliżeniu ruch Ziemi po orbicie dookoła Słońca):
a) nie występuje żadne przyspieszenie,
b) przyspieszenie wzdłuż trajektorii wynosi zero, a przyspieszenie prostopadłe do trajektorii pozostaje stałe,
c) przyspieszenie wzdłuż trajektorii jest zmienne, a przyspieszenie prostopadłe do trajektorii wynosi zero,
d) przyspieszenie wzdłuż trajektorii jest zmienne (i różne od zera), a przyspieszenie prostopadłe do trajektorii jest stałe.

Specjaliści od statystyki zaprotestują natychmiast, że wówczas odpowiedzi na obydwa pytania będą skorelowane. Tak! Uczniowie to nie kule w loterii służące do badania statystyki, ale młodzi, odczuwający emocje ludzie. Za ich prawidłowy rozwój, a w przyszłości i za ich sukces cywilizacyjny my, nauczyciele, ponosimy odpowiedzialność.

Wszelkie rekordy (tylko 2% poprawnych odpowiedzi) pobiło pytanie następujące

2. Z poniższych stwierdzeń wybierz właściwe:
(a) jeżeli ciało nie jest przyspieszane, nie ma sił na nie działających,
(b) ciało zawsze porusza się w kierunku wypadkowej siły,
(c) ciężar ciała zależy od jego położenia,
(d) jeżeli ciało porusza się po linii prostej, jego przyspieszenie wynosi zero.

Studenci w większości (70%) wybierali odpowiedź b). Oczywiście, jest ona najbardziej zrozumiała ze wszystkich czterech. Odpowiedź a) jest sformułowana opacznie: powinna brzmieć „ciało, na które nie działa żadna siła, nie przyspiesza (ani nie zwalnia)". Odpowiedź b) jest, jakby celowo, wprowadzająca w błąd: oczekujemy, że siła działa w kierunku ruchu. Że jest inaczej – wyjaśnił już Newton, ale trzeba uczyć całości jego I prawa, a nie wersji skróconej.

Odpowiedź c) jest „ni w pięć, ni w dziewięć". Oczywiście, siła ciążenia zależy od tego, czy ciało znajduje się na Ziemi czy na Księżycu. O to chodziło autorom zadania, czy po prostu „pióro się im pośliznęło na papierze"? Również odpowiedź d) też wprowadza w błąd – w ruchu *jednostajnym* po linii prostej przyspieszenie wynosi zero. Odpowiedź „przyjazna studentowi" (ang. *user-friendly*) winna brzmieć: d) Jeżeli ciało porusza się po linii prostej niejednostajnie, to jego przyspieszenie wynosi zero.

Innymi słowy – jeśli autorzy testu chcą otrzymać błędne odpowiedzi, to studenci z pewnością do tej prośby, pechowo dla siebie – przychylą się. Co jest więc celem testu – nauczenie czy pokazanie wyższości wykładowcy nad studentem?

No-student left behind

Jedno z nas (GK) wykłada na zagranicznych uniwersytetach, głównie włoskich, od 1985 roku – to dość, aby

eprasa.pl 8ee85682dd

móc dokonać porównań. Pierwszy kontakt z uniwersytetem włoskim był – w dobie „komunizmu” w Polsce – dość szokujący. Żadnych egzaminów wstępnych, żadnych rygorów w rodzaju dwóch terminów, po czym tak zwany „komis” i „zielona trawka”. Moi starsi koledzy w Polsce, też wykładowcy uniwersyteccy, prawie z dumą opowiadają, że „w ich czasach” po pierwszym roku z 400 studentów na fizyce pozostawało 40-tu, a reszta „w kamasze”, czyli do bulistycznej, totalitarnej, tragicznie nieefektywnej, niepatriotycznej, ale obowiązkowej służby wojskowej.

Około 2000 roku wyszedł okólnik ministra edukacji, Berlinguera, który stwierdził, że prawo do nauki, gwarantowane każdemu obywatelowi przez włoską konstytucję, oznacza nie tylko możliwość zapisania się na wyższą uczelnię, ale również prawo do jej ukończenia. W domyśle: wykładowca ma tak długo egzaminować, aż znajdzie pytanie, na które student odpowie. Oczywiście, żartujemy, ale temat nadal jest serio.

Uczestniczyłem w testowaniu systemu, zwanego bolońskim – dziś obowiązuje również w Polsce. Jego celem jest demokratyzacja dostępu do studiów wyższych: zapewnienie wszystkim chętnym (jakiegoś) dyplomu. Oczywiście, w 1503 roku dyplom z Ferrary miał mniejszą wartość niż ten z Bolonii, ale wyższą niż ówcześnie z Krakowa.

Elementem kardynalnym systemu bolońskiego jest wymienialność tzw. punktów kredytowych (ECTS). Nie jest istotne, jakie studia pierwszego stopnia skończył student. Jeśli uzyskał odpowiednią ilość ECST, jakakolwiek uczelnia w Europie musi go przyjąć na kolejny stopień, choćby na wyższą matematykę, po ukończeniu szkoły baletowej. Najwyżej dziekan (a właściwie przewodniczący kursu magisterskiego, postać w Polsce nieznana) wyznaczy materiał do samodzielnego przerobienia (i zaliczenia).

Wiążą się punkty ECST z pojęciem „podstawy programowej”. Ta też jest w Polsce opacznie rozumiana: jako zbiór wszystkiego, co się da uczniowi narzucić do obowiązkowego programu. Dydaktyki, w sensie Komeńskiego (zob. dalej w tym artykule), tego rodzaju działania nie stanowią. Podstawa programowa to ten zakres materiału, który prawie każdy (>80%) uczeń jest w stanie opanować. W USA prezydent Bush podpisał w 2002 roku stosowną ustawę: „No-student left behind”. Podobnie jasne wytyczne (choć bez podawania wskaźników) podaje EU.

Rozwiązywanie węzłów

Podręcznikowa definicja fizyki mówi, że „dydaktyka to nauka o uczeniu się i o nauczaniu”. Ponieważ *didacto* oznacza po grecku (ale też po łacinie i włosku) „uczę się”, definicja ta świadczy bardziej o nieznajomości greki niż o samym przedmiocie. Jaka jest nasza definicja dydaktyki? Przytoczmy najpierw Jana Komeńskiego z jego *Wielkiej Dydaktyki* (pisanej w Lesznie w 1657 roku): „Dydaktyka to nauczanie tanie, przyjemne i trwałe”. I jak precyzuje Komeński, trzeba z nauczania usunąć wszystko co jest zbyt ogólne, zbyt szczegółowe lub nieprzydatne.

Nasza definicja, przyjmując za pewnik stwierdzenia Komeńskiego, jest definicją *operatywną* – dydaktyka to umiejętność wynajdowania węzłów (tj. trudności) w procesie uczenia się (czyli zagadnień i wyjaśnień, których uczeń nie

Rys. 1. „No-student left behind” jest obowiązującą doktryną edukacyjną i w USA, i w UE. Na zdjęciu prezydent Bush składa podpis pod ustawą, w 2002 roku. https://www.edweek.org/policy-politics/no-child-left-behind-an-overview/2015/04

rozumie) i węzłów w procesie nauczania (zagadnień, których z kolei nauczyciel nie potrafi nauczyć – z różnych powodów – braku czasu, braku pomocy naukowych, niezdyscyplinowania uczniów, czy wreszcie z powodu niedostatecznego przygotowania wyniesionego z wyższej uczelni).

Dydaktyka to umiejętność identyfikowania tych trudności w *procesie*, czyli wzdłuż ścieżki nauczania oraz wskazywania (i aktualizacji, czyli zastosowania praktycznego) właściwych sposobów na przezwyciężanie tych trudności. Obrazowo mówimy, że jest to jak czesanie włosów – na ogół gładko, bez problemów, aż trafimy na tzw. kołtun – czyli niemożność rozczesania w zwykłym, liniowym procesie prowadzenia grzebienia.

Zauważmy też, że Newton ogranicza użycie słów „zastrzeżonych” przez fizyków, jak „prostoliniowy” czy „jednostajny”. Mówi o ruchu wzdłuż prostej, co jest *prostsze* – żartujemy sobie z gry słów. Zwracamy też uwagę, że prawo w sformułowaniu Newtona jest praktyczne, jak chce Komeński – w pierwszym dodanym zdaniu wyjaśnia ruch pocisków, w kolejnym – planet.

Nie tylko fizyka

Gruntownej przebudowy wymagają nie tylko metody i treści nauczania, ale przede wszystkim sposoby myślenia, jak to napisał w 1999 roku wybitny francuski filozof Edgar Morin, w krótkiej książeczce „Głowa dobrze zrobiona” [5]. Trudności mają uczniowie nie tylko w zapamiętaniu dat historycznych – faktów, dla których nie potrafimy znaleźć ani usieciowania, ani sekwencji, ani użyteczności, ani obrazowości. Na przykład pytanie-dylemat: „czy Kopernik był Niemcem (są jego rękopisy w tym języku), czy Polakiem?”

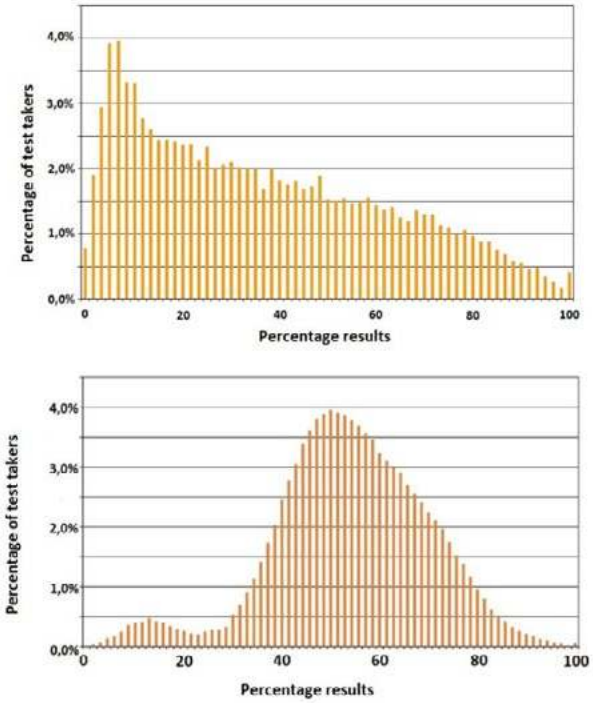
A oto nasza odpowiedź „usieciowana”, będąca jednocześnie streszczeniem historii Polski i świata z przełomu XV i XVI wieku. „Kopernik urodził się w 1473 roku, siedem lat po II Pokoju Toruńskim, więc na pewno znał i polski, i niemiecki. Było to zaledwie dwadzieścia lat po upadku Konstantynopola. Na studia do Bolonii trafił trzy lata po tym, jak Kolumb, wiosną, wrócił z pierwszej wyprawy na kontynent, dziś zwany Ameryką (a który my nadal nazywamy ojczyzną Indian). Kopernik nie ukończył tych studiów, podobnie jak tych zaczętych cztery lata wcześniej w Krakowie: kiedy był moment na obronę pracy magisterskiej, w Rzymie świętowano rok Jubileuszowy. W Toruniu ufundowano z tej okazji wielki dzwon, bo spodziewano się końca świata. Mikołaj żył 70 lat, a swoje dzieło, mówią znawcy, obejrzał dopiero na

eprasa.pl 8ee85682dd

łożu śmierci.” Dla tej całej historii potrzebny jest nam tylko jeden, pewny punkt, dydaktyczny punkt zawieszenia, albo jak to mówimy – kołek. Pozostałe daty można skonstruować *relacyjnie*, w odniesieniu do roku 1473.

W geografii również. „Polska ma jakieś 38 milionów mieszkańców (to się zmienia co rok) a powierzchnię 311,888 mln km^2 (to, na szczęście, od ponad pół wieku nie zmienia się). Podobną powierzchnię mają Japonia i Włochy. Ale w Japonii większość kraju to góry i wulkany, a gdzie jest płasko – rozciągają się pola ryżowe, czytaj – zalane wodą. Ale ryż plonuje trzy razy w roku, stąd w Japonii aż 120 mln mieszkańców. We Włoszech też większość kraju to góry – i tam Polacy jeżdżą w Dolomity na narty. Ale ryż rośnie tylko w okolicach Mediolanu. Mieszkańców Włochy mają tyle co Wielka Brytania lub Francja – jakieś 59 milionów. W Europie tylko Niemcy (po zjednoczeniu) mają więcej mieszkańców (89 mln). O dziwo, Wielka Brytania ma powierzchnię mniejszą niż Polska. Francja i Hiszpania są duże – mniejsze tylko od Ukrainy. Zresztą, sprawdź sam w Wikipedii!”

Kwestia upraszczania dydaktyki, czynienia ją „*user-friendly*”, to nie tylko ułatwianie pracy nauczycielowi, ale przede wszystkim – poszanowanie godności młodego człowieka.



Rys. 3. Wyniki matury z fizyki (górny panel) i języka polskiego (dolny) w 2022 roku. Źródło: dane CKE Warszawa. Porównaj również z naszą pracą [6].

Przed maturą

Nie uda się opublikować tego tekstu w czasie użytecznym dla autorów zadań maturalnych, szczególnie z matematyki (bo ta stanowi pogrom dla młodych ludzi, mimo tragicznie niskich progów zaliczenia). Zadania maturalne układane są tak, jakby zamierzeniem było, aby uczeń matury nie zdał: co się da skomplikować, to zostanie skomplikowane. I niestety, nie zmienia się to od lat, jakby układali je ciągle ci sami, niereformowalni autorzy, zob. ryc. 3. Z zadaniem nr 3 nawet studenci Fizyki mają przez moment kłopoty: któż pamięta wzór na zamianę podstawy logarytmu!

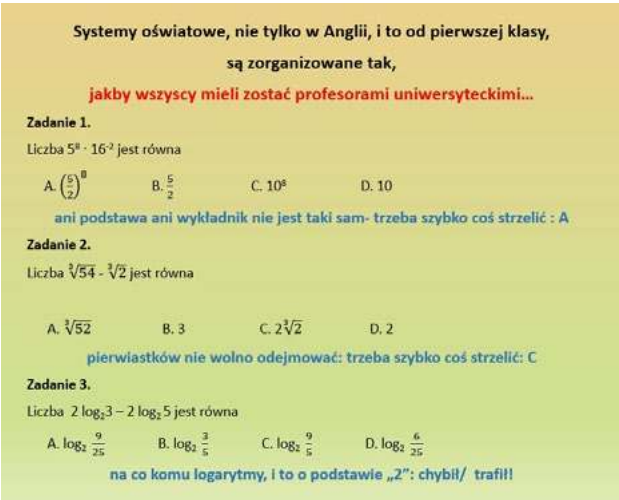
„Dydaktycy” nazywają to *dystraktory*, czyli odpowiedzi, których celem jest wprowadzenie ucznia w błąd. Jakby wprowadzenie ucznia w błąd było osiągnięciem dydaktycznym (a może moralnym?). „Dydaktycy” zakładają, że jeśli ONI to znają, to uczeń też powinien. Wydaje się, że zaleceń Komeńskiego „dydaktycy” nie czytali.

Oglądaliśmy podręcznik chemii, chyba do liceum. Podręcznik szczegółowy, bardzo kompetentny: od chemii metali, przez polimery, po środki piorące. Każdy dział pisany przez innego profesora akademickiego. Pytanie – czy autorzy potrafiliby wyjaśnić zagadnienia z sąsiedniego rozdziału?

Dla diagnozy nie trzeba sięgać do nieopatrznych „wzorów” zagranicznych. Opacznie ułożone programy i testy skutkują tragicznymi wynikami, jak na przykład ten na maturze z fizyki w 2022 roku (rok, co prawda „post-pandemiczny”, ale z języka polskiego rozkład bardziej przypomina ten „normalny”, czyli Gaussa). Z fizyki – pozytywny wyniki maturalny to, z punktu widzenia statystyki – zdarzenie bardzo rzadkie, ryc. 3.

Reasumując: leży nam na sercu dobre wykształcenie młodego pokolenia. Nie po to, aby dobrze zdawali maturę, lecz aby byli sobie w stanie poradzić w agresywnym, globalnym świecie XXI wieku. Aby odnieśli sukces „cywilizacyjny”: tak kulturowy jak ekonomiczny.

P.S. Tematy opisane w artykule rozwijamy dokładniej w naszej najnowszej pracy zbiorowej, z serii „Doskonała nauka” MEN, zatytułowanej „Dydaktyka kognitywistyczna” [7]. Wersje książkowe wysyłamy bez kosztów dla odbiorcy. Proszę pisać na adres: karwasz@fizyka.umk.pl



Ryc. 2. Fragment naszego wykładu nt. matury z matematyki w 2011 roku (ta w sierpniu 2023 była prawie że identyczna).

[1] G. Karwasz, *Arystoteles, Buridan i* Kartezjusz, Fizyka w Szkole nr 1/2022.
[2] Isaac Newton, *Matematyczne zasady filozofii naturalnej*, Copernicus Press, Kraków (2022).
[3] G. Karwasz, *Mały Astronom, Przewodnik dla dzieci*, Papilon, Poznań (2022).
[4] D. Hestenes i in. *Force Concept Inventory*, The Physics Teacher, 30, 141-158 (1992).
[5] E. Morin, *Tête bien faite*. Seoil, Paris (1999).
[6] G. Karwasz, K. Wyborska, *How Constructivist Environment Changes Perception of Learning: Physics Is Fun,* Education Science, 13 (2023) 195.
[7] *Dydaktyka i pedagogika kognitywistyczna. Zasady ogólne i implementacje w fizyce* , pod red. G. Karwasza i D. Siemienieckiej, Wyd. Nauk. UMK (2023).

eprasa.pl 8ee85682dd

Dyfrakcja

Foto – Adobe Stock

Siatka dyfrakcyjna jest tak tanim i prostym przyrządem, że znajduje się prawie w każdej pracowni fizycznej. Gdyby nawet tak nie było, to właściwości siatek dyfrakcyjnych mają niektóre przedmioty używane na co dzień. Dzięki tym przedmiotom można wykonać kilka interesujących doświadczeń.

Stanisław **Bednarek**

Dyfrakcja światła na siatkach skrzyżowanych

W obowiązującej aktualnie „Podstawie programowej fizyki dla liceum i technikum, zakres rozszerzony", wśród celów nauczania działu „Fale i optyka" są sformułowane cztery umiejętności, dotyczące dyfrakcji i interferencji [1]. Jednym ze sposób kształtowania tych umiejętności mogą być samodzielne doświadczenia uczniów lub pokazy nauczyciela na temat dyfrakcji i interferencji światła na skrzyżowanych siatkach dyfrakcyjnych. Opisy tych doświadczeń są zawarte w niniejszym artykule.

Jak wiadomo, siatka dyfrakcyjna jest płytką przezroczystą dla światła, na której zostały wykonane nieprzezroczyste i równoległe do siebie linie o jednakowej grubości. Odległości między tymi liniami są jednakowe. W ten sposób między liniami wytworzono przezroczyste szczeliny. Ogólnie mówiąc, wiązka światła, przechodząca przez taki układ szczelin ulega na nich dyfrakcji i interferencji. Dzięki temu na ekranie ustawionym za siatką obserwuje się na przemian ciemne i jasne obszary, czyli minima i maksima interferencyjne, których kształt zależy m.in. od przekroju poprzecznego wiązki światła [2].

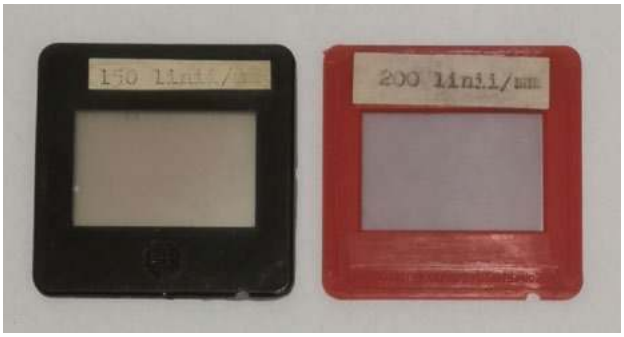
Szczegółowe wyjaśnienie tworzenia się takiego obrazu jest podane w wielu podręcznikach szkolnych. Ponieważ długości fali światła widzialnego wynoszą 0,38-0,76 µm, to rozmiary szczelin i odległości między nimi muszą mieć porównywalne rozmiary. Wynika stąd, że siatka dyfrakcyjna na długości 1 mm powinna mieć, co najmniej kilkaset linii.

Doświadczenia z siatkami dostępnymi w szkole

Często spotykane w szkołach siatki dyfrakcyjne starszego typu składają się z kawałka kliszy fotograficznej lub plastikowej płytki, którą umieszczono w ramce do slajdów o wymiarach 50x50 mm. Takie siatki mają zwykle 150 albo 200 linii/mm, a ich wygląd przedstawia fot. 1. Obecnie klisze fotograficzne i ramki do slajdów są trudno dostępne w handlu. Dlatego w nowszych siatkach stosuje się przezroczyste folie poliestrowe, przymocowane do kawałka kartonu z wyciętym okienkiem (rys. 1). Rysy są nadrukowane na folii przy użyciu drukarki laserowej o dużej rozdzielczości lub wytłaczane w procesie produkcji. Cena takiej siatki, mającej 500 albo 1000 rys/mm wynosi ok. 14 zł.

Oferowane są również siatki dyfrakcyjne w postaci arkusza takiej folii, który daje się łatwo ciąć na kawałki o potrzebnych wymiarach [3]. Najbardziej trwałe i najdokładniejsze siatki dyfrakcyjne, używane do zastosowań profesjonalnych, były wytwarzane przez narysowanie na płytkach szklanych równoległych rys. Wykonywano to ostrzem diamentowym, przesuwanym za pomocą specjalnego mechanizmu prowadzącego.

eprasa.pl 8ee85682dd



Fot. 1 Przykłady spotkanych w szkołach siatek dyfrakcyjnych starszego typu.

Rys. 1. Siatka dyfrakcyjna wykonana współcześnie: źródło [3].

Siatki dyfrakcyjne, produkowane do celów edukacyjnych są siatkami transmisyjnymi, tzn. że światło przez nie przechodzi. W przyrządach optycznych bywają też stosowane siatki odbiciowe, w których od spodu przezroczystej płytki z rysami jest naniesiona warstwa odbijająca światło [4]. Działanie tych siatek polega na tym, że światło pada na płytkę od strony przezroczystej i ulega dyfrakcji na krawędziach rys, a następnie odbija się i przechodząc ponownie przez płytkę, znów ulega dyfrakcji. W końcu ugięte wiązki światła, wychodzące z płytki interferują ze sobą.

Inna budowa siatki odbiciowej polega na tym, że na płytce, niekoniecznie przezroczystej, są wyżłobione rowki i ta rowkowana powierzchnia jest pokryta warstwą odbijającą. Przykładem siatek odbiciowych, łatwo dostępnych na co dzień, są płyty CD i DVD. Jak wiadomo, na powierzchni takiej płyty jest wykonany rowek kształcie spirali o bardzo małym skoku, spełniający rolę szczeliny. Istnieją liczne artykuły i opisy, m.in. w Internecie, nt. wykorzystania fragmentów takich płyt, jako siatek dyfrakcyjnych i budowy z nich spektroskopów do celów edukacyjnych.

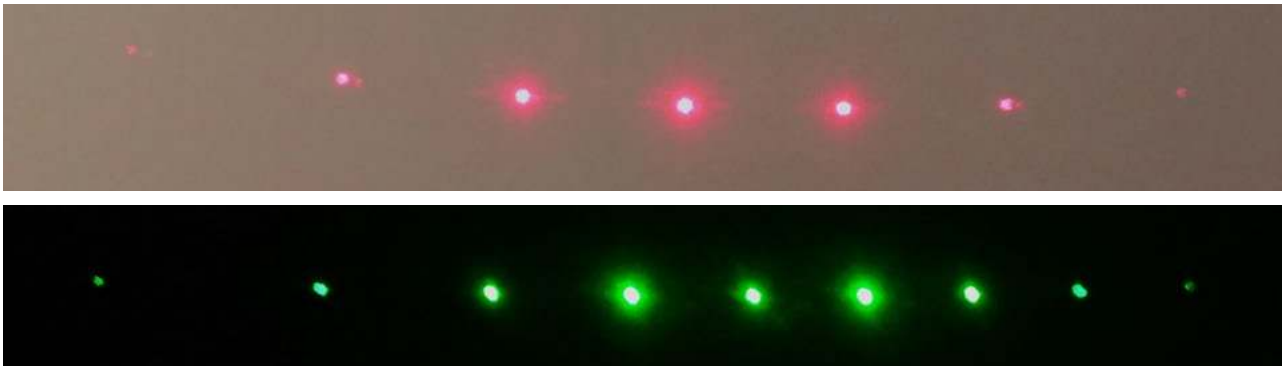
Do doświadczeń można wykorzystywać zarówno tzw. światło białe, np. z żarówki LED, światło słoneczne, jak i monochromatyczne. Jako źródło światła monochromatycznego bardzo dobrze nadają się powszechnie używane wskaźniki laserowe. W zupełności wystarczą wskaźniki laserowe małej mocy, które bywają dostępne na bazarach lub w sklepach z gadżetami i kosztują kilka złotych. Można też wykorzystać wskaźnik laserowy, wbudowany w pilota przeznaczonego do sterowania rzutnikiem multimedialnym.

Na początek dobrze jest powtórzyć znane doświadczenia i pokazać dyfrakcję na pojedynczych siatkach, oświetlonych światłem monochromatycznym albo światłem białym. Obrazy otrzymane w tych doświadczeniach będą stanowiły materiał porównawczy dla wyników uzyskanych w następnych eksperymentach. Przykładowe wyniki takich doświadczeń, uzyskane po skierowaniu wiązki światła ze wskaźników laserowych – czerwonego i zielonego przedstawia fot. 2.

W przeprowadzonych doświadczeniach użyto siatek dyfrakcyjnych starszego typu, umieszczonych w odległości kilkudziesięciu cm od białej ściany i oświetlonych światłem ze wskaźnika laserowego, umieszczonego tuż przed siatkami. W najprostszej wersji tych doświadczeń siatka była trzymana jedną ręką, a wskaźnik laserowy drugą. Fotografie wykonano aparatem w telefonie komórkowym. Podczas fotografowania pomieszczenie zostało częściowo zaciemnione i wyłączono lampę błyskową w telefonie. Ponieważ wiązka światła ze wskaźnika laserowego ma przekrój poprzeczny zbliżony do kołowego, to maksima wytwarzane przez siatki też mają podobny kształt.

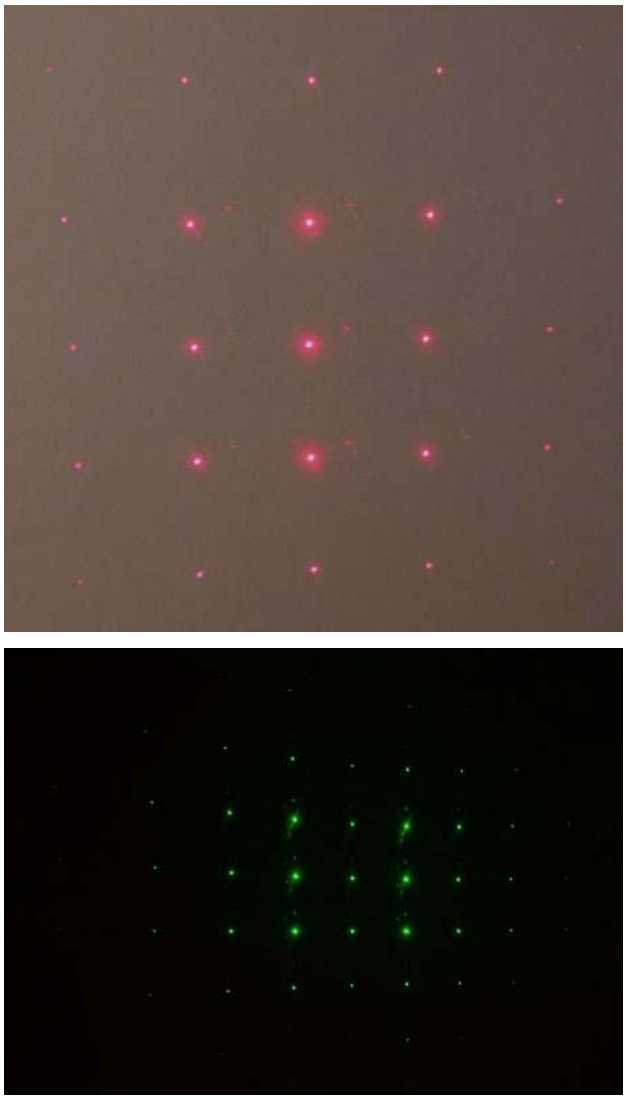
Drugim etapem doświadczeń była dyfrakcja na siatkach skrzyżowanych. W tym celu jedną siatkę przyłożono do drugiej. W początkowym wariancie linie obu siatek skierowano prostopadłe do siebie. Oświetlenie, pozostałe warunki i sposób postępowania były analogiczne, jak poprzednio. Wykonane, jak potocznie się mówi „z ręki", zdjęcia obrazów dyfrakcyjnych przedstawia fot. 3. Widać, że układ maksimów został zwielokrotniony w kierunku pionowym i tworzy obraz widoczny na fot. 2.

Zwielokrotnienie obrazów jest spowodowane tym, że promienie ugięte przez pierwszą siatkę np. w kierunku poziomym, padają na drugą siatkę, która ugina je kierunku prostopadłym, czyli pionowym. Dwukrotnie ugięte promienie interferują ze sobą i dają układ dwuwymiarowy, którego maksima są widoczne w węzłach sieci o oczkach zbliżonych do prostokątów. Widoczna asymetria układu maksimów jest spowodowana nieco ukośnym padaniem wiązki światła. Zakrzywienie linii, na której znajdują się



Fot. 2. Szeregi maksimów wytwarzane przez pojedyncze siatki dyfrakcyjne 200 rys/mm, oświetloną wskaźnikiem laserowym: a) czerwonym λ = 650 nm, b) zielonym λ = 532 nm.

eprasa.pl 8ee85682dd



Fot. 3. Obrazy uzyskane na dwóch nałożonych na siebie siatkach dyfrakcyjnych 200 rys/mm przy wzajemnie prostopadłych kierunkach rys. Oświetlenie takie samo, jak w opisie fot. 2.

maksima na fot. 2.a wynika z niewielkiej nierówności kliszy fotograficznej, ponieważ w jednej z ramek do slajdów nie było płytki usztywniającej.

Z kolei mniejsze, dodatkowe maksima na fot. 3 są utworzone przez światło odbite między siatkami od płytek usztywniających. Metodycznie uzasadnione, kolejne etapy tego doświadczenia polegają na obserwacji obrazów dyfrakcyjnych, wytwarzanych przez dwie siatki, których linie są skrzyżowane pod kątem innym, niż kąt prosty i dodaniu następnych siatek. Należy jednak pamiętać, że zwiększenie liczby siatek spowoduje mniejszą jasność obrazów wskutek większego pochłaniania światła i dodatkowe maksima, wytwarzane przez światło odbijane między siatkami.

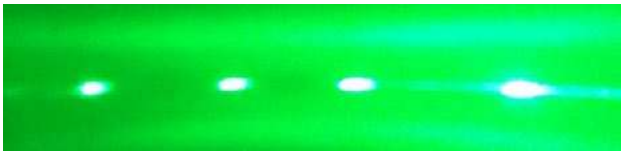
Jako doświadczenie uzupełniające należy jeszcze skierować siatkę dyfrakcyjną w stronę niezbyt silnego źródła światła, np. żarówki, świetlówki, czy latarki. Patrząc na te źródła można zaobserwować i porównywać widma światła, które wytwarzają. Kolejny etap tego doświadczenia, to obserwacja źródeł przesłoniętych filtrami optycznymi, przepuszczającymi światło o wybranej barwie. W najprostszym przypadku takim filtrem może być kawałek przezroczystej folii, pochodzącej z opakowania produktów spożywczych, np. od słodyczy i zabarwionej markerem. Konieczne jest tutaj dodanie ostrzeżenia – w żadnym przypadku nie wolno używać do tej wersji doświadczeń światła ze wskaźnika laserowego, ani światła słonecznego, ponieważ może to spowodować trwałe uszkodzenie wzroku.

Siatki dyfrakcyjne wokół nas

Okazje się, że w naszym otoczeniu są przedmioty i urządzenia, które można wykorzystać, jako siatki dyfrakcyjne, O płytach CD i DVD już wspomniano wcześniej. Obraz dyfrakcyjny przy użyciu takiej płyty najłatwiej wytworzyć kładąc ją poziomo powierzchnią odbijającą ku górze na ławce ustawionej blisko ściany, która spełni rolę ekranu. Na płytę kieruje się wiązkę światła laserowego pod kątem ok. 10-15° do powierzchni odbijającej. Wiązka powinna padać w płaszczyźnie przechodzącej wzdłuż średnicy płyty. Wówczas na ścianie staje się widoczny pionowy szereg maksimów, podobny do pokazanego na fot. 4. Jeżeli wiązka nie będzie padała w płaszczyźnie przechodzącej przez średnicę płyty, to wtedy maksima będą znajdowały się na linii w kształcie łuku.

Innym przedmiotem, zawierającym siatki dyfrakcyjne, są tzw. tęczowe okulary (fot. 5). Ramka tych okularów jest wycięta z kartonu i są w nią wklejone, dwuwymiarowe siatki dyfrakcyjne, wykonane z przezroczystej folii. Określenie „siatki dwuwymiarowe" oznacza, że są to siatki składające się ze szczelin skrzyżowanych ze sobą pod kątem prostym. Takie okulary w cenie kilku złotych bywają m.in. w sklepach z gadżetami i na bazarach. Patrząc przez tęczowe okulary na różne przedmioty w otoczeniu widać wokół nich tęczowe obwódki. Na fot. 6. pokazano przykłady obrazów dyfrakcyjnych, otrzymanych po oświetleniu takich okularów wskaźnikami laserowymi.

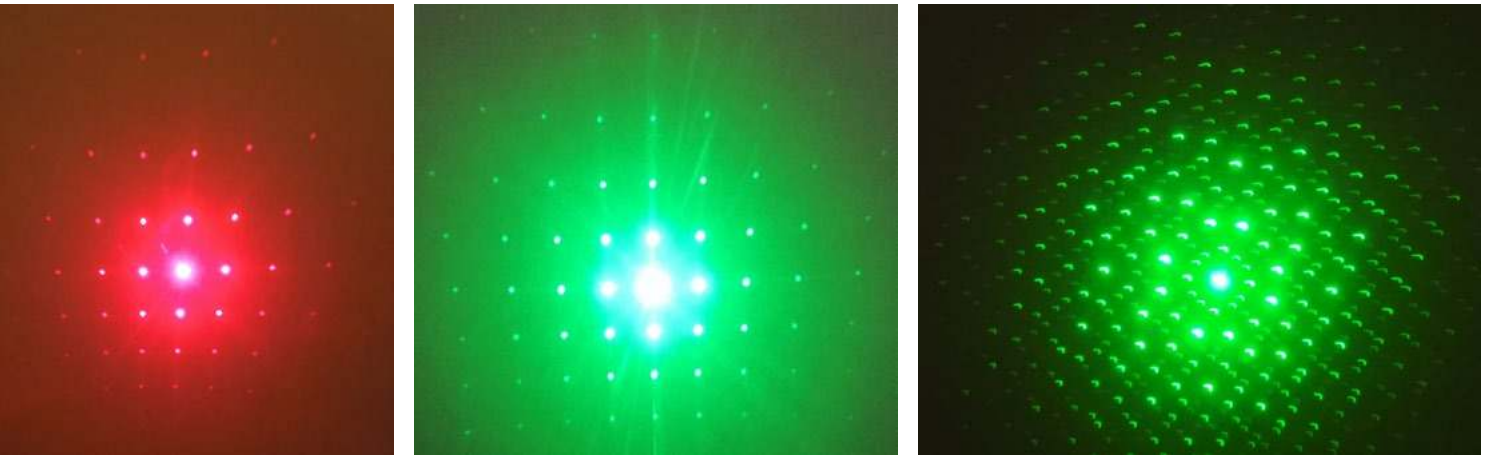
Okazuje się, że również płaskie ekrany odbiorników telewizyjnych, monitorów komputerowych i telefonów



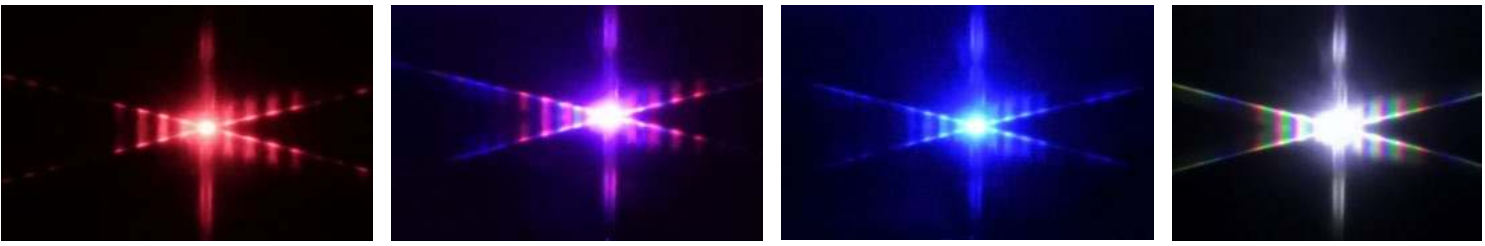
Fot. 4. Szereg maksimów wytworzonych na płycie DVD oświetlonej czerwonym wskaźnikiem laserowym λ = 650 nm.

Fot. 5. Okulary z siatkami dyfrakcyjnymi.

eprasa.pl 8ee85682dd



Fot. 6. Obrazy uzyskane na okularach z siatkami dyfrakcyjnymi po oświetleniu wskaźnikiem laserowym w kolorze: a) czerwonym λ = 650 nm, b) zielonym λ = 532 nm, a ponadto c) po złożeniu ukośnie dwóch okularów i oświetleniu wskaźnikiem zielonym λ = 532 nm.



Fot. 7. Obrazy wytworzone z wyniku dyfrakcji na ekranie tego samego odbiornika telewizyjnego z matrycą ciekłokrystaliczną, oświetlonego wskaźnikiem laserowym w kolorze: a) czerwonym λ = 650 nm, b) zielonym λ = 532 nm, c) niebieskim λ = 450 nm, a ponadto d) oświetlonego światłem białym, emitowanym przez OLED (organiczną diodę elektroluminescencyjną) z latarki czołowej.

komórkowych mogą działać jako siatki dyfrakcyjne. Jak widomo, obrazy, które dają te urządzenia, składają się z małych elementów tzw. pikseli. Nazwa piksel pochodzi od angielskich słów „picture element", czyli element obrazu. Rozmiary pikseli są rzędu setnych części mm, a więc porównywalne z odległościami między szczelinami siatki dyfrakcyjnej.

Wspólna cecha różnych typów ekranów polega na tym, że zawierają płyty, na których w regularny sposób zostały umieszczone elementy konstrukcyjne, m.in. elektrody, przeznaczone do wytwarzania tych pikseli. Właśnie te elementy stają się dobrymi siatkami dyfrakcyjnymi, gdy urządzenie jest wyłączone i jego ekran oświetlony ukośnie padającą wiązką światła monochromatycznego, albo białego. Kilka przykładów uzyskanych w ten sposób obrazów dyfrakcyjnych jest pokazanych na fot. 7 i 8.

Fot. 8. Obraz otrzymany po oświetleniu ekranu telefonu komórkowego wskaźnikiem laserowym w kolorze niebieskim λ = 450 nm, (fot. Jerzy Krysiak).

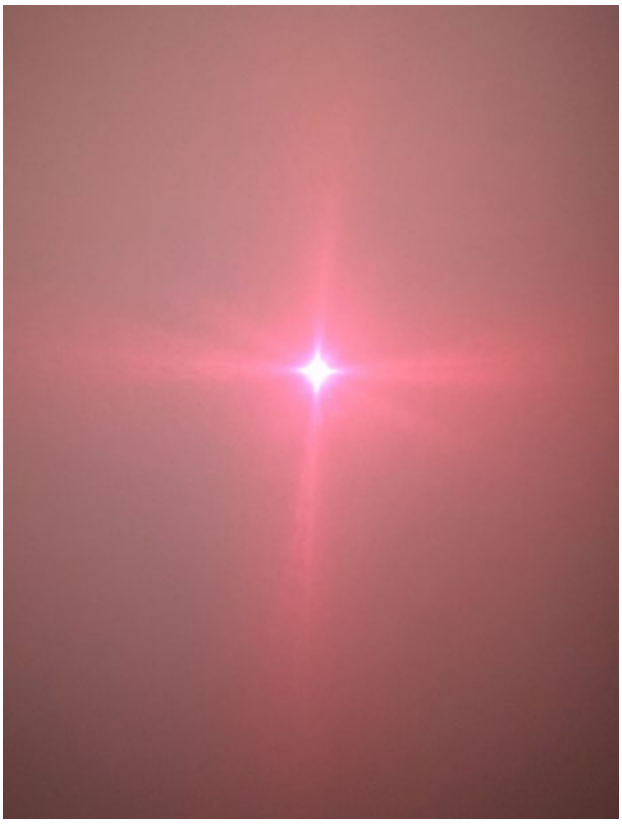
Dyfrakcja, czy efekt mory?

Patrząc na wiszącą firankę o drobnych oczkach, której fałdy zachodzą na siebie, można zauważyć nieregularne jasne i ciemne pasma. W tym momencie pojawia się pytanie, czy te pasma są również wynikiem dyfrakcji i interferencji? Przeprowadzenie dokładniejszej analizy pokazuje, że oczka firanki o rozmiarach rzędu 1 mm są za duże i na to, żeby firanka działała jak siatka dyfrakcyjna. To stwierdzenie łatwo jest sprawdzić doświadczalnie. Gdy na kawałek firanki zostanie skierowana wiązka światła ze wskaźnika laserowego, to zamiast prążków interferencyjnych widać tylko rozproszenie światła na brzegach oczka (fot. 9).

Z ostatnio opisanego doświadczenie wynika, że zaobserwowany efekt ma inne przyczyny, niż dyfrakcja oraz interferencja i jest nazywany morą. Polega on na tym, że w układzie dwóch regularnych struktur przesuniętych lub obróconych względem siebie, linie tworzące te struktury pojawiają się okresowo bliżej albo dalej, niż w każdej z tych struktur.

To okresowe zagęszczanie i rozrzedzanie się linii można wykazać matematycznie, rozpatrując dwa przesunięte względem siebie układy równoległych i równoodległych kresek, przy założeniu, że w każdym z tych układów kreski znajdują się nieco innych odległościach [5]. Warto tutaj wspomnieć, że takie układy są podstawą działania noniuszy,

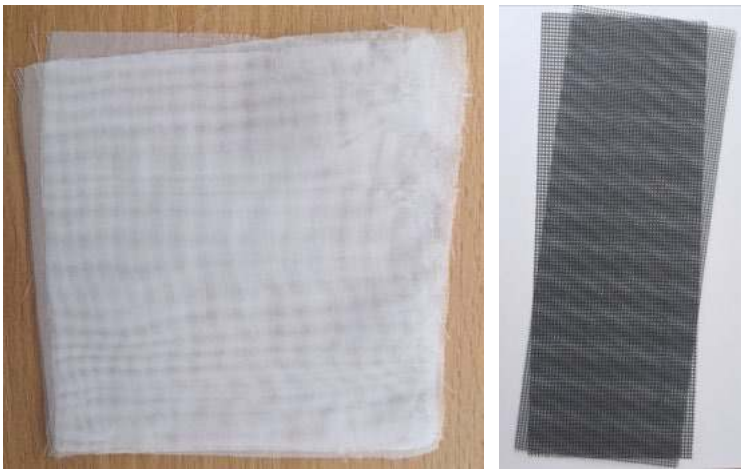
eprasa.pl 8ee85682dd



Fot. 9. Efekt mory widoczny po nałożeniu ukośnie na siebie dwóch: a) kawałków firanki, b) siatek do szlifowania gładzi gipsowej.

zwiększających dokładność pomiaru m.in. suwmiarką. Linie tworzące regularne struktury wcale nie muszą być proste. Mogą to być, np. współśrodkowe okręgi. Dwa układy takich okręgów, nadrukowane na kawałki przezroczystej folii lub kalki technicznej i przesuwane względem siebie, pozwalają w efektowny sposób modelować interferencję fal wytwarzanych przez źródła punktowe [6].

Efekt mory można zaobserwować na wielu przedmiotach powszechnego użytku (fot. 10). Mogą to być m.in. kawałki tkanin o rzadkim splocie, przeznaczone do wyrobu firanek, kawałki gazy opatrunkowej lub bandażu, sitka używane w kuchni, siatki do szlifowania gładzi gipsowej. Dla pełnego obrazu sytuacji należy dodać, że bywają tkaniny o bardzo gęstym splocie, na których czasem udaje się zaobserwować dyfrakcję i interferencję. Pojawiające się wtedy efekty są najczęściej słabo widoczne i trudne do sfotografowania przy użyciu aparatów w telefonach komórkowych. Póki co, trzeba się z tym niestety pogodzić, bo sztuczna inteligencja nawet najbardziej zaawansowanych smartfonów w niektórych sytuacjach jeszcze nie dorównuje ogromnej zdolności adaptacyjnej ludzkiego wzroku.



Fot. 10. Rozpraszanie wiązki światła czerwonego ze wskaźnika laserowego λ = 650 nm na pojedynczym oczku firanki.

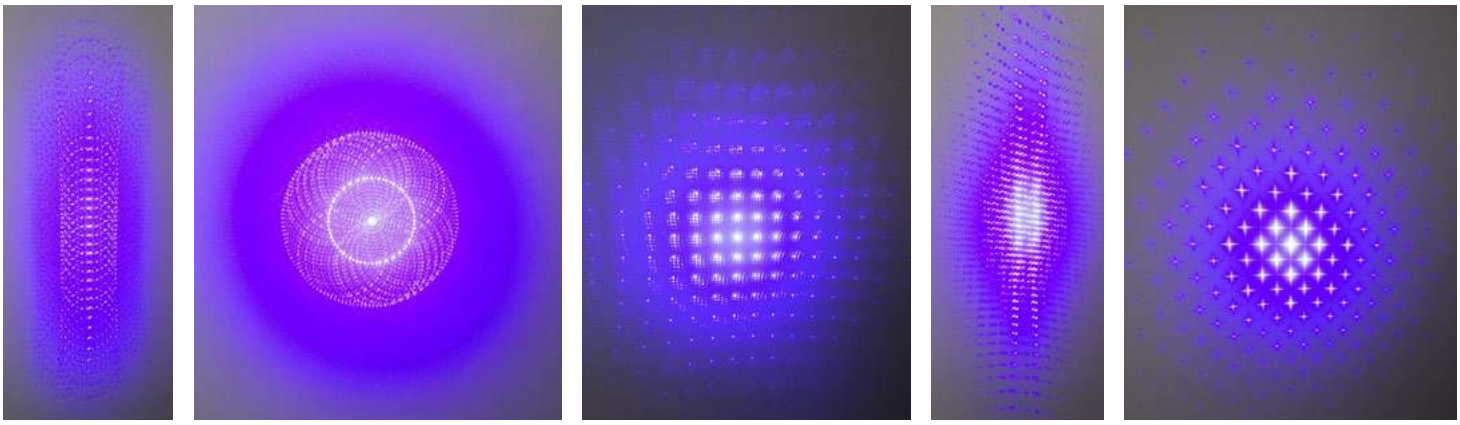
Żeby ułatwić obserwacje efektów optycznych na tkaninach można wykonać prosty przyrząd do ich naprężania pokazany na fot. 11. Są potrzebne dwa jednakowe, plastikowe kubki o stożkowych powierzchniach bocznych, np. od produktów spożywczych. Jeden z tych kubków powinien dać się wcisnąć w drugi. W denkach obu kubków należy wyciąć centralnie umieszczone, kołowe otwory o takiej samej średnicy. Żeby ułatwić wciśnięcie trzeba obciąć górną część kubka zewnętrznego (fot. 11.a). Wybrany kawałek tkaniny nakłada się na kubek wewnętrzny i naprężą przez wciśnięcie drugiego kubka (fot. 11.b). Zamiast opisanego przyrządu można wykorzystać tamborek, czyli dwa wciskane na siebie pierścienie, używane do naprężania tkanin podczas haftowania.

Zasady bezpieczeństwa

Bezpieczeństwo podczas wykonywania doświadczeń jest sprawą najważniejszą. Do opisanych eksperymentów wystarczą wskaźniki laserowe małej mocy. Z powodzeniem mogą to być tanie lasery o mocy 1-5 mW, emitujące światło czerwone o długości fali λ = 650 nm. Najczęściej są to lasery półprzewodnikowe o pracy ciągłej, zaliczane do

Fot. 11. Przyrząd do naprężania tkaniny, ułatwiający obserwacje efektów optycznych: a) części składowe, b) widok po złożeniu.

eprasa.pl 8ee85682dd



Fot. 12. Przykłady obrazów wytwarzanych na siatkach dyfrakcyjnych, wbudowanych w końcówki lasera dyskotekowego.

bezpiecznych klas 1, 1M oraz 2 [7]. Takie lasery nie wymagają środków ochronnych, np. specjalnych okularów. Mimo tego należy przestrzegać kilku podstawowych zasad.

- Nigdy nie kierować wiązki światła w kierunku innej osoby, a szczególnie w stronę jej twarzy.
- Przed skierowaniem wiązki światła na jakiś element trzeba sprawdzić, czy ma on właściwości odbijające lub skupiające. Jeżeli tak, to konieczne jest ustalenie, w którym kierunku będzie się poruszała wiązka odbita podczas doświadczenia. Na tym kierunku nie może znajdować osoba wykonująca doświadczenie, ani żadna inna.
- Trzeba pamiętać, że przezroczysta płytka szklana, albo plastikowa też odbija część padającej na nią wiązki światła, która może być niebezpieczna. Jeżeli to możliwe, bezpieczniej jest skierować wiązkę lasera nie prostopadle na element optyczny, ale pod nieco mniejszym kątem. Wtedy wiązka odbita nie trafi w eksperymentatora. Tak właśnie postępowano wykonując doświadczeń, których wyniki są przedstawione na fot. 2 i 3.

Na portalach handlowych, szczególnie na Allegro, jest mnóstwo atrakcyjnych ofert sprzedaży laserów o dużej mocy. Ich autorzy nie bardzo mają pojęcie o właściwościach proponowanych produktów. Można więc przeczytać następujące zdania: „niebieski laser wskaźnik laserowy blue przepalający najmocniejszy 5000MW", „laser ultra wskaźnik laserowy zielony mocny 90000W akumulator ładowarka 4w1", „Laser Niebieski WypalaPrzepalaNajmocniejszy 5000mW" (pisownia oryginalna, skopiowana z Internetu) [8-11]. Tego rodzaju lasery są zupełnie niepotrzebne do szkolnych doświadczeń z optyki, a ich nieumiejętne użycie może doprowadzić do trwałej utraty wzorku, zniszczenia elementu optycznego, poparzenia lub pożaru.

Podsumowanie

W zakończeniu zostanie zwrócona uwaga tylko na niektóre aspekty dyfrakcji i interferencji. Opisane doświadczenia nie wymagają długotrwałego przygotowania – można je wykonać „od ręki", a do ich przeprowadzenia wystarczą łatwo dostępne przedmioty. Użycie wskaźników laserowych małej mocy i zachowanie należytej ostrożności, pozwala na bezpieczne wykonanie tych doświadczeń również w formie samodzielnych ćwiczeń uczniowskich. Dlatego na doświadczenia, dotyczące dyfrakcji interferencji warto zwrócić uwagę.

Są też inne powody, dla których należy zrozumieć te zjawiska. Najbardziej czułymi przyrządami są interferometry – umożliwiły m.in. wykrycie fal grawitacyjnych i wykluczenie istnienia eteru, uważanego za ośrodek konieczny do rozchodzenia się światła. Interferencja zachodzi niezależnie od długości fali. Są też interferometry, pracujące w zakresie promieni rentgenowskich, w których rolę siatek dyfrakcyjnych spełniają układy atomów i cząsteczek. Dzięki temu można badać struktury kryształów i dokonano niezwykle ważnego odkrycia spiralnej struktury kwasu dezoksyrybonukleinowego – cząsteczki, zawierającej informację o „życiowo-ważnym znaczeniu".

Interferencję wykorzystuje się też do celów artystycznych i rozrywkowych, m.in. w laserach dyskotekowych. Kilka obrazów wytwarzanych przez taki laser, zaopatrzony końcówki z wbudowanymi układami skrzyżowanych siatek dyfrakcyjnych przedstawia fot. 12. Ponadto, w zjawiskach dyfrakcji i interferencji przejawiają się nie tylko falowe właściwości światła, ale też najbardziej podstawowe i wciąż niewyjaśnione właściwości materii w skali mikroskopowej [12, 13].

Stanisław Bednarek
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego

Fot. 1-7 i 9-12 autor

LITERATURA

[1] Podstawa programowa, liceum i technikum, fizyka, s. 19, pkt. 8-12, https://podstawaprogramowa.pl/Liceum-technikum/Fizyka.
[2] S. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, część IV optyka, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1963.
[3] https://www.eduvis.pl/oferta/fizyka-pomoce-dydaktyczne/siatka-dyfrakcyjna-z-500-zcze linami-mm-detail.
[4] A. Sojecki, Optyka, podręcznik dla liceum zawodowego, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 1985.
[5] S. Bednarek, Czy można obserwować dyfrakcję światła na firance?, „Foton, Pismo dla nauczycieli fizyki i przyrody oraz ich uczniów", nr 75, s. 27-31, (2001).
[6] J. Gaj, Laboratorium fizyczne w domu, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1982.
[7] B. Ziętek, Lasery, Wydanie II rozszerzone i uzupełnione, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 2000.
[8] https://wrohurt.pl/pl/p/LASER-NIEBIESKI-5000mW-5W-WSKAZNIK-LASEROWY-DISCO/10794.
[9] https://allegro.pl/oferta/niebieski-laser-wskaznik-laserowy-blue-przepalajacy-najmocniejszy-5000mw-14891602567.
[10] https://allegro.pl/kategoria/swiatlo-i-efekty-lasery-122390.
[11] https://allegrolokalnie.pl/oferta/laser-niebieski-wypalaprzepalanajmocniejszy--5000mw.
[12] C. Sobczak, Przez szczeliny do świata kwantów, „Fizyka w Szkole z Astronomią, Czasopismo dla Nauczycieli", nr 1 (390), rocz. LXIV, s. 21-27 (2024).
[13] C. Sobczak, Mechanika kwantowa – od pojęcia kwantu do całek po trajektoriach, „Fizyka w Szkole z Astronomią, Czasopismo dla Nauczycieli", nr 2 (369), rocz. LXI, s. 26-28 (2021).

eprasa.pl 8ee85682dd

Rodzinne eksperymentowanie jako element edukacji domowej

Dostarczanie dziecku w przedszkolu oraz wieku szkolnym nowych wrażeń emocjonalnych podczas eksperymentów realizowanych w domu, stanowi nowe, lepsze podejście do edukacji domowej. Jest to szczególnie ważne, gdy działania dokonywane są rodzinnie, przy aktywnym udziale rodziców wraz z dziećmi oraz dziadków.

Kazimierz **Mikulski**

Ogólnie znane określenie: „***Eksperyment*** *(łac. experimentum – doświadczenie, badanie) – w naukach przyrodniczych i społecznych zbiór działań wzbudzających w obiektach materialnych określone reakcje i zjawiska w warunkach pozwalających kontrolować wszelkie istotne czynniki, które poddaje się dokładnej obserwacji*”[1] jest słowem wyjściowym do przedstawienia naszych spostrzeżeń z edukacji domowej.

Zainteresowała nas odpowiedź na pytanie: Czy z dziećmi w wieku przedszkolnym można realizować eksperymenty? Czy mogą być realizowane w domu, w przygotowaniu i przebiegu bierze udział rodzina, prawie cała?

Po odzyskaniu w 1918 r. niepodległości edukacja domowa została rok później prawnie usankcjonowana jako wariant realizacji obowiązku szkolnego. Po 1945 r. początkowo była jeszcze możliwa, w 1956 r. wydano jednak dekret o obowiązku edukacji w placówkach szkolnych. Dopiero po zmianie ustroju nastąpiła zmiana. W 1991 r. Sejm przyjął ustawę o systemie oświaty przywracającą rodzicom prawo organizowania własnemu dziecku edukacji. Według ks. prof. Jana Kazimierza Przybyłowskiego z UKSW rodzina jest naturalnym środowiskiem edukacyjnym, ponieważ „*człowiek jest osobą rodzinną*”. „Najważniejsze w edukacji pozaszkolnej jest promowanie kultury uczenia się przez całe życie. Tu uczeń i nauczyciel uczą się razem. Fundamentem edukacji domowej jest uczenie się przez działanie, przez praktykę i w klimacie dobrowolności. Proces uczenia się jest oparty na motywacji wewnętrznej ucznia, a edukacja ma charakter interdyscyplinarny i jest zindywidualizowana. To filozofia nauczania i uczenia się dostosowana do potrzeb dziecka” – podsumował ks. Przybyłowski.[2]

Rodzinne eksperymentowanie, czyli początek naszego eksperymentowania

W pierwszych dniach lipca 2023 r. zrealizowano „***Rodzinne eksperymentowanie***”, czyli warsztaty małego chemika. Warsztaty dla całych rodzin w ramach #FamilySpot.

Fotografia 1. *„Rodzinne eksperymentowanie” – mały chemik, czyli wspólne, bezpieczne eksperymenty chemiczne z tego co w kuchni mamy Źródło: https://bydgoszcz.3plus.pl/pl/Aktualnosci/2310,Rodzinne-eksperymentowanie*

Spotkanie to dofinansowano przez Ministerstwo Rodziny i Polityki Społecznej w konkursie „Po Pierwsze Rodzina”.[3]

A jak my rozpoczęliśmy nasze eksperymentowanie?

W dość nietypowy sposób. Nieczynne szkoły i przedszkola, podczas pandemii, spowodowało przymusowe przebywanie w domu. Wnuczka Alicja otrzymała od pani z przedszkola, oczywiście za pośrednictwem Rodzica, zadanie wykonania i zaobserwowania *<cieczy nieniutonowskiej>*. Pani podała sposób wykonania tej cieczy, a całą realizację należało w formie dokumentacji fotograficznej przesłać do przedszkola.

I zaczęło się!

Do wykonania płynu, tego „inteligentnego”, trzeba stworzyć w naczyniu – misce, odpowiednią konsystencję wody i mąki ziemniaczanej, zwanej skrobią. Cechą charakterystyczną tego płynu jest to, że twardnieje pod wpływem nacisku. Wydaje się, że im większą siłę na niego wywieramy tym większy opór stawia ciecz. Jest ona zarówno płynem jak i ciałem stałym. Nazwana cieczą nieniutonowską. W szkole uczono nas, że wyróżniamy 3 stany skupienia materii: stały, ciekły i gazowy. Stwierdza się, że jest coś pośredniego. Otóż, ciecz nienewtonowska, to substancja, która czasem zachowuje się jak ciało stałe, a czasem jak ciecz. Nie spełnia hydrodynamicznego prawa Newtona i nie będziemy wyjaśniać co mówi to prawo, ani jaką rolę odgrywają tu dewiatorowy tensor naprężeń,

[1] https://pl.wikipedia.org/wiki/Eksperyment [dostęp” 31.10.2023].
[2] https://www.prawo.pl/oswiata/eksperci-edukacja-domowa-waznym-elementem-systemu-oswiaty,131786.html
[3] https://www.facebook.com/PoPierwszeRodzina.Official

eprasa.pl 8ee85682dd

Fotografia 2, 3, 4. *Przygotowanie cieczy przez Alicję oraz pierwsze eksperymentowanie Źródło: http://www.dzieciecafizyka.pl/chemia/ciecznieniuton/ciecznieniuton.html oraz zdjęcia autora*

lepkość płynu, naprężenie ścinające i krzywa płynięcia, która nie jest taką funkcją liniową prostą.

Ciecz nienewtonowska zachowuje się jak ciało stałe, gdy dostarczamy jej energii, czyli gdy będziemy dążyli do zmiany jej np. kształtu. Używając wobec takiej cieczy siły, na przykład uderzając w jej powierzchnię palcem lub innym elementem, przy odpowiednio szybkich i mocnych ruchach, płyn będzie twardnieć, kruszyć się i przypominać substancję stałą. Jeśli natomiast z taką cieczą obchodzimy się delikatnie, to po prostu rozpływa się. Ulepiona z niej kulka twardnieje dopóki nasze dłonie się poruszają. W chwili zaprzestania jej ściskania, rozpłynie się i ucieknie między palcami.[4]

Wizualizacja części eksperymentalnej

Oczywiście wszystkie działania, wówczas niespełna trzyletniego dziecka (wnuczki Alicji), odbywały się pod „*bacznym okiem*" mamy i dziadka, którzy chcąc, nie chcąc uczestniczyli w odkrywaniu nowych właściwości materii przez przedszkolaka, zmuszonego przez covid-19 do przebywania w domu. Dzisiaj jest to klasyczne, wręcz standardowe eksperymentowanie realizowane z dziećmi przedszkolnymi, a zasoby Internetu wskazują na możliwości i ciekawe sposoby realizacji.

Cele i efekty eksperymentów

W szerokiej literaturze przedmiotu wskazuje się, że eksperymenty są wykonywane w celu potwierdzenia lub sfalsyfikowania określonej hipotezy. Może na poziomie kształcenia i działania przedszkolnego trudno jest mówić o hipotezach, ale należy pamiętać, że z jednej strony określa ona ściśle warunki eksperymentu, a z drugiej nadaje sens poczynionej w wyniku eksperymentu obserwacji. Decyduje, co w danym eksperymencie jest właściwą obserwacją, a co tylko nieistotnym jego zakłóceniem.

Przytaczam tutaj słowa Maxa Plancka[5] twierdzącego, że „***eksperyment jest swojego rodzaju pytaniem jakie teoria zadaje naturze***".[6]

Celem rodzinnych eksperymentów z dziećmi jest zwrócenie uwagi na działania i siły w przyrodzie (*nauki przyrodnicze*) rozwijające się głównie poprzez świadome, aktywne zaangażowanie w eksperymenty. Z dzieckiem przedszkolnym i uczniami także należy dokonywać

[4] Ciecz nienewtonowska dla dzieci – proste doświadczenie, które wymiata! https://ronja.pl/ciecz-nienewtonowska/
[5] Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858–1947), niemiecki fizyk, noblista z 1918 r. https://pl.wikipedia.org/wiki/Max_Planck
[6] Max Planck, *Scientific Autobiography and other papers, Philosophical Library, 1949*

Fotografia 5. *„Przygotowanie" przez Alicję oraz rodzeństwo obserwacji – notowania co godzinę, cienia rzucanego przez Słońce na kartkę papieru. Rodzic podpowiada i objaśnia jak należy to dokonać, by ciekawe wyniki widoczne były na planszy. Widoczny także, użyty podczas eksperymentu, wcześniej znany dzieciom kompas – model harcerski z lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku! Źródło: zdjęcia autora*

Fotografia 6, 7. *Głównym „bohaterem" realizacji przez Alicję oraz rodzeństwo obserwacji – notowania cienia rzucanego przez Słońce na planszę jest tata, wprowadzający i wspomagający w dokonującym się procesie edukacyjnym przedszkolaka Źródło: zdjęcia autora*

eprasa.pl 8ee85682dd

bezpośrednich obserwacji zjawisk zachodzących w środowisku naturalnym, najlepiej w najbliższym otoczeniu dziecka. Jednym z ciekawszych eksperymentów naturalnych jest obserwacja ruchu Słońca po niebie, zwłaszcza, gdy wykonana jest w pierwszym dniu lata.[7] Data dokonania takiego i podobnych obserwacji nie powinna być przypadkowa, ale jeśli warunki na to pozwalają i wymuszają to nie powinno być to warunkiem koniecznym.

W powyżej zaprezentowanym eksperymentowaniu naturalnym, niezbędny jest autorytet rodzica, który potrafi zainteresować i wskazać nie tylko cel działań, ale także wręcz w pierwszej fazie pomóc, nawet szczególnie w sposób praktyczny. Efekt dodatkowy, obok edukacyjnego wzrostu świadomości dzieci, to większe więzi rodzinne między uczestnikami procesu badawczego, chęć pracy i nauki <**razem**> oraz wzbudzenie ciekawości do kolejnych eksperymentów w wykonaniu przedszkolaka.

Inny eksperyment ze zbioru obserwacji przyrodniczych

Niesamowita radość dzieci oglądających pierwszy raz gwiazdy wieczorową porą. A uzupełnieniem tej radości było, oglądanie za pomocą lunety, planety jaką znaleziono na południowym niebie – Saturna. Była to też okazja

[7] https://pl.wikipedia.org/wiki/Eksperyment

Fotografia 8, 9. *Także głównym „bohaterem" realizacji przez Alicję oraz rodzeństwo obserwacji gwiazd i księżyca jest tata, wprowadzający i wspomagający w dokonującym się procesie rozwoju zdolności poznawczych dzieci wieku przedszkolnego, w szczególności przygotowujący teleskop i objaśniający ogólną jego budowę Źródło: zdjęcia autora*

Fotografia 10, 11, 12, 13. *Głównym „bohaterem" realizacji przez Alicję oraz rodzeństwo obserwacji eksperymentu z obserwacją zachowania się cieczy w wodzie, jest zaangażowanie się CAŁEJ rodziny, tak by w pełni zrealizować rozwój zdolności poznawczych dzieci wieku przedszkolnego i jeszcze raz pobudzić ciekawość Źródło: zdjęcia autora*

Fotografia 14. *Realizacja przez Alicję oraz rodzeństwo eksperymentalnej obserwacji w działaniu. Po napełnieniu trzech próbówek jednakową ilością wody, używając większych strzykawek, każde dziecko po kolei uzupełniało te ciecze w próbówkach substancją w ilości około 1 cm, za pomocą strzykawek mniejszych. Były to sok malinowy, mleko i olej domowy Źródło: zdjęcia autora*

eprasa.pl 8ee85682dd

Fotografia 15, 16, 17. *Rodzina jest „bohaterem wspomagającym" realizacji przez Alicję oraz rodzeństwo obserwacji zachowania się wybranych cieczy w określonych ilościach wody. Źródło: zdjęcia autora*

zweryfikowania przez dzieci ich wcześniejszych wiadomości o planetach, oglądanych w przewodnich encyklopedycznych, a także w niektórych opisanych przygodach ich rówieśników (czyli także w bajkach). To naturalna weryfikacja poznanych faktów opisowych i wizualnych z rzeczywistością przyrodniczą podczas eksperymentów naturalnych.

I jeden z wykonanych eksperymentów, z zaangażowaniem CAŁEJ rodziny!?

Przebieg całego eksperymentu był uporządkowany i z jednoznacznie podanym celem. Podano członkom rodziny kolejne kroki postępowania, wskazując czynności, które każdy z nich miał zrealizować. Następnie przygotowano wszystkie środki dydaktyczne, łącznie z cieczami – wodą, mlekiem, syropem malinowym i olejem. Dzieciom podano także naczynia szklane, czyli szklanki oraz próbówki (z koreczkami). Oczywiście ważnym elementem były strzykawki, tutaj dwa rodzaje, większe i mniejsze, dla każdego z uczestników (dzieci) oddzielnie.

Ważnym elementem używanym w eksperymencie były okulary ochronne (godle), używane podczas działań z cieczami (obszar chemicznych działań). Przebieg całego eksperymentu, oczywiście wraz z podaniem celów, czynności pośrednich i efektów końcowych realizowano rodzinnie.

Oczywiście, wszelkie działania związane z eksperymentowaniem konieczne są nabyciem umiejętności przez młodego człowieka polegające na wykonaniu pomiarów przymiarem liniowym składanym (popularne calówki). Przy okazji próby „wykonania" wybranych literek?

Podsumowanie

Przedstawione powyżej przykłady przebiegu wybranych eksperymentów, zrealizowanych w warunkach domowych przez dzieci przedszkolne (*lub uczniów*), są ważnym elementem wczesnej edukacji. Są możliwe do zrealizowania z uczniami w warunkach domowych. Uczestniczy w tym procesie edukacyjnym cała rodzina – dzieci, rodzice i … dziadkowie. Każde działanie edukacyjne, czyli szczególnie udział w eksperymentach, pozostawia w umyśle dziecka ślad, może trudno mierzalny, ale wzbudzający chęć dzieci do poszukiwań i dociekań w obserwacji otaczającego środowiska, w którym się wychowują.

W przygotowaniu opracowanie dydaktyczno-merytoryczne zrealizowanych eksperymentów dzieci wraz z rodzeństwem będących w wieku przedszkolym, które obok działań rodzinnych, jest także miejscem rozwoju dziecka. Główną istotą wszelkich działań w trakcie naszego eksperymentowania jest idea STEAM, (ang. Science, Technology, Engineering, Art and Mathematics)[8], czyli *STEAM* – Nauka i Technologia, interpretowane za pomocą Inżynierii i Sztuki, wszystko w oparciu o elementy matematyki, tak aktualnie wskazywana i zalecana we współczesnym wychowaniu na całym świecie.

dr Kazimierz Mikulski
Maksymilianowo

Fotografia 18, 19, 20, 21. *Realizacja przez Alicję oraz rodzeństwo pomiarów przy użyciu przymiarów składanych. Źródło: zdjęcia autora*

[8] https://akcesedukacja.pl/baza-wiedzy/blog/steam

eprasa.pl 8ee85682dd

Rachunek księżycowy Newtona i nie tylko...

(Miniatura dydaktyczna)

Waldemar **Reńda**

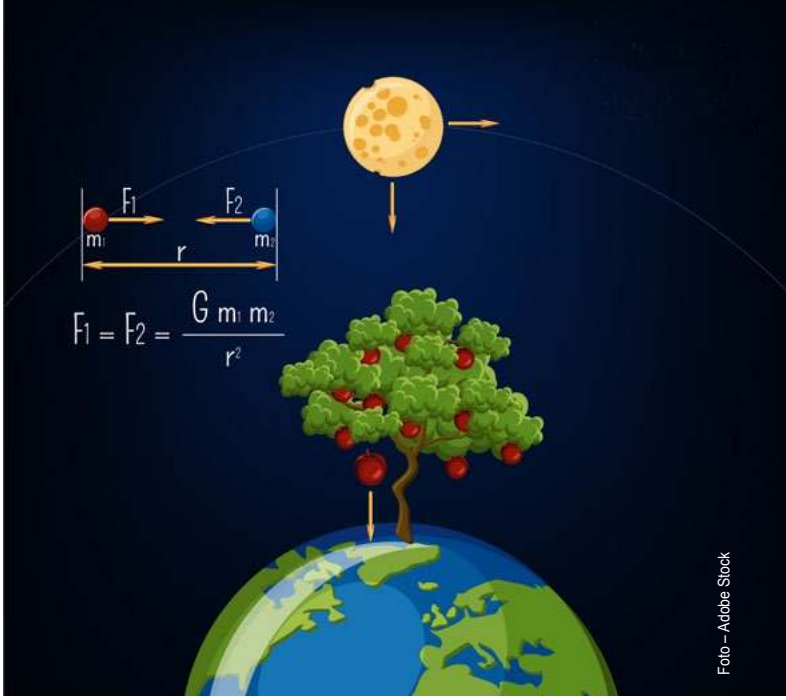


Foto – Adobe Stock

Teoria powszechnej grawitacji Newtona spotkała się z ostrą krytyką współczesnych mu uczonych, a szczególnie Roberta Hooke'a, który upierał się przy swojej teorii wirów. Jednym z argumentów owych krytyków był fakt, że nie obserwuje się tych sił nawet w przypadku ciał o dużych masach.

Newton jednak był przekonany o słuszności swojej teorii, wiedząc, że siły te są na tyle małe, że nie mogą być obserwowane w przypadku ciał, z którymi mamy do czynienia na co dzień. Skąd taka pewność? Zapewne podpowiedziała mu to jego intuicja, ale mógł wykonać pewne proste obliczenia, w wyniku których oszacowałby wartość owych sił. Wykonajmy je. Oczywiście posłużymy się stosowanymi obecnie jednostkami.

Wiedział on, jaka siła grawitacji działa na ciało o danej masie znajdujące się na powierzchni Ziemi. Niech to będzie kula o masie 1 kg. Wówczas Ziemia przyciąga ją siłą ok. 10 N. Odległość pomiędzy środkiem kuli a środkiem Ziemi wynosi 6371000 m.[1] Jeżeli siła grawitacji jest proporcjonalna do masy ciał, to gdyby zamiast Ziemi było ciało o masie 1 kg w odległości równej promieniowi Ziemi, to siła ta byłaby tyle razy mniejsza, ile razy masa owej kuli znajdującej się w odległości $r = R_{Ziemi}$ jest mniejsza od masy Ziemi. No i jest problem, bo tego Newton nie znał. Ale mógł tę masę oszacować, zakładając, że Ziemia zbudowana jest ze znanych mu skał – np. z bazaltów o gęstości ok. 3000 kg/m^3.[2]

Wówczas masa Ziemi: $m = \rho \cdot V = 4/3\ \pi \cdot \rho \cdot R^3$

Zatem owa siła będzie równa $3 \cdot 10/4\pi \cdot \rho \cdot R^3$ niutonów.

Jeżeli zaś siła grawitacji jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości, to zbliżając owe kule na odległość r = 1 m, spowodujemy jej wzrost R^2 razy.Tak więc pomiędzy dwiema kulami o masach po 1 kg z odległości 1m działać będzie siła o wartości:

$$F = 30 : 4\pi \cdot \rho \cdot R = 30 : 2{,}4 \cdot 10^{11} = 12{,}5 \cdot 10^{-11}\ \text{N}$$

Otrzymaliśmy wartość wprawdzie prawie 2 razy większą od znanej nam wartości stałej grawitacji,[3] ale wykładnik potęgi w wystarczającym stopniu informuje, że siły grawitacyjne działające pomiędzy ciałami, z jakimi mamy do czynienia na co dzień, są zbyt małe, aby je zaobserwować czy zmierzyć.

Łatwo obliczyć, że dwie kule – np. z ołowiu – umieszczone tak, że ich środki są odlegle o 1 m, oddziałują wzajemnie siłą grawitacji równą $6{,}67 \cdot 10^{-6}$ N, co odpowiada ciężarowi ciała o masie 6,67 mg, czyli niewielkiego ziarenka kaszy. Nie dziwmy się więc, że Newton nie podjął się trudu pomiaru tak małych sił.

Zrobił to w 1798 roku angielski uczony i niezwykle zdolny eksperymentator Henry Cavendish (1731-1810), uzyskując bardzo dobry wynik. W przeliczeniu na obecnie stosowane jednostki było to $6{,}74 \cdot 10^{-11}$ N. Pomiar ten wykonał przy użyciu skonstruowanej przez siebie wagi skręceń.[4] Oczywiście wówczas wartości tej nie nazywano stałą powszechnej grawitacji, a pojęcie funkcji w fizyce pojawiło się później.[5]

A jak Newton sprawdził, że każde dwa ciała przyciągają się siłami wprost proporcjonalnymi do iloczynu ich mas, a odwrotnie do kwadratu odległości między ich środkami?[6] Nie wiem, jak doszedł do pierwszej części owej zależności, a o tej drugiej pisał we wspomnieniach tak:[7]

---

[1] Wartość ta znana była już od czasów Eratostenesa.

[2] W rzeczywistości średnia gęstość Ziemi to 5520 kg/m^3.

[3] Obecnie podaje się wartość $6{,}6720 \cdot 10^{-11}$ N z dokładnością 0,0006·10–11 N. Jak widać, jest to stosunkowo mała dokładność w porównaniu z wartościami innych stałych fizycznych.

[4] Zob. R. Resnick, D. Halliday, *Fizyka 1*, PWN Warszawa 1999, s. 391.

[5] Po raz pierwszy pojęcie to pojawiło się w pracach G. W. Leibniza z roku 1692, ale obecne znaczenie uzyskało dopiero pod koniec XIX w.

[6] Dotyczy to ciał o symetrii kulistej, co wyraźnie stwierdził sam Newton.

[7] Wspomnienia dotyczą okresu od sierpnia 1665 r. do kwietnia 1667 r, kiedy to w Londynie panowała epidemia dżumy i studenci rozjechali się do domów. Natomiast wspomnienia te pisał 50 lat później, kiedy pracował nad przygotowaniem swego dzieła *Philosophiæ naturalis principia mathematika.* Dodam, że do ostatecznej redakcji i wydania tego dzieła walnie przyczynił się E. Halley, namawiając usilnie Newtona do tej pracy. Zob.: A. K. Wróblewski, *Historia fizyki*, PWN, Warszawa 2006, s. 124.

eprasa.pl 8ee85682dd

„W tym (czasie) zacząłem myśleć o grawitacji sięgającej orbity Księżyca i udało mi się odkryć, jak obliczyć siłę, którą glob obiegający wewnątrz sfery ciśnie na jej powierzchnię, a z prawa Keplera mówiącego o proporcjonalności kwadratów okresów obiegu planet do sześcianów odległości od środków ich orbit wywnioskowałem, że siły utrzymujące planety na ich torach muszą być odwrotnie proporcjonalne do kwadratów odległości od środków, wokół których obiegają. Na tej podstawie porównałem siłę potrzebną do utrzymania Księżyca na jego orbicie z siłą ciężkości na powierzchni Ziemi i znalazłem, że zupełnie nieźle sobie odpowiadają."

Nie wnikajmy w I część tego zdania, bo wówczas jeszcze funkcjonowało pojęcie sfer niebieskich i sądzono, że ciała oddziałują z tymi sferami.[8] Ale wróćmy do tej siły. Oczywiście Newton nie mógł obliczyć wartości tej siły, bo nie znał ani masy Ziemi ani masy Księżyca, ale prawdopodobnie wykonał pewien rachunek, który dziś nazywamy rachunkiem księżycowym.

Jak wiemy Newton nie stosował wzorów, więc nie wykonywał działań na wzorach, ale korzystał z proporcji. Założył on, że siła grawitacji maleje z kwadratem odległości. Na Ziemi siła grawitacji wywołuje przyspieszenie swobodnie spadających ciał o wartości 9,8 m/s^2. Na orbicie Księżyca będzie ono zatem mniejsze $(r/R)^2$ razy, gdzie *r* to średni promień orbity Księżyca. I będzie ono równe przyspieszeniu dośrodkowemu ruchu Księżyca, które ma wartość 0,0027 m/s^2.

Pierwsze obliczenia nie dały poprawnego wyniku, bo nie była wówczas jeszcze znana w miarę dokładna wartość promienia orbity Księżyca. Może też dlatego zwlekał z publikacją swych prac.[9] Dopiero, gdy astronomowie wyznaczyli dokładniejszą wartość owego promienia, to Newton ponowił obliczenia, uzyskując już zadowalający wynik.

Powtórzmy to obliczenie:

Jeżeli $r = 60\ R_{Ziemi}$, to przyspieszenie dośrodkowe ruchu Księżyca powinno mieć wartość: $9{,}8 : 3600 = 0{,}0027$ m/s^2

Newton, po otrzymaniu tego wyniku już nie miał żadnych oporów przed opublikowaniem swojej teorii.[10]

Pisał on również, że jego teoria jest z zgodna z III prawem Keplera. Ba, stwierdził nawet, że wywiódł ją z owego prawa. Nie znalazłem opisu tego wywodu. Dziś raczej III prawo Keplera udowadnia się w oparciu o prawo ciążenia Newtona oraz jego prawa ruchu.[11] Konsekwencją tego prawa jest także proporcja:

$$v_1 : v_2 = r_2 : r_1$$

którą łatwo wyprowadzić ze znanej proporcji:

$$T_1^2 : T_2^2 = r_1^3 : r_2^3$$

Zachęcam do pokazania tego uczniom.

Jak wiemy, I prawo Keplera mówi o tym, że orbitą każdej z planet jest elipsa ze Słońcem w jednym z jej ognisk. Ciekawa jest korespondencja Newtona z E. Halley'em, która dotyczyła właśnie eliptycznego kształtu orbit planet. Halley poprosił bowiem Newtona, by podał matematyczne wyjaśnienie tego faktu.[12] Niestety, nie znalazłem tego dowodu. Podobno podał go w jednej ze swoich prac poprzedzających *Zasady*.

Dziś II prawo Keplera udowadniamy, korzystając z zasady zachowania momentu pędu, która orzeka, że w czasie swobodnego ruchu planety jej moment pędu L = constans. Wybierzmy dwa charakterystyczne punkty orbity danej planety, a więc np. peryhelium i aphelium. W obu punktach musi być spełniona w/w zasada, a więc: $mv_1r_1 = mv_2r_2$, czyli: $v_1/v_2 = r_2/r_1$. Jak widać, prędkość liniowa planety na jej orbicie jest odwrotnie proporcjonalna do odległości od Słońca. Jeżeli więc planeta zbliża się do Słońca, to jej prędkość rośnie, a jak się oddala, to jej prędkość maleje. Jest to także zgodne z zasadą zachowania energii.

Ale to nie jest jeszcze II prawo Keplera.

Napiszmy więc jeszcze raz:

$$mv_1r_1 = mv_2r_2$$

lub:

$$(\Delta s_1/\Delta t_1)\cdot r_1 = (\Delta s_2/\Delta t_2)\cdot r_2$$

Dla $\Delta t_1 = \Delta t_2 = \Delta t$ i $\Delta t \to 0$ możemy zapisać:

$$\tfrac{1}{2}\,\Delta s_1\cdot r_1 = \tfrac{1}{2}\,\Delta s_1\cdot r_1$$

Zauważmy, że: $\tfrac{1}{2}\,\Delta s\cdot r$ to pole ΔS zakreślone przez promień wodzący planet w czasie Δt.

Udowodniliśmy więc, że: $\Delta S_1 = \Delta S_2$, co jest treścią II prawa Keplera. Zapewne podobne działania wykonał Kepler, obliczając długości łuków zakreślonych przez planetę w tym samym czasie w kilku różnych jej odległościach od Słońca.[13] Natomiast rozszerzenie tego dowodu na dowolnie duże pola ΔS wymagałoby zaawansowanej metody matematycznej. Pozostańmy zatem przy tej formie dowodu.

Warto przy tej okazji pokazać uczniom, że dla bardzo małych kątów: $\sin\alpha = \mathrm{tg}\alpha = \alpha$ w mierze łukowej.

Ale wróćmy do prac Newtona. Na wspomnianym rysunku Newton pokazał kilka torów rzutu ciała ze szczytu od-

[8] Pomysł, że siła grawitacji maleje z kwadratem odległości tłumaczono i tym, że powierzchnia sfery rośnie z kwadratem jej promienia, w związku z czym oddziaływanie rozkłada się na większą powierzchnię. Można tu zauważyć analogię do tego, jak maleje natężenie pola grawitacyjnego i gęstość linii tego pola.

[9] Przyczyną była również obawa przed krytyką oponentów, a szczególnie R. Hooke'a.

[10] Opublikował ją jednak dopiero w 1686 roku. Znalazła się ona w trzeciej księdze *Zasad* zatytułowanej *O układzie świata*. Dodam, że dopiero w tej księdze pojawiło się pojęcie powszechnego ciążenia, czyli grawitacji.

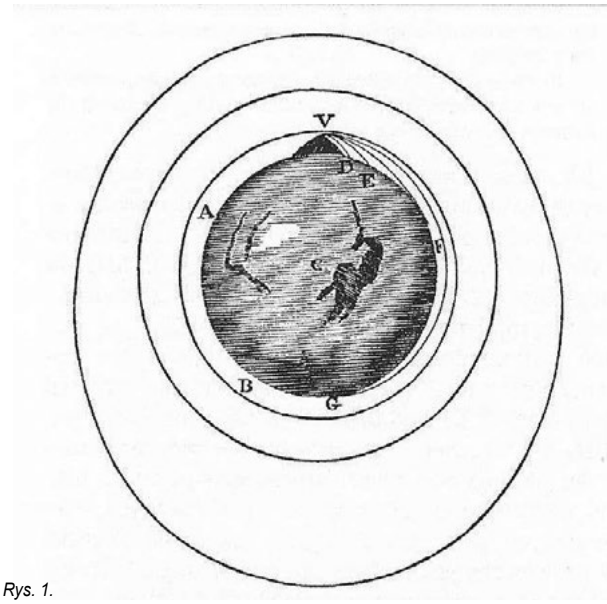
[11] Wyprowadzenie to znajduje się w podręcznikach fizyki dla kursu rozszerzonego. Dodam, że prawo to dotyczy układu, w którym masa ciała centralnego jest znacznie większa od masy planet czy księżyców (np. księżyców Jowisza). Jeżeli masa planety jest znacząca, to obowiązuje rozszerzone prawo Keplera. Można je znaleźć np. w podręczniku astronomii: E. Rybka, *Astronomia ogólna*, PWN, Warszawa, 1983, s. 170.

[12] Jak widać, ówczesne dokonania naukowe uczonych krystalizowały się w wyniku szerokiej wymiany poglądów, a nawet swego rodzaju kłótni. Znane są wzajemne animozje Newtona (1643-1727) i R. Hooke'a (1635-1703).

[13] Podobno dotyczyło to głównie orbity Marsa.

[14] A. K. Wróblewski, *Historia* fizyk, PWN, Warszawa 2006, ryc. 4.47., s. 132. Newton pokazał na nim, że ruch ciał po orbicie – podobnie jak w przypadku rzutów – to nieustanne spadanie z przyspieszeniem grawitacyjnym. Należy zauważyć, że był to dobry pomysł od strony dydaktycznej, choć podobno Newton nie był dobrym wykładowcą. No cóż, genialny uczony nie musi być dobrym wykładowcą. I odwrotnie: dobry wykładowca i dydaktyk nie musi być wybitnym uczonym.

eprasa.pl 8ee85682dd



Rys. 1.

powiednio wysokiej góry i pokazał je prawidłowo.[14] Tory te nazwał krzywymi, a w rzeczywistości są one fragmentami elips wewnętrznych (rys. 1.). Oczywiście pod warunkiem, że nie uwzględnimy oporu powietrza. Zresztą w tym opisie zauważył, że w dostatecznie dużej odległości od Ziemi nie ma powietrza, lub też jest go znikomo mało, bo nie obserwuje się oporu działającego na ciała niebieskie.

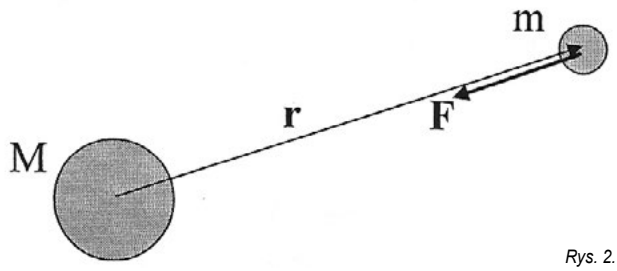
Teraz parę słów o owych orbitach. Okazało się, że tor ruchu ciała w centralnym polu grawitacyjnym jest jedną z krzywych stożkowych lub prostą. Krzywe stożkowe powstają w wyniku przecięcia powierzchni stożka dowolnie usytuowaną płaszczyzną. Przy czym prostą uzyskujemy, gdy owa płaszczyzna jest styczna do powierzchni tego stożka. Tymi krzywymi może być elipsa, okrąg, parabola lub hiperbola. Zatem, która z tych krzywych jest torem poruszającego się danego ciała? A to zleży od prędkości początkowej tego ciała v_o.

Niech ciało znajduje się w odległości $r > R_Z$. Nadajmy mu prędkość początkową $v_o \neq 0$ o kierunku prostopadłym do **r**. Jeżeli ta prędkość będzie równa $(\gamma \cdot r)^{1/2}$, to ciało będzie okrążało Ziemię po orbicie kołowej o środku w środku Ziemi.[15] Przy czym γ to wartość natężenia pola grawitacyjnego równa $G \cdot M_Z/r^2$.

Jeżeli $v_o < (\gamma \cdot r)^{1/2}$, to ciało będzie poruszało się po elipsie wewnętrznej, tzn. takiej, której środek Ziemi będzie w ognisku elipsy dalej położonym od punktu, w którym początkowo znajdowało się ciało. Zatem położenie to będzie apogeum orbity.

Jeżeli $(\gamma \cdot r)^{1/2} < v_o < (2\gamma \cdot r)^{1/2}$, to ciało będzie poruszało się po elipsie zewnętrznej, to znaczy takiej, w której środek Ziemi znajduje się w ognisku bliższym położenia początkowego tego ciała. Zatem położenie to będzie perygeum tej elipsy.

Jeżeli $v_o = (2\gamma \cdot r)^{1/2}$, to ciało będzie poruszało się po elipsie z wierzchołkiem w położeniu początkowym tego ciała.[16]



Rys. 2.

Jeżeli zaś $v_o > (2\gamma \cdot r)^{1/2}$, to ciało będzie poruszało się po hiperboli z wierzchołkiem w położeniu początkowym tego ciała. Oczywiście mówimy tu o jednej z gałęzi owej paraboli czy hiperboli.

Jeżeli $v_o = 0$, to ciało rozpocznie swobodne spadanie po prostej. Oczywiście że warunkiem koniecznym w tym przypadku jest to, by układem odniesienia był układ inercjalny.

Podsumowując, warto zauważyć, że sformułowane przez Newtona prawo powszechnej grawitacji nie było wynikiem olśnienia wywołanego widokiem spadającego jabłka w sadzie, ale skutkiem blisko 20 lat dociekań i analiz, a nierzadko i sporów z niektórymi z ówczesnych uczonych. Natomiast obecna postać tego prawa została sformułowana dużo później. Przy czym cytując to prawo, zwykle podaje się dobrze znany wzór na wartość sił grawitacji działających pomiędzy dwoma ciałami o masach m_1 i m_2, których środki znajdują się w odległości *r*.[17]

$$F = G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$$

Natomiast realizując z uczniami program rozszerzony, warto podać wzór w pełni określający wektor siły **F** działającej na ciało o masie *m* w polu grawitacyjnym ciała o masie *M*. Oto on:

$$\vec{F} = -G \frac{M\,m}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

Przy czym ***r/r*** to wektor jednostkowy (wersor) wektora ***r***. Siła działająca na ciało o masie *m* ma wartość: $G \cdot m_1 \cdot m_2 / r^2$, kierunek wektora ***r*** oraz zwrot przeciwny do wektora położenia ***r***, o czym informuje nas znak minus (rys. 2.).

Na koniec pozwolę sobie wymienić nazwiska uczonych z tamtego okresu. Oto oni: Galileusz (1564-1642), J. Kepler (1571-1630), Kartezjusz (1596-1650), P. de Fermat (1601-1665), O. Guericke (1602-1686), E. Torricelli (1608-1647), J. Heweliusz (1611-1687), B. Pascal (1623-1662), R. Boyle (1627-1691), G. D. Cassini (1626-1712), Ch. Huygens (1629-1695), R. Hooke (1635-1703), O. Römer (1644-1720), J. Flamsted (1646-1719), A. von Leeuwehoek (1632-1723), G. Leibniz (1646-1716), L. Euler (1707-1783).

Zapewne koleżanki i koledzy fizycy znają te nazwiska oraz dokonania naukowe tych uczonych.

Waldemar Reńda
Olkusz, styczeń 2024

[15] Por.: I prędkość kosmiczna.
[16] Por.: II prędkość kosmiczna.
[17] Przypomnę, że prawo Newtona jest słuszne dla ciał kulistych o symetrycznym rozkładzie gęstości

eprasa.pl 8ee85682dd

XIX edycja konkursu *Fizyczne Ścieżki* rozstrzygnięta!

Tegoroczna edycja konkursu *Fizyczne Ścieżki* została rozstrzygnięta. Finał konkursu odbył się 19 kwietnia br. w kompleksie jądrowym Świerk. Jury konkursu, składające się z naukowców reprezentujących uczelnie wyższe oraz pracowników instytutów badawczych w Polsce zgodnie uznało, że prace były niezwykle ciekawe i wykonane na bardzo wysokim poziomie.

Przed jury zaprezentowało się dziewiętnaścioro uczniów przedstawiając czternaście prac, po pięć w kategorii „Praca naukowa" i „Pokaz zjawiska fizycznego", cztery w kategorii „Esej". Decyzja o tym, komu przyznać nagrodę, a komu wyróżnienie, była w tym roku wyjątkowo trudna.

W kategorii – Praca naukowa – **I miejsce zdobyła Lena Kulczycka z Krakowa za pracę „Wyznaczanie średniej szerokości heliograficznej plam słonecznych"**.

II miejsce – Adam Ciupa z Piotrkowa Trybunalskiego – praca „**Jak oderwać się od ziemi? Badanie zjawisk fizycznych wpływających na lot rakiety".**

III miejsce – Natalia Krajewska, Michał Starczewski, Mateusz Karaszewski – praca **„Jak ugotować idealnie jajko na miękko".**

W kategorii – Pokaz zjawiska fizycznego – **I miejsce** przyznano trzem autorom – **Miłoszowi Jurczakowi** z Jeleniej Góry za pracę „**Obserwacje wpływu pól elektrycznego i magnetycznego na ruch cząstek α i β w komorze mgłowej"** oraz **Andrzejowi Baranowskiemu** i **Tymonowi Pelowskiemu** za pracę **„Perpetuum mobile istnieje? Pokaz pojazdu „Blackbird"".**

III miejsce – Szymon Sitek, Jakub Fedak, Jakub Pietrzkiewicz z Sanoka – praca **„Światełko w tunelu – zamiana energii mechanicznej na elektryczną".**

W kategorii – Esej – **I miejsce** zajął **Antoni Jachniewicz** z Warszawy za pracę **„Robot zamiast fizyka?"**

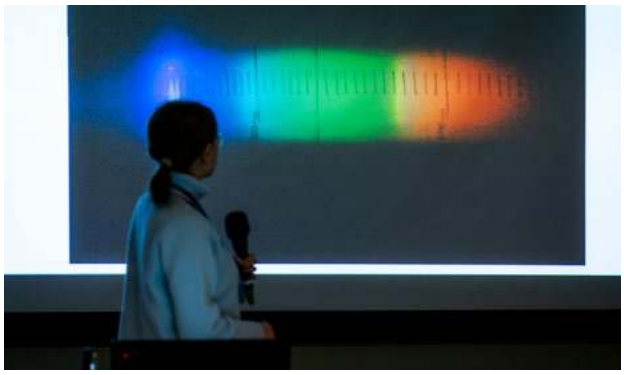
II miejsce – Magdalena Listek z Krakowa – praca **„Przepraszam, jak daleko stąd do prawdy"**.

III miejsce – Marta Dydak z Warszawy – praca „**Nieścisłości kinematografii z prawami fizyki. Dlaczego niektóre zjawiska fizyczne w świecie science-fiction nie mogłyby istnieć?"**

III miejsce – Zuzanna Podolak – praca – „Kiedy magia zderza się z nauką"

Laureatom składamy serdeczne gratulacje!

Laureaci konkursu zostali nagrodzeni stypendium Marszałka Województwa Mazowieckiego, a dwoje z nich otrzymało możliwość odbycia tygodniowego pobytu naukowego w Narodowym Centrum Badań Jądrowych i Instytucie Fizyki PAN. Dodatkowo, laureaci otrzymali znaczne ułatwienia w procesie ubiegania się o studia na kierunkach fizycznych na renomowanych uczelniach, takich jak Uniwersytet Jagielloński, Uniwersytet Warszawski, Uniwersytet w Białymstoku, Politechnika Świętokrzyska oraz Politechnika Warszawska. W uznaniu wysiłku włożonego w przygotowania do Konkursu, wszyscy uczestnicy prezentacji z dnia 19 kwietnia, wraz z ich opiekunami naukowymi, otrzymali książki ufundowane przez Prezydenta Miasta Otwocka, Starostę Otwockiego oraz Narodowe Centrum Badań Jądrowych. Dodatkowo, zostali oni uhonorowani nagrodami rzeczowymi, które zostały zakupione dzięki wsparciu z projektu realizowanego w ramach programu Społeczna Odpowiedzialność Nauki II – „Organizacja XIX i XX edycji ogólnopolskiego konkursu fizycznego *Fizyczne Ścieżki*".



Podczas gali finałowej wręczono także Nagrodę im. Ludwika Dobrzyńskiego. Jest to forma upamiętnienia wspaniałego naukowca i popularyzatora nauki, który przez wiele lat był Przewodniczącym Komitetu Organizacyjnego Konkursu *Fizyczne Ścieżki*. Wyróżnienie to przyznaje się nauczycielom bądź opiekunom naukowym prac konkursowych, którzy z wyjątkowym zaangażowaniem wspierają rozwój naukowy swoich podopiecznych uczestniczących w Konkursie W tym roku uhonorowano mgr Janinę Kulę.

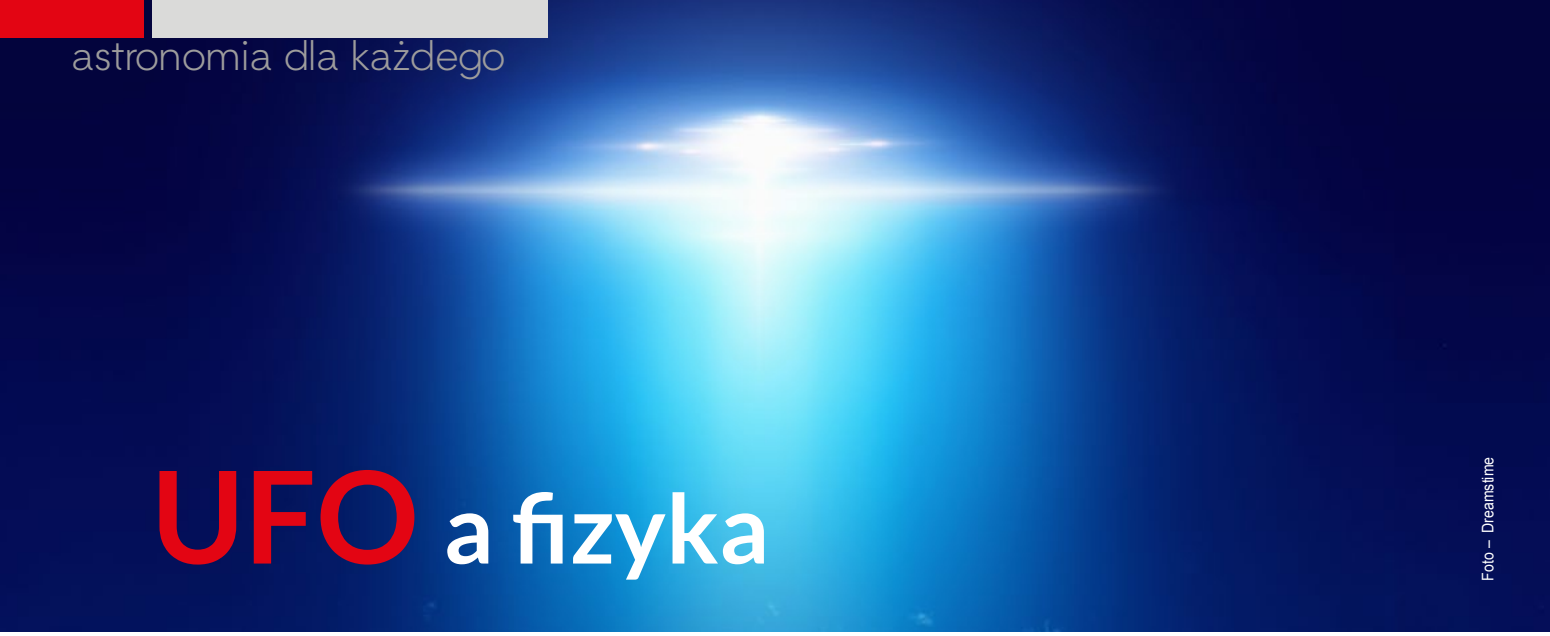
Uczestnicy konkursu mogli także wysłuchać wykładu dr Pawła Gory na temat „Sztuczna inteligencja – rewolucja naszych czasów".

Organizatorzy, Narodowe Centrum Badań Jądrowych i Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, już dziś zapraszają wszystkich uczniów zainteresowanych fizyką do udziału w przyszłorocznej, jubileuszowej, dwudziestej edycji *Fizycznych Ścieżek*.

Konkurs organizowany jest dla uczniów klas 7–8 szkół podstawowych oraz dla uczniów szkół ponadpodstawowych. Nazwa rywalizacji nawiązuje do trzech ścieżek, którymi podąża współczesna fizyka – rozważań teoretycznych, eksploracji doświadczalnej oraz konstrukcji technicznej. W takich też konkurencjach uczestnicy mogą zgłaszać prace w postaci eseju, pracy naukowej lub pokazu zjawiska fizycznego.

Więcej informacji na stronie fizycznesciezki.pl.

eprasa.pl 8ee85682dd



UFO a fizyka

Foto – Dreamstime

Maciej **Panczykowski**

Artykuł ten jest spojrzeniem na zjawisko **UFO** (ang. *unidentified flying object*, polski skrót: **NOL** – *niezidentyfikowany obiekt latający*) kogoś, kto od dekad pasjonuje się fizyką teoretyczną.

Do niedawna zdania na temat istnienia tych obiektów były podzielone – niektórzy wierzyli w ich istnienie, inni uważali, że to sfera fantastyki naukowej. Przełom nastąpił 16 grudnia 2017 roku, gdy w internetowej wersji „New York Times" pojawił się artykuł z autentycznymi nagraniami UFO zrobionymi przez marynarkę wojenną USA.

Po tej publikacji temat stał się głośny i popularny. Ruszyła też lawina artykułów i nagrań video w internecie. Sytuacja zmieniła się do tego stopnia, że w raporcie władz USA z 25 czerwca 2021 roku przyznano, że są zjawiska w amerykańskiej przestrzeni powietrznej, które nie mają ani pochodzenia naturalnego ani nie powstały w wyniku działań człowieka i znanych mu technologii. Pozostał więc tylko jeden wniosek: są pochodzenia pozaziemskiego (technologicznie).

Technologie

Technologie, które zostały wykorzystane do stworzenia UFO na pewno nie są ziemskiego pochodzenia z tej przyczyny, że znacznie przewyższają swoimi możliwościami technologie nam znane. Można wnioskować o tym na podstawie ruchu tych obiektów: bardzo wysokie wartości prędkości w atmosferze ziemskiej (mogące wynosić nawet kilkaset tysięcy kilometrów na godzinę), gwałtowne zmiany wartości prędkości znacznie przekraczające 10g, zmiany wektora prędkości, które następują „w miejscu" (umiejętność poruszania się po łamanej), a także znikanie „w miejscu".

Na uwagę zasługuje również umiejętność wlatywania z atmosfery ziemskiej do wód oceanu bez roztrzaskiwania się o nie i umiejętność poruszania się w wodzie z prędkością co najmniej kilkukrotnie przekraczającą prędkość dźwięku w wodzie. Takie „wodne" UFO ma swoją nazwę: **USO** (ang. *unidentified submerged object*).

Nikt nie ma też pojęcia co stanowi napęd tych obiektów (brak dysz, gazów wylotowych; są często zupełnie gładkie i ciche).

Najbardziej zdumiewającym faktem jest jednak sama obecność UFO na lub w pobliżu Ziemi. Nie potrzeba zaawansowanej logiki, by dojść do wniosku, że wymaga to pokonania odległości międzygwiezdnych, a może nawet międzygalaktycznych.

Warto przypomnieć, że w okolice najbliższej Słońcu gwiazdy (Proxima Centauri) światło dociera stąd w około 4,2 lat, a do najbliższej nam dużej galaktyki (M31 Andromeda) potrzebuje już 2,3 miliona lat pędząc cały czas z zawrotną prędkością około 300 000 km/s. To są tak gigantyczne odległości.

Jeśli weźmiemy pod uwagę fakt, że żadna rakieta na obecnym poziomie technologicznym nie zbliża się „w okolice" prędkości światła (np. 0,99 c) i możliwe technologicznie są znacznie niższe wartości prędkości, to czasy przelotu wymienione w poprzednim akapicie należałoby pomnożyć razy 20 000. Czyli – na przykład – wycieczka w okolice Proximy Centauri trwałaby około 84000 lat w jedną stronę (!). Wiązałoby się to z ogromnymi problemami następstw pokoleń, wyżywienia i destrukcyjnego wpływu promieniowania kosmicznego. Na pewno nie byłoby łatwe i szybkie.

Tak zatem, aby skonstruować UFO potrzebny jest przełom, a raczej sto przełomów w fizyce. Jak na razie te obiekty uczą nas pokory i dają do myślenia jak wiele jeszcze nie wiemy. Fizyka teoretyczna na pewno nie jest skończona i dalszy rozwój może ukazać cały zestaw nowych zjawisk, teorii i możliwości. Cywilizacje konstruujące UFO mogą być od nas starsze o tysiące, miliony, miliardy (?) lat. To bardzo długi czas. Wiele jeszcze może się zmienić w naszym postrzeganiu rzeczywistości fizycznej.

Obecność UFO wydaje nam się niemożliwa i niepojęta, bo jesteśmy przekonani, że sformułowane przez fizyków prawa są spełnione zawsze. Nie wierzymy w to, że w pewnych przypadkach, konfiguracjach mogą wystąpić zjawiska wyjątkowe. Obce cywilizacje te wyjątki znają perfekcyjnie i prawdopodobnie dlatego niemożliwe stało się możliwe i poszły dużo dalej. Fizyka ziemska też już niektóre zna, np. złamanie zasady zachowania parzystości w rozpadzie słabym lub złamanie zasad zachowania liczb leptonowych w oscylacji neutrin.

Dlatego postulowany przeze mnie hipotetyczny proces rozpadu elektronu na jeden foton (artykuł: „Fizyka

eprasa.pl 8ee85682dd

w Szkole" 6/2023) nie wynikał z mojej nieznajomości praw fizyki, ale z wiary w to, że w szczególnych konfiguracjach może to być możliwe.

Antropomorfizacja

Istoty pozaziemskie w popkulturze przedstawiane bywają jako niskie „szaraki" z dużymi głowami i oczami. Nie wiemy, jak wyglądają naprawdę. Prawdopodobieństwo, że na ich planetach powstały organizmy identyczne z ludzkimi wynosi praktycznie zero. Ich planety na pewno musiały być przyjazne życiu, jest tam woda, góry, jakaś atmosfera, prawdopodobnie organizmy będące odpowiednikami zwierząt i organizmy osiadłe podobne do roślin i grzybów. Wytworzenie zaawansowanej cywilizacji na pewno wymagało: wolnych kończyn, kończyn motorycznych, receptorów niejonizujących fotonów (oczu) i fal akustycznych (uszu). Ale poza tym nic pewnego powiedzieć się nie da. Przypuszczalnie cywilizacje na tyle zaawansowane, by konstruować UFO potrafią też dowolnie transformować anatomicznie lub morfologicznie załogi tych obiektów.

Mamy niestety tendencje przypisywania pozaziemskim istotom ludzkich cech, a już cywilizacja o tysiące lat starsza od naszej może być zupełnie inna i żyć w zupełnie innym świecie i zupełnie innymi problemami.

Wypadki – doniesienia o tym, że UFO rozbiło się dziecinnie niczym awionetka (np. incydent z Roswell, 1947 rok) wydają mi się zupełnie niewiarygodne. To nie ten poziom technologiczny. Będę tą myśl rozwijał w następnej części artykułu.

Przypuszczenia mówiące, że samoloty B-2, SR-71 „Blackbird" i F-117 powstały w wyniku inżynierii odwrotnej rozbitego UFO nie wydają się mieć potwierdzenia w faktach. Są to samoloty o efektownych, nowoczesnych kształtach, są niewidoczne dla radarów, ale mają one silniki odrzutowe, zbiorniki paliwa i nie przeczą one znanym prawom fizyki. Technologia jest nowoczesna, ale nie jest pozaziemska.

Poza tym, myślę, że gdyby rządy bogatych państw posiadały ciała i statki kosmitów, to wspomniany na początku artykuł z grudnia 2017 roku nie wywołałby takiego poruszenia, również na wysokich szczeblach władz (dowód logiczny).

Ziemianki – przypuszczenie, że kosmici chcą mieć potomstwo z Ziemiankami jest wątpliwe. Prawie na pewno potrafią oni zmaterializować dowolny organizm biologiczny, także „dziewczynę z komputera". Poza tym, różnią się oni molekularnie wskutek rozwoju na innej planecie więc hybryda drogą naturalną nie byłaby możliwa. Teza mówiąca o tym, że chcą zmieniać ludzkość jest trudna do weryfikacji, gdyż może odbywać się to subtelnie, przez wprowadzanie drobnych zmian, których my nie jesteśmy w stanie zauważyć.

Surowce – w widzialnym Wszechświecie jest około 10^{22} gwiazd. Nawet jeśli przyjmiemy, że 1 gwiazda na 100 ma planetę skalistą, to jest ich taka liczba (10^{20}), że surowców nie brakuje. Nawet jeśli na części z tych planet rozwija się życie i jest to uszanowane. Poza tym, jest bardzo niewykluczone, że zaawansowane cywilizacje potrafią materializować dla siebie dowolne surowce w dowolnych ilościach.

Efekt motyla

Aby zrozumieć czym jest efekt motyla wyobraźmy sobie 2 Ziemie, które są identyczne i identyczne mają wpływy zewnętrzne. Jest między nimi tylko jedna różnica o milimetr w położeniu jednej cząsteczki azotu atmosfery. Tylko ta drobna różnica spowoduje, że po miesiącu będzie zupełnie inny układ chmur i pogoda na tych Ziemiach, co będzie wpływało też na różnice w biosferach.

Tak więc – wystarczy drobna różnica w warunkach początkowych, aby długofalowa ewolucja układu wrażliwego na te warunki była zupełnie inna.

To tak jakby machniecie skrzydła motyla w Tokio spowodowało burzę nad Nowym Jorkiem, której bez tego machnięcia by nie było. To znany przykład, od którego wzięła się nazwa tego efektu.

Oznacza on również to, że możliwość przewidywania ewolucji tak skomplikowanych układów jak cała Ziemia jest realizowana tylko wtedy, gdy znamy idealnie stan każdej cząstki elementarnej ją tworzącej i każdej cząstki elementarnej, która pochodzi z zewnątrz.

Nie mamy takiej możliwości i długo mieć nie będziemy. Ktoś, kto jest zwolennikiem zasady nieoznaczoności Heisenberga mógłby zauważyć, że nie będzie to możliwe nigdy, bo nieoznaczoność ma charakter fundamentalny.

Polemizował z tym wybitny polski fizyk – Michał Gryziński, który zauważył, że **fakt, że pomiar położenia i pędu jest dla nas niemożliwy nie oznacza, że cząstka nie ma określonego położenia i pędu**. To tylko brak metody. Jesteśmy na takim etapie rozwoju, że nie wiemy, jak to zrobić.

Przytoczę dodatkowo 2 cytaty z Gryzińskiego:

- brak koncepcji rozwiązania łamigłówki nie jest dowodem na to, że łamigłówka ta rozwiązania nie posiada.
- nielogiczności (mechaniki kwantowej) nie traktuje się jako wyrazu ułomności naszej wiedzy o atomie, ale jako brak logiki w funkcjonowaniu samej przyrody.

Obce cywilizacje mogą mieć już rozwiązanie tego problemu dawno za sobą, mogą idealnie znać stan Ziemi w każdym czasie i wprowadzać zmiany w warunkach początkowych za pomocą lotów załogowych lub bezzałogowych UFO, które mają wpływ na atmosferę ziemską i zachowania ludzi je obserwujących. Nie muszą w tym celu rozbijać UFO o ziemię. Na pewno dokładnie przewidują efekt tych zmian. Porwania ludzi prawdopodobnie nie mają charakteru badawczego (bo wiedzę mają większą niż my, nie tylko fizyczną, ale także biologiczną), ale też robią to w celu zmiany warunków początkowych. Przypuszczam, że wiele lub wszystko mogliby robić na odległość.

Jaki zatem to wszystko ma cel? Tego na Ziemi nikt nie wie. Bardzo możliwe, że jest tak, że gdyby nie te zmiany, to na Ziemi byłoby jeszcze gorzej.

Zakończę ten artykuł swoją optymistyczną refleksją, zainspirowany zakończeniem książki Stanisława Lema „Głos Pana": skoro oni istnieją i nadal istniejemy my, to nie są źli i nie jest źle...

Maciej Panczykowski
Katowice, 2024.01.26

eprasa.pl 8ee85682dd

Foto – Dreamstime

Zderzenia w Układzie Słonecznym – fakty i mity

cz. II

Rozważmy prawdopodobieństwo zderzenia małego ciała niebieskiego z innym ciałem. W celu uproszczenia naszych rozważań załóżmy, że ciało krąży wokół Słońca po orbicie eliptycznej.

Marcin **Wesołowski**

Zgodnie z naszymi wcześniejszymi rozważaniami wynikającymi z mechaniki nieba równanie biegunowe dla orbity eliptycznej możemy wyrazić jako:

$$r = \frac{p}{1 + e \cdot \cos\varphi} = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos\varphi}, \tag{1}$$

gdzie p oznacza parametr elipsy, który będzie równy $p = a \cdot (1 - e^2)$, *e* jest mimośrodem orbity eliptycznej oraz *a* oznacza dłuższą półoś orbity eliptycznej. Omawiane zagadnienie rozważmy jako przypadek dwuwymiarowy, wówczas wektor prędkości należy rozłożyć na dwie składowe: radialną i transwersalną prędkości w układzie biegunowym. W tym miejscu przypomnijmy, że prędkość radialna określa prędkość zmiany długości promienia wodzącego ***r***, co możemy wyrazić jako:

$$\mathbf{V}_r = \frac{dr}{dt} = \dot{r}\,\mathbf{i}_r, \tag{2}$$

gdzie $\mathbf{i}_r$ jest wersorem o kierunku radialnym. Natomiast składowa transwersalna prędkości określa prędkość zmiany położenia w kierunku prostopadłym do promienia wodzącego ***r***. Prędkość transwersalną $\mathbf{V}_\varphi$ możemy zdefiniować jako:

$$\mathbf{V}_\phi = r \cdot \frac{d\varphi}{dt}\mathbf{i}_\phi = r \cdot \dot{\varphi}\,\mathbf{i}_\phi, \tag{3}$$

gdzie $\mathbf{i}_\phi$ jest wersorem o kierunku prostopadłym do radialnego. W astronomii składowa prędkości transwersalnej określana jest jako prędkość tangencjalna (styczna). Prędkość tangencjalna to składowa prędkości ciała niebieskiego, inaczej mówiąc jest to prędkość prostopadła do odcinka łączącego dane ciało niebieskie (obserwowany obiekt) z obserwatorem. Prędkość tą wyznaczamy znając ruch własny (zmiana szybkości pozycji gwiazdy na niebie w funkcji czasu) badanego obiektu i jego odległość od obserwatora.

Wykorzystując równania (1) i (2) możemy zapisać, że prędkość radialna jest równa:

$$\begin{aligned} V_r &= \frac{dr}{dt} = \frac{d}{dt}\left[\frac{p}{1 + e \cdot \cos\varphi(t)}\right] \\ &= \frac{d}{dt}\left[p\left(1 + e \cdot \cos\varphi(t)\right)^{-1}\right] \\ &= -p\left(1 + e \cdot \cos\varphi(t)\right)^{-2}\left(-e\dot{\varphi}\sin\varphi\right) \\ &= \frac{pe\dot{\varphi}\sin\varphi}{\left(1 + e \cdot \cos\varphi(t)\right)^2}. \end{aligned} \tag{4}$$

Następnie wykorzystajmy definicję momentu pędu K, która została wyprowadzona w naszych poprzednich rozważaniach w następującej postaci:

$$K = m \cdot r^2 \cdot \frac{d\varphi}{dt}. \tag{5}$$

Przyjmując dla uproszczenia w równaniu (5), że masa m jest równa masie jednostkowej (m=1kg), otrzymujemy:

$$K = r^2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} = r^2 \cdot \dot{\varphi}, \tag{6}$$

eprasa.pl 8ee85682dd

Wówczas czynnik $\dot{\varphi}$ jest równy:

$$\dot{\varphi} = \frac{K}{r^2}. \tag{7}$$

Ponownie w równaniu (7) wykorzystajmy równanie biegunowe orbity eliptycznej danej zależnością (1), co daje mam:

$$\dot{\phi} = \frac{K}{\left(\frac{p}{1+e\cdot\cos\varphi}\right)^2} = \frac{K\left(1+e\cdot\cos\varphi\right)^2}{p^2}. \tag{8}$$

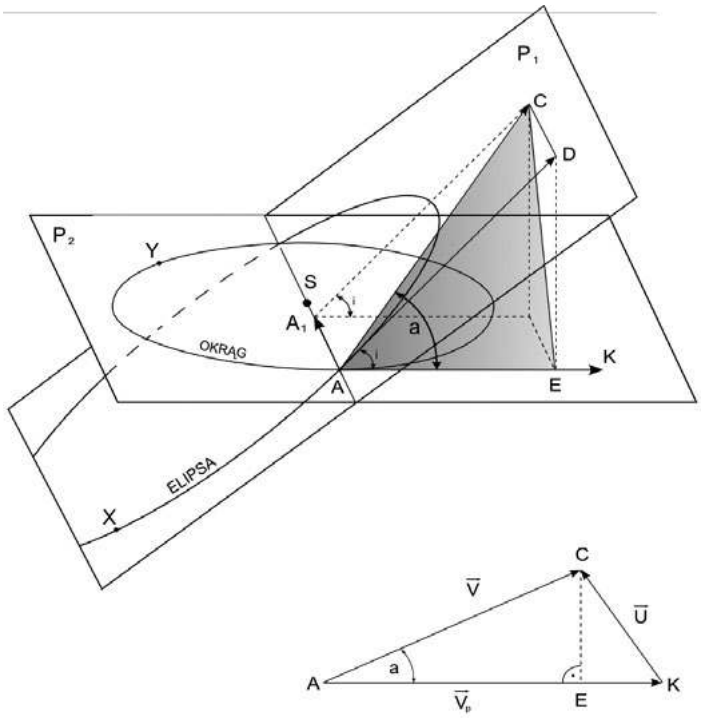
Otrzymaną zależność (8) podstawmy teraz do wyrażenia na prędkość radialną (równanie 4) wówczas możemy zapisać, że:

$$V_r = \frac{p\,e\sin\varphi}{\left(1+e\cdot\cos\varphi\right)^2}\cdot\frac{K\left(1+e\cdot\cos\varphi\right)^2}{p^2} = \frac{K\,e\sin\varphi}{p}. \tag{9}$$

Otrzymane równanie (9) jest poszukiwanym wyrażaniem na prędkość radialną. Następnie wykorzystując wzór na prędkość transwersalną (równanie 3) mamy:

$$V_\phi = r\cdot\dot{\varphi} = r\cdot\frac{K}{r^2} = \frac{K}{r}$$
$$= \frac{K}{\frac{p}{1+e\cdot\cos\varphi}} = \frac{K\left(1+e\cdot\cos\varphi\right)}{p}. \tag{10}$$

W dalszej części będziemy rozpatrywali zagadnienie zderzenia dwóch orbitujących w Układzie Słonecznym.



Rys.1. Położenie orbit zderzających się ze sobą ciał. Wektor AH oznacza prędkość v ciała poruszającego się po orbicie kołowej, wektor AD oznacza prędkość ciała, którego torem ruchu jest parabola. Składowa transwersalna tego wektora to AE a radialna AC. Na powyższym rysunku S - oznacza Słońce a P – peryhelium orbity parabolicznej. Ponadto płaszczyzny orbit kolidujących ze sobą ciał tworzą kąt FAE = i.

Podkreślmy, że konsekwencje kosmicznej kolizji są bardzo ściśle zależne od prędkości względnej zderzających się ciał. Dlatego też na początku wyprowadzimy wzór na prędkość względną kolidujących ze sobą dwóch ciał niebieskich. W naszym podejściu zakładamy, że pierwsze z ciał kolidujących (obiekt Y) krąży wokół Słońca po orbicie kołowej o promieniu r_p, drugie (obiekt X) po eliptycznej, a płaszczyzny ich orbit tworzą pomiędzy sobą kąt *i*. Taki model kolizji może symulować zderzenie się Ziemi z kometą paraboliczną. Obliczenia będzie wygodnie przeprowadzić w biegunowym układzie odniesienia (*r, φ*) leżącym w płaszczyźnie orbity ciała poruszającego się po orbicie parabolicznej (komety).

Niech Słońce znajduje się w początku układu, *r* oznacza promień wodzący ciała a *φ* jego kąt biegunowy. Ciało Y porusza się wokół Słońca z prędkością:

$$v_p = \sqrt{\frac{GM_\odot}{r_p}}, \tag{11}$$

gdzie *G* jest stałą grawitacji, $M_\odot$ jest masą Słońca, a r_p jest promieniem planety. Zauważmy, że równanie (11) można bardzo łatwo wyprowadzić przyrównując siłę dośrodkową działającą na to ciało z siłą grawitacji, z jaką jest ono przyciągane przez Słońce. Ponadto równanie (11) jest określane jako pierwsza prędkość kosmiczna, czyli prędkość, prędkość, jaką trzeba nadać ciału poruszającemu się stycznie do powierzchni planety, aby mogło ono krążyć po orbicie, której promień jest równy promieniowi tej planety. Prędkość *v* ciała X w przyjętym biegunowym układzie współrzędnych ma dwie prostopadłe do siebie składowe: radialną: $v_r = \dot{r} = |AA_1|$ i transwersalną: $v_\varphi = r\dot{\varphi} = |AD|$. Zauważmy, że odpowiednie równania określające prędkość radialną i transwersalną zostały obliczone powyżej jako równania (9) i (10).

Z definicji wektora prędkości $\mathbf{u}_{wzg}$ wynika, że w przypadku rozpatrywanych ciał spełnia on zależność:

$$\mathbf{u}_{wzg} = \mathbf{v} - \mathbf{v}_\partial, \tag{12}$$

gdzie $\mathbf{v} = \mathbf{AD}$ przedstawia wektor prędkości poruszającego się po orbicie parabolicznej, a wektor $\mathbf{v}_\partial = \mathbf{AH}$ reprezentuje wektor prędkości drugiego ciała krążącego na orbicie kołowej.

Podnieśmy teraz równanie (12) stronami do kwadratu i pamiętając o regułach iloczynu skalarnego dwóch wektorów (lub stosując twierdzenie cosinusów do trójkąta AKC na rys. 1), uzyskamy:

$$u_{wzg}^2 = v^2 - 2\mathbf{v}\circ\mathbf{v}_0 + v_0^2, \tag{13}$$

lub

$$u_{wzg}^2 = v^2 - 2\,vv_0\cos\alpha + v_0^2. \tag{14}$$

Zauważmy, że w równaniu (13) i (14) występuję czynnik v^2 który możemy obliczyć wykorzystując zasadę zachowania energii mechanicznej. W przypadku pierwszego ciała możemy zapisać, że:

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{G\,M_\odot\,m}{r} = -\frac{G\,M_\odot\,m}{2\,a}. \tag{15}$$

eprasa.pl 8ee85682dd

Podzielmy teraz równanie (15) obustronnie przez *m* oraz pomóżmy go przez 2, wówczas otrzymamy, że:

$$v^2 = \frac{2GM_\odot}{r} - \frac{GM_\odot}{a} = GM_\odot\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right). \tag{16}$$

Prędkość kołowa drugiego ciała może być obliczona jako pierwsza prędkość kosmiczna dana równaniem:

$$v_0 = \sqrt{\frac{GM_\odot}{r}}. \tag{17}$$

Zauważmy, że równanie (17) to wzór określający pierwszą prędkość kosmiczną, czyli prędkość jaką należy nadać ciału poruszającemu się stycznie do powierzchni planety, aby mogło ono krążyć po orbicie, której promień jest równy promieniowi tej planety np. Ziemi. Ponadto na podstawie rysunku 1 możemy zapisać, że:

$$\cos\alpha = \frac{|AF|}{|AD|} = \frac{|AE|\cos i}{v} = \frac{v_\varphi \cos i}{v}, \tag{18}$$

gdzie $v_\varphi = |AE|$ oznacza składową azymutalną (transwersalną) prędkości pierwszego ciała, a *i* jest inklinacją. Wykorzystując równania (14) i (16) otrzymujemy:

$$u_{wzg}^2 = GM_\odot\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right) - \frac{2vv_0}{1}\frac{v_\varphi \cos i}{v} + v_0^2. \tag{19}$$

Po przekształceniach równanie (19) przyjmuje następująca postać:

$$u_{wzg}^2 = GM_\odot\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right) - 2v_0 v_\varphi \cos i + v_0^2. \tag{20}$$

Następnie do równania (20) podstawmy teraz zależność (17) wówczas mamy:

$$u_{wzg}^2 = GM_\odot\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right) - 2\sqrt{\frac{GM_\odot}{r}}v_\varphi \cos i + \frac{GM_\odot}{r}. \tag{21}$$

Prawa strona równania (21) jest równa:

$$\begin{aligned} u_{wzg}^2 &= \frac{2GM_\odot}{r} - \frac{GM_\odot}{a} - 2\sqrt{\frac{GM_\odot}{r}}v_\varphi \cos i + \frac{GM_\odot}{r} \\ &= \frac{3GM_\odot}{r} - \frac{GM_\odot}{a} - 2\sqrt{\frac{GM_\odot}{r}}v_\varphi \cos i \\ &= \frac{GM_\odot}{r}\left(3 - \frac{r}{a} - 2\sqrt{\frac{r}{GM_\odot}}v_\varphi \cos i\right). \end{aligned} \tag{22}$$

Następnie wykorzystując zależność (10), równanie (22) przyjmuje postać:

$$\begin{aligned} u_{wzg}^2 &= \frac{GM_\odot}{r}\left(3 - \frac{r}{a} - 2\sqrt{\frac{r}{GM_\odot}}\frac{K}{r}\cos i\right) \\ &= \frac{GM_\odot}{r}\left(3 - \frac{r}{a} - 2\sqrt{\frac{K^2}{GM_\odot r}}\cos i\right). \end{aligned} \tag{23}$$

W oparciu o nasze wcześniejsze rozważania wynikające z mechaniki nieba kwadrat momentu pędu K^2 występujący po prawej stronie równania (23) możemy wrazić jako:

$$K^2 = GM_\odot a\left(1 - e^2\right), \tag{24}$$

wówczas równanie (23) jest równe:

$$\begin{aligned} u_{wzg}^2 &= \frac{GM_\odot}{r}\left(3 - \frac{r}{a} - 2\sqrt{\frac{GM_\odot a\left(1-e^2\right)}{GM_\odot r}}\cos i\right) \\ &= \frac{GM_\odot}{r}\left(3 - \frac{r}{a} - 2\sqrt{\frac{a}{r}\left(1-e^2\right)}\cos i\right). \end{aligned} \tag{25}$$

Ponownie wykorzystajmy równanie (17) wówczas możemy zapisać, że:

$$u_{wzg}^2 = v_0^2\left(3 - \frac{r}{a} - 2\sqrt{\frac{a}{r}\left(1-e^2\right)}\cos i\right), \tag{26}$$

lub

$$u_{wzg} = v_0\sqrt{\left(3 - \frac{r}{a} - 2\sqrt{\frac{a}{r}\left(1-e^2\right)}\cos i\right)}. \tag{27}$$

Wykorzystując parametr elipsy $p = a\left(1-e^2\right)$, równanie (27) możemy przedstawić w nieco prostszej postaci:

$$u_{wzg} = v_0\sqrt{\left(3 - \frac{r}{a} - 2\sqrt{\frac{p}{r}}\cos i\right)}. \tag{28}$$

Zauważmy, że równania (26), (27), oraz (28) definiują prędkość względną dla rozpatrywanych dwóch ciał niebieskich. Dodajmy, że formuła na prędkość względną po raz pierwszy została wyprowadzona przez Öpika w 1961.

Rozpatrzmy dużą asteroidę poruszającą się po orbicie eliptycznej lub kometę, która przecina w płaszczyźnie ekliptyki pas asteroid. Wówczas ilość potencjalnych kolizji dana jest jako:

$$\begin{aligned} dn &= \sigma n u_{wzg}\, dt, \\ \int_0^n dn &= 2\int_{t_1}^{t_2} \sigma n u_{wzg}\, dt, \end{aligned} \tag{29}$$

gdzie σ oznacza przekrój czynny na zderzenie $\sigma = \pi\left(R_N + R_a\right)^2$; R_N oznacza promień jądra komety, a R_a jest promieniem uderzającej asteroidy. Korzystając z teorii gazu możemy wnioskować, że ilość kolizji w przedziale czasu *dt* będzie równa ilości drobnych ciał niebieskich, które kometa spotka na swojej drodze nie większej niż promień przekroju czynnego.

Wykonując elementarne całkowanie równania (29) otrzymujemy:

$$n_{kol} = 2\int_{t_1}^{t_2} \sigma n u_{wzg}\, dt, \tag{30}$$

gdzie t_1 i t_2 oznaczają czasy, kiedy kometa wchodzi oraz wychodzi z pasa asteroid. Wykorzystując równanie (25), zależność (30) możemy przepisać do następującej postaci:

$$n_{kol} = 2\int_{t_1}^{t_2} \sigma n v_0\sqrt{\left(3 - \frac{r}{a} - 2\sqrt{\frac{a}{r}\left(1-e^2\right)}\cos i\right)}\, dt. \tag{31}$$

eprasa.pl 8ee85682dd

Następnie wykorzystując moment pędu dla komety obliczmy zmienną *dt*. W tym celu porównajmy ze sobą dwa równania (6) i (24) wówczas otrzymamy:

$$r^2 \frac{d\varphi}{dt} = \sqrt{GM_{\odot} a\left(1-e^2\right)}. \tag{32}$$

Po przekształceniu mamy:

$$dt = \frac{r^2 d\varphi}{\sqrt{GM_{\odot} a(1-e^2)}}\ . \tag{33}$$

Wykorzystując równanie biegunowe dla orbity eliptycznej (równanie (1)), zależność (33) wynosi:

$$dt = \frac{\left(\frac{a\cdot(1-e^2)}{1+e\cdot\cos\varphi}\right)^2 d\varphi}{\sqrt{GM_{\odot} a\,(1-e^2)}} = \frac{a^2\cdot(1-e^2)^2 d\varphi}{\left(1+e\cdot\cos\varphi\right)^2\sqrt{GM_{\odot} a(1-e^2)}}. \tag{34}$$

Podstawmy teraz równanie (34) do równania (31) wówczas otrzymamy, że:

$$n_{kol} = 2\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma n \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{r}} \sqrt{\left(3-\frac{r}{a}-2\sqrt{\frac{a}{r}\left(1-e^2\right)}\cos i\right)} \cdot \frac{a^2\cdot(1-e^2)^2 d\varphi}{\left(1+e\cdot\cos\varphi\right)^2\sqrt{GM_{\odot} a(1-e^2)}}. \tag{35}$$

Występujące w funkcji podcałkowej dwa czynniki $\frac{r}{a}$ i $\frac{a}{r}\left(1-e^2\right)$ możemy obliczyć poprzez ponowne wykorzystanie równania biegunowego dla obity eliptycznej (równanie (1)) co daje nam:

$$\frac{r}{a} = \frac{\frac{a\cdot(1-e^2)}{1+e\cdot\cos\varphi}}{a} = \frac{1-e^2}{1+e\cdot\cos\varphi}, \tag{36}$$

oraz

$$\frac{a}{r}\left(1-e^2\right) = \frac{a\left(1-e^2\right)}{\frac{a\cdot(1-e^2)}{1+e\cdot\cos\varphi}} = 1+e\cdot\cos\varphi. \tag{37}$$

Biorąc pod uwagę równania (36) i (37), zależność (35) przyjmuje następującą postać:

$$n_{kol} = 2\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma n \sqrt{\frac{GM_{\odot}}{r}} \sqrt{\left(3-\frac{1-e^2}{1+e\cdot\cos\varphi}-2\sqrt{1+e\cdot\cos\varphi}\cos i\right)} \cdot \frac{a^2\cdot(1-e^2)^2 d\varphi}{\left(1+e\cdot\cos\varphi\right)^2\sqrt{GM_{\odot} a(1-e^2)}}. \tag{38}$$

Wykorzystując jeszcze raz równanie biegunowe dla orbity eliptycznej (równanie (1)) mamy:

$$n_{kol} = 2\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma n \sqrt{\frac{GM_{\odot}(1+e\cdot\cos\varphi)}{a\cdot(1-e^2)}} \sqrt{\left(3-\frac{1-e^2}{1+e\cdot\cos\varphi}-2\sqrt{1+e\cdot\cos\varphi}\cos i\right)} \cdot \frac{a^2\cdot(1-e^2)^2 d\varphi}{\left(1+e\cdot\cos\varphi\right)^2\sqrt{GM_{\odot} a(1-e^2)}}. \tag{39}$$

Po uproszczeniu otrzymujemy:

$$n_{kol} = 2\int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sigma n \frac{a\cdot(1-e^2)}{\left(1+e\cdot\cos\varphi\right)^{1.5}} \sqrt{\left(3-\frac{1-e^2}{1+e\cdot\cos\varphi}-2\sqrt{1+e\cdot\cos\varphi}\cos i\right)} \cdot d\varphi. \tag{40}$$

Podsumowując dotychczasowe nasze rozważania dotyczące kolizji pomiędzy ciałami niebieskimi należy zauważyć, że obejmują one szerokie spektrum zjawisk od zderzeń komet czy asteroidów z planetami poprzez zderzenia tych ostatnich z mniejszymi meteoroidami aż do zjawiska meteorów. Kontemplując to piękne zjawisko „spadających gwiazd" pamiętajmy, że są one bardzo dalekim echem dramatycznych kolizji kosmicznych mających miejsce w początkowym okresie formowania się Układu Słonecznego, które miały ogromny wpływ na ukształtowanie powierzchni planet i być może przyczyniły się do rozwoju życia biologicznego na naszej planecie.

W ramach ogólnoświatowej kampanii obserwacyjnej dotyczącej ciał niebieskich, które mogą stanowić potencjalne zagrożenie dla Ziemi została opracowana 11 stopniowa skala tzw. Skala Torino, według której NASA ocenia potencjalne zagrożenie katastrofą kosmiczną.

eprasa.pl 8ee85682dd

Skala	Opis	Zagrożenie (kolor)
0	Prawdopodobieństwo kolizji wynosi zero lub jest bliskie zeru. Stopień ten odnosi się również do obiektów małych jak meteory, które ulegają całkowitemu spaleniu w atmosferze lub większych jak meteoryty, które rzadko powodują zniszczenia.	**BRAK ZAGROŻENIA (biały)**
1	Obiekt odkryty, który nie stanowi większego zagrożenia. Posiadane dane wskazują na to, że prawdopodobieństwo zderzenia, jakkolwiek niezerowe, jest znikome i nie wymaga powiadamiania opinii publicznej. Nowe projekty obserwacyjne prawdopodobnie doprowadzą do zredukowania zagrożenia do stopnia 0.	**NORMA (zielony)**
2	Obiekt, który na podstawie dokładniejszych obserwacji, może okazać się całkowicie nieszkodliwy. Jego orbita przecina orbitę ziemską w małej odległości od Ziemi, aczkolwiek nie istnieje ryzyko zderzenia. Nowe projekty obserwacyjne prawdopodobnie doprowadzą do zredukowania zagrożenia do stopnia 0.	**WYMAGANA UWAGA ASTRONOMÓW (żółty)**
3	Bliskie zbliżenie obiektu do Ziemi, wymagające uwagi astronomów. Aktualne obliczenia dają szansę na kolizję, z możliwością wywołania lokalnych zniszczeń, większą niż 1%. Nowe projekty obserwacyjne prawdopodobnie doprowadzą do zredukowania zagrożenia do stopnia 0. Zalecane jest powiadomienie opinii publicznej i odpowiednich organów państwowych, jeżeli spotkanie z obiektem nastąpi w ciągu dekady.	
4	Bliskie zbliżenie obiektu do Ziemi, wymagające uwagi astronomów. Aktualne obliczenia dają szansę na kolizję, z możliwością wywołania regionalnych zniszczeń, większą niż 1%. Nowe projekty obserwacyjne prawdopodobnie doprowadzą do zredukowania zagrożenia do stopnia 0. Zalecane jest powiadomienie opinii publicznej i odpowiednich organów państwowych, jeżeli spotkanie z obiektem nastąpi w ciągu dekady.	
5	Bliskie zbliżenie obiektu do Ziemi stanowiące poważne, aczkolwiek nie 100% pewne zagrożenie kolizją, z możliwością wywołania regionalnych zniszczeń. Wymagane jest znaczne zaangażowanie astronomów w celu potwierdzenia lub wykluczenia możliwości kolizji. Zalecane jest postępowanie kryzysowe podjęte przez odpowiednie organy państwowe, jeżeli spotkanie z obiektem nastąpi w ciągu dekady.	**ZAGROŻENIE (pomarańczowy)**
6	Bliskie zbliżenie dużego obiektu do Ziemi stanowiące poważne, aczkolwiek nie 100% pewne zagrożenie kolizją, z możliwością wywołania globalnych zniszczeń. Wymagane jest znaczne zaangażowanie astronomów w celu potwierdzenia lub wykluczenia możliwości kolizji. Zalecane jest postępowanie kryzysowe podjęte przez odpowiednie organy państwowe, jeżeli spotkanie z obiektem nastąpi w ciągu trzech dekad.	
7	Bardzo bliskie zbliżenie dużego obiektu do Ziemi stanowiące jeżeli nastąpi w ciągu stulecia bezprecedensowe, aczkolwiek nie 100% pewne zagrożenie kolizją, z możliwością wywołania globalnych zniszczeń. Zalecane jest postępowanie kryzysowe podjęte przez odpowiednie organy międzynarodowe, w celu dokładnego oznaczenia zagrożenia.	
8	Zderzenie jest pewne, siła eksplozji spowoduje lokalne zniszczenia na lądzie. Jeżeli nastąpi w okolicy przybrzeżnej możliwe jest powstanie fal tsunami. Średnia częstotliwość takich zderzeń wynosi między raz na 50 lat a raz na kilka tysięcy lat.	**PEWNE ZDERZENIE (czerwony)**
9	Zderzenie jest pewne, siła eksplozji spowoduje bezprecedensowo duże zniszczenia na większym obszarze. Jeżeli nastąpi na obszarze oceanów wywoła duże tsunami. Średnia częstotliwość takich zderzeń wynosi między raz na 10 000 lat a raz na 100 000 lat.	
10	Zderzenie jest pewne, siła eksplozji spowoduje globalne zniszczenia i doprowadzi do zmian klimatycznych. Stanowi zagrożenie dla istnienia cywilizacji. Średnia częstotliwość takich zderzeń wynosi raz na 100 000 lat lub rzadziej.	

Podkreślmy, że w stosunkowo bliskim otoczeniu Ziemi, według danych z maja 2022 roku, znanych było ponad 29 tysięcy planetoid (tzw. planetoidy bliskie Ziemi), w tym ponad 2200 potencjalnie niebezpiecznych asteroid i tylko kwestią czasu pozostaje kolejne zderzenie z takim obiektem. Aby temu zapobiec, niezbędne jest określenie orbity danego obiektu i ocena stopnia zagrożenia.

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] Artymowicz, P., 1995, Astrofizyka układów planetarnych, PWN, Warszawa.
[2] Kessler, D. J., 1981, Derivation of the collision probability between orbiting objects: the lifetimes of jupiter's outer moons, Icarus 109, 121.
[3] Mc-Fadden, L., Weissman, P., Johnson, T. (ed.); 2007, Encyclopedia of the Solar System, second edition, ELSEVIER, Amsterdam.
[4] Steel, D. I., 1985, Collisions in the solar systems. II - Asteroid impacts upon Mars, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 215, 396.
[5] Wierzbiński, S., 1973, Mechanika nieba, PWN, Warszawa.

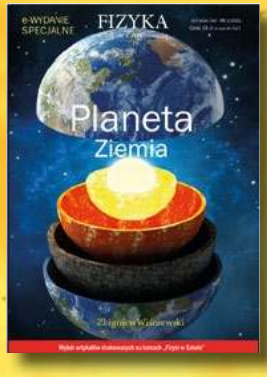
eprasa.pl 8ee85682dd

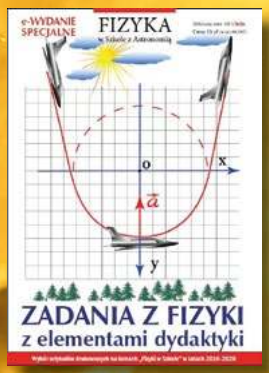
Cyfrowe wydania specjalne

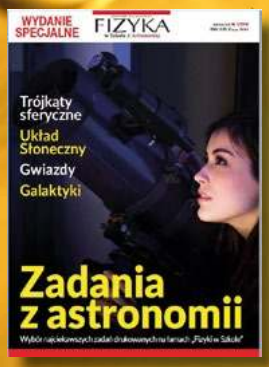
Fizyki w Szkole

Tylko w wersji PDF!

Już od 10 zł!
Wysyłamy na adres mailowy!







Szczegóły i formularz zamówienia na www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/

eprasa.pl 8ee85682dd

- Eksperymenty ze splątanymi fotonami
- Nierówności Bella
- Kubity, teleportacja
- Bramki kwantowe
- Komputery i algorytmy kwantowe
- Kryptografia kwantowa
- Kropki kwantowe

Plik PDF
20 zł
(w tym 8% VAT)

Nowe wydanie specjalne – wersja cyfrowa – plik PDF

Szczegóły i formularz zamówienia – www.aspress.com.pl/wydania-specjalne/

eprasa.pl 8ee85682dd