

FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

387 (LXIV) indeks 35810X Nr 4 lipiec/sierpień 2023 CENA 40,00 zł (w tym 8% VAT)

Bramki kwantowe

Działanie, cechy, typy

EPITAKSJA

Jak otrzymujemy
ultraczyste kryształy?

Energetyka jądrowa...
bezpieczna i zdrowa?

Czy potrzebna zmiana
w programach nauczania
przedmiotów przyrodniczych?

Mechanika nieba

– zadania z rozwiązaniami

DOŚWIADCZENIA

- Tarcie, siła odśrodkowa i lepkość
- Badanie właściwości ładunków elektrycznych

Napęd statków kosmicznych

Energia i pęd w przestrzeni kosmicznej



www.aspress.com.pl

Uwaga! Tylko u nas!

**Prenumerata
w wersji
drukowanej**

– bez dodatkowych
opłat za przesyłkę!

**Prenumerata
cyfrowa**

– pliki PDF wysyłamy
bezpośrednio
na Twój komputer!

**Wydania
specjalne**

– najciekawsze zbiory
artykułów, zadań
i scenariuszy lekcji!

**Roczniki i pakiety
archiwalne
w wersji drukowanej**

– dostępne
do wyczerpania nakładu...

**Wydania
darmowe**

– zamów i poznaj
nasze czasopisma!
Wysyłamy na adres email.

**Wszystkie wydania
od 2009 roku
w wersji PDF**

– można zamówić
dowolną liczbę wydań.



Szanowni Czytelnicy!

Serdecznie witamy po wakacjach. Wakacje większości nam kojarzą się z podróżowaniem. My też daliśmy się ponieść wakacyjnej atmosferze, dlatego znajda Państwo na stronie 17 artykuł Edwarda Rydygiera pod tytułem „Koleje dużych prędkości”. Niestety okres wakacyjny już minął i czas powrócić do tematyki zarówno naukowej jak i dydaktycznej.

Tematyce ściśle dydaktycznej poświęcony jest artykuł Waldemara Reńdy pt. „Fizyka szkolna na cenzurowanym”. Autor dyskutuje w nim w jakim stopniu cele przedmiotu mogą być realizowane w oparciu o dostępne materiały dydaktyczne. Autor artykułu zwraca uwagę na fakt usunięcia z przedmiotu nauczania niektórych ważnych zagadnień takich jak statyka. W artykule jest też ciekawa propozycja uwzględnienia w procesie dydaktycznym niektórych jednostek spoza układu SI takich jak mila morska. Ja osobiście wielokrotnie słyszałem to pojęcie, ale aż do przeczytania wspomnianego artykułu nie wiedziałem, jak ona została zdefiniowana.

Zupełnie inna jest tematyka artykułu Jana Kurzyka pt. „Za co Nobel 2022?”. Jest to czwarty artykuł z tego cyklu. Tym razem jest on poświęcony zagadnieniom bramek logicznych wykorzystywanych w komputerach kwantowych. Nie jest to artykuł łatwy, ale z całą pewnością pouczający, a tematyka obliczeń kwantowych z pewnością jest na topie.

Na stronie 24 znajdziemy artykuł Pani Eweliny Kędzierskiej pt. „Fizyka nowotworów”. Co fizyka ma wspólnego z nowotworami? Otóż fizyka dostarcza opisu samego nowotworu, pozwala diagnozować zmiany rakowe, jak też dostarcza narzędzi do jego leczenia. W celu zapoznania się z poruszającą tematyką zapraszam do lektury, choć oczywiście ograniczona objętość artykułu nie pozwoliła zbyt daleko zagłębić się w szczegóły.

Kończąc życzę wielu sukcesów w nowym roku szkolnym.

W imieniu redakcji

Zbigniew Wiśniewski

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

- 4 Niewidzialne promieniowanie pod kontrolą** ■ Dominik Koziel, Radosław Zaleski

Wbrew rozpowszechnianym opiniom, energetyka jądrowa nie jest technologią przestarzałą. Rozwija się bardzo dynamicznie, zarówno w kwestii wytwarzania energii, jak i gospodarki odpadami.



- 8 Epitaksja, czyli otrzymywanie ultraczystych kryształów** ■ Michał Grzybowski
Kryształy często kojarzone z wyrobami jubilerskimi, elegancją i przepychem mają tak naprawdę wiele ważnych zastosowań w przyrządach, z których korzystamy na co dzień.

- 12 Za co Nobel 2022? Część 4. Bramki kwantowe** ■ Jan Kurzyk
Przetwarzanie informacji kwantowej wymaga bramek logicznych innego typu niż klasyczne bramki. Nazywamy je bramkami kwantowymi.

- 17 Koleje dużych prędkości – aspekt poznawczy i edukacyjny** ■ Edward Rydygier
Transport jest nierozzerwalnie związany z rozwojem cywilizacyjnym, a ludzie, aby się **przemieszczać na długich trasach potrzebują coraz szybszych środków transportu**



- 24 Fizyka nowotworów** ■ Ewelina Kędzierska

- 28 Żyoty fizyków. Lord Kelvin** ■ Tadeusz Wibig

Z naszych lekcji

- 32 „Doświadczenia skutków rzeczy pod zmysły podpadających ...” – tarcie, siła odśrodkowa i lepkość** ■ Stanisław Bednarek

- 36 Badanie właściwości ładunków elektrycznych, pól i sił z wykorzystaniem symulacji** ■ Jolanta Sokołowska, Andrzej Sokołowski

- 39 Fizyka szkolna na cenzurowanym. (Miniatura dydaktyczna)**
■ Waldemar Reńda

Coraz głośniejsze mówi się o potrzebie zmian programowych nauczania poszczególnych przedmiotów, zarówno na poziomie szkoły podstawowej jak i średniej. W szczególności dotyczy to przedmiotów przyrodniczych.

Astronomia dla każdego

- 44 Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba – część IV** ■ Marcin Wesołowski

- 48 Napęd statków kosmicznych, czyli pęd i energia** ■ Jerzy Kuczyński

By zmienić prędkość potrzebna jest siła. I to jest prawda niezależna od tego, gdzie się znajdujemy, a więc czy jesteśmy na Ziemi, czy w przestrzeni kosmicznej.



FIZYKA
w Szkole z Astronomią

NUMER 4 LIPIEC/SIERPIEŃ 2023
387 (LXIII) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 40,00 zł
(w tym 8% VAT)

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

Zdjęcie na okładce: Adobe Stock

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

Niewidzialne promieniowanie pod kontrolą

Fot. – Dreamstime

Dominik Kozieł, Radosław Zaleski

Promieniotwórczość jest naturalną cechą materii. I choć w zdecydowanej większości otaczające nas przedmioty i obiekty składają się ze stabilnych atomów, w naszym otoczeniu znajduje się też cała gama izotopów radioaktywnych (radioizotopów). Z upływem czasu jądra atomowe takich izotopów rozpadają się i emitują różne rodzaje niewidzialnego promieniowania jonizującego, które może uszkadzać pobliskie cząsteczki, również ciała ludzkiego.

Radioizotopy te są głównie pochodzenia naturalnego, jednak działalność człowieka sprawia, że trudno jednoznacznie stwierdzić, czy gdziekolwiek na Ziemi mamy jeszcze do czynienia wyłącznie ze środowiskiem naturalnym. Dlatego w naszym otoczeniu znajdziemy również radioizotopy pochodzenia cywilizacyjnego. Ich obecność jest skutkiem postępu osiągniętego dzięki fizyce jądrowej, przede wszystkim w energetyce i przemyśle zbrojeniowym.

Podwyższony poziom promieniowania emitowanego przez radioizotopy może zagrażać zdrowiu ludzi

i dlatego nasze bezpieczeństwo jest kontrolowane przez powołane w tym celu instytucje. Do wykrywania promieniowania wykorzystywane są coraz doskonalsze techniki pomiarowe, których wyniki są często ogólnodostępne. Pozwala to łatwo weryfikować niepokojące plotki, które nieradko poprzedzają oficjalne komunikaty.

Wszystko pod kontrolą

Ciągły monitoring tzw. sytuacji radiacyjnej kraju jest obowiązkiem wynikającym z ustawy „Prawo atomowe”¹ i koordynowanym przez Państwową Agencję Atomistyki (PAA). W ramach tych działań uwzględnia się wiele aspektów związanych z narażeniem ludności na promieniowanie jonizujące. Należy do nich nadzór nad działalnością ze źródłami promieniotwórczymi, reagowanie w zdarzeniach radiacyjnych, a przede wszystkim ciągła ocena sytuacji radiacyjnej kraju. Prowadzone w jej ramach badania bywają tak szczegółowe, że kontroluje się nawet zawartość izotopów promieniotwórczych pochodzenia cywilizacyjnego, np. cezju (Cs-137) i strontu (Sr-90), w żywności wydawanej w stołówkach. Pozwala to

stwierdzić, że są one ledwie wykrywalne i nieszkodliwe dla ludzi.

Ważnym elementem oceny sytuacji radiacyjnej kraju jest sieć stacji wczesnego wykrywania skażeń promieniotwórczych. Moc dawki promieniowania γ jest nieustannie mierzona przez 54 stacje pomiarowe działające na terenie całego kraju, a wyniki pomiarów w dowolnej chwili może sprawdzić każdy z nas na stronie internetowej PAA².

Również niektóre jednostki naukowe prowadzą niezależne pomiary sytuacji radiacyjnej. Na dachu budynku Instytutu Fizyki Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie znajduje się zestaw pomiarowy podobny do używanych przez PAA. Wyniki tych pomiarów można sprawdzić na stronie internetowej „Monitor radioaktywności w powietrzu w Lublinie”³. Na tę stronę warto zajrzeć, ze względu na znacznie większą liczbę parametrów opisujących lokalną sytuację radiacyjną. Zaczynając od mocy dawki możemy sprawdzić natężenia poszczególnych składowych naturalnego tła promieniowania γ , które pochodzą od ziemskich radioizotopów i promieniowania kosmicznego.

¹ Ustawa Prawo Atomowe z dnia 29 listopada 2020 r. (Dz.U.2021.1941 tj.)

² <https://www.gov.pl/web/paa>

³ <https://www.umcs.pl/pl/radioaktywnosc.htm>

nego, oraz zestawie je z warunkami pogodowymi. Podawany jest również komunikat o ewentualnym wystąpieniu skażenia powietrza radioaktywnymi izotopami cezu (Cs-137) albo jodu (I-131) lub jego braku. Nieograniczony jest też dostęp do danych archiwalnych z całego okresu działania sondy, a kluczowe informacje i ciekawostki na temat promieniotwórczości naturalnej, umieszczone w dodatkowych zakładkach, ułatwiają zrozumienie prezentowanych wykresów.

Energetyka jądrowa... Bezpieczna i zdrowa?

Katastrofa w Czarnobylu wpłynęła znacząco na opinię Polaków o energetyce jądrowej i przez wiele lat wszelkie działania dotyczące jej rozwoju były niechętnie przyjmowane przez polskie społeczeństwo. Wybuch wodoru, który 26 kwietnia 1986 roku nastąpił w czarnobylskim reaktorze nr 4, był efektem błędów konstrukcyjnych reaktora oraz zaniedbań obsługi, spowodowanych częściowo przez naciski polityczne. Rzeczywista liczba ofiar oraz skutki tego zdarzenia dla środowiska i zdrowia ludzi bywają wyolbrzymiane, można je jednak zweryfikować dzięki rzetelnym źródłom informacji na ten temat, jakimi są raporty międzynarodowych komisji naukowych, np. UNSCEAR.

Aktualnie obecność sztucznego izotopu cezu Cs-137 w środowisku naturalnym Polski to przede wszystkim konsekwencja awarii w elektrowni jądrowej w Czarnobylu i prób broni nuklearnej. Chociaż od awarii

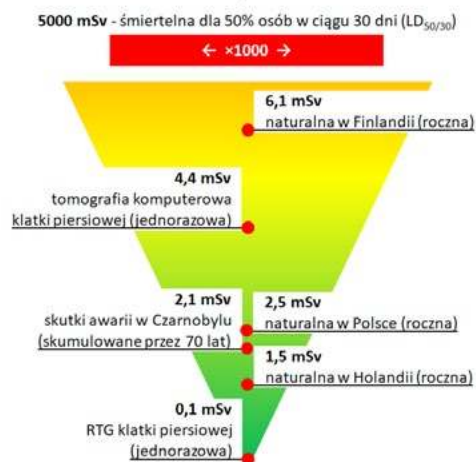
i prób broni minęło już kilkadziesiąt lat, nieznacznie podwyższony poziom cezu możemy zaobserwować w grzybach i owocach leśnych (głównie w podgrzybkach i jagodach) używając bardzo czułej aparatury. Jednakże jest go na tyle mało, że nawet największy amator tych przysmaków nie jest w stanie zjeść ich w ilości, która mogłaby zaszkodzić.

Natomiast promieniotwórczy jod I-131 , który również został wyemitowany podczas tych zdarzeń, praktycznie całkowicie zniknął z otoczenia po upływie około trzech miesięcy, z uwagi na okres połowicznego rozpadu (8 dni) znacznie krótszy niż w przypadku Cs-137 (30 lat). Szacuje się, że statystyczny Polak otrzyma od izotopów pochodzenia czarnobylskiego (przez 70 lat) całkowitą dawkę promieniowania mniejszą niż ze źródeł naturalnych przez jeden rok.

Czy uzasadniony jest zatem strach związany z rozwojem polskiej energetyki jądrowej? W Europie (poza Rosją) już nigdzie nie ma działających reaktorów takiego typu, jaki uległ awarii w Czarnobylu. Natomiast te, które mają powstać w Polsce, należą do tzw. generacji III+, czyli najnowszej wykorzystywanej obecnie na świecie. Dotychczas nie uległy one żadnej awarii z istotnymi skutkami dla środowiska.

Wbrew rozpowszechnianym opiniom, energetyka jądrowa nie jest technologią przestarzałą. Rozwija się bardzo dynamicznie, zarówno w kwestii wytwarzania energii, jak i gospodarki odpadami. W Polsce przetwarzaniem odpadów promieniotwórczych

Średnia dawka promieniowania



Dawki promieniowania jonizującego ze źródeł naturalnych otrzymywane przez ludzi w różnych częściach świata są dość zróżnicowane, zazwyczaj wahają się w granicach kilku milisiwertów (mSv) na rok. Tego samego rzędu jest maksymalna dawka, jaką mieszkaniec Polski mógłby przyjąć przez całe życie (sic!) w konsekwencji awarii w Czarnobylu, a wciąż jest to tysiące razy mniej od dawki śmiertelnej.

zajmuje się Zakład Unieszkodliwiania Odpadów Promieniotwórczych⁴, który nadzoruje także Krajowe Składowisko Odpadów Promieniotwórczych (KSOP) w Róźnie, niedaleko Ostrołęki. Ten unikatowy obiekt można nawet zwiedzać podczas corocznych Dni Otwartych KSOP!

Ponadto energetyka jądrowa jest bardzo niskoemisyjna, co sprawia, że jest najbardziej przyjazna środowisku spośród stabilnych źródeł energii, niezależnych od warunków pogodowych. Zatem wydaje się ona niezbędnym elementem miksu energetycznego, obok odnawialnych źródeł energii. Być może dzisiejszą energetykę jądrową w przyszłości zastąpi czysta i bardzo obiecująca energetyka oparta na fuzji jądrowej, lecz jej powszechne

⁴ <https://zuop.pl>

Słownik:

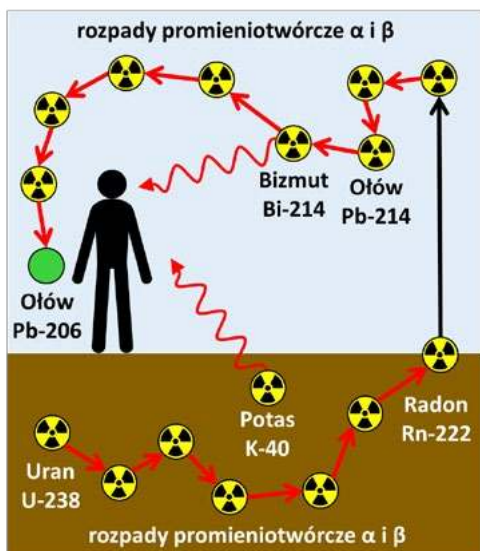
Radionuklid, radioizotop – nuklid (atom o określonej liczbie protonów i neutronów), który ma nadmiar energii jądrowej, co czyni go niestabilnym i prowadzi do rozpadu promieniotwórczego z emisją promieniowania jonizującego. Nuklidy (w tym radionuklidy) oznaczane są nazwą pierwiastka (określającą liczbę protonów w jądrze) oraz liczbą masową (określającą sumę protonów i neutronów w jądrze atomowym), np. Cs-137 , Rn-222 .

Okres połowicznego rozpadu – czas, w ciągu którego liczba jąder atomowych radioizotopu spada o połowę w wyniku rozpadów promieniotwórczych.

Promieniowanie jonizujące – promieniowanie o wysokiej energii, która wystarcza do oderwania elektronu od atomu lub cząsteczki. Najczęściej spotykane rodzaje tego promieniowania oznaczane są literami greckimi α (jądra helu), β (elektrony lub pozytony) i γ (fotony).

UNSCEAR (ang. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation) – Komitet Naukowy ONZ ds. Skutków Promieniowania Atomowego.

Miks energetyczny – zestaw sposobów wytwarzania i przekazywania energii (z uwzględnieniem jej źródeł, np. węgla, wiatru) pozwalający na pokrycie zapotrzebowania na energię w różnych dziedzinach życia ludzi (np. w transporcie, produkcji, mieszkalnictwie).

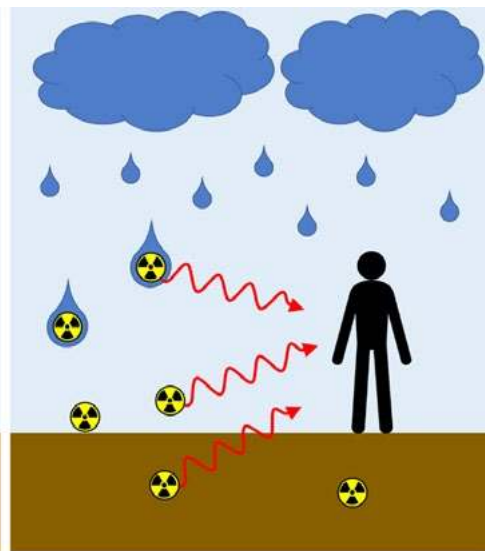
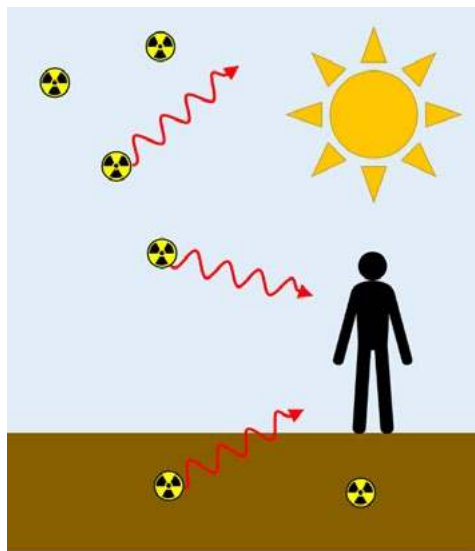


Naturalne minerały, z których powstają także gleby, zawierają niewielkie ilości uranu i toru. Ich rozpad promieniotwórczy prowadzi do powstawania kolejnych radioizotopów różnych pierwiastków, tworząc tzw. szeregi promieniotwórcze. Wchodzący w skład szeregów radon jest gazem, który częściowo wydobywa się do atmosfery, gdzie zachodzą kolejne rozpady aż do utworzenia stabilnego jądra atomowego. W powietrzu promieniowanie γ o największym natężeniu emitują pochodne radonu: bizmut Bi-214 i ołów Pb-214. Najistotniejszym źródłem promieniowania emitowanego z gleby jest pochodzący spoza szeregów promieniotwórczych potas K-40.

zastosowanie, mimo ciągłych postępów, wciąż wymaga wiele czasu. Tymczasem rozwój energetyki jądrowej w Polsce już teraz jest okazją na uzyskanie doświadczenia (np. wyszkolenie kadry), które pomoże łatwiej wprowadzić technologie przyszłości.

Deszczowe preludium radonu

Brak nowych skażeń promieniotwórczych pochodzących z ludzkiej działalności nie oznacza, że poziom promieniowania w naszym otoczeniu



Radioizotopy powstałe w wyniku rozpadu radonu unoszą się w powietrzu razem z innymi pyłami, jednak wraz z rozpoczęciem opadów deszczu są przechwytywane przez spadające krople wody. Skutkuje to wzrostem natężenia promieniowania w pobliżu powierzchni gleby.

jest stały. Obserwuje się dobowe i sezonowe wahania natężenia naturalnego promieniowania jonizującego, a sporadycznie jego nagłe wzrosty nawet o połowę.

Głównym winowajcą takiego stanu rzeczy jest radon, jedyny naturalnie występujący promieniotwórczy pierwiastek gazowy oraz jego pochodne, czyli radionuklidy powstające jako efekt jego rozpadu. Najwolniej rozpadający się izotop tego gazu (Rn-222) ma półokres rozpadu niespełna cztery dni – stosunkowo krótki, ale wystarczający, aby radon w znacznych ilościach wydostawał się z ziemi i rozprzestrzeniał w atmosferze. Ponad powierzchnią gleby radon przechodzi kolejne rozpady, wskutek czego powstają radioaktywne izotopy polonu, ołowiu czy bizmutu. Te zaś łatwo łą-

czą się z ziarnami aerozoli – drobnych cząstek unoszących się w powietrzu. Przejściowo liczba takich promieniotwórczych drobin przy powierzchni ziemi może wzrosnąć nawet czterokrotnie, ale zdarza się to tylko w pewnych warunkach. Jakich?

Otóż główną przyczyną wahań dawki promieniowania naturalnego są opady, podczas których krople wody przechwytywają wspomniane aerozole i przenoszą ku powierzchni gleby. Skala tego zjawiska może być bardzo różna w zależności od natężenia i czasu trwania opadów atmosferycznych czy też długości okresu suszy. Największe wzrosty natężenia promieniowania rejestrowane są na początku opadów, stanowiąc swoiste preludium do późniejszego oczyszczenia powietrza, którym oddychamy.



Wbrew rozpowszechnianym opiniom, energetyka jądrowa nie jest technologią przestarzałą. Foto– Dremastime

Innym źródłem wspomnianych wahań są zmiany natężenia promieniowania kosmicznego, jakie dociera do nas ze Słońca oraz bardziej oddalonych części kosmosu. Sama natura przygotowała dla nas kilkustopniową ochronę przed tymi kosmicznymi cząstkami, a mianowicie ziemskie pole magnetyczne, które odchyła kierunek lotu naładowanych protonów czy elektronów zmierzających ku powierzchni Ziemi, a także warstwę powietrza atmosferycznego, która rozprasza i pochłania pędzące w naszym kierunku cząstki.

Można oszacować, że atmosfera daje nam ochronę przed promieniowaniem taką jak około czterometrowa warstwa betonu! Jednak otaczająca nas mieszanina gazów pozostaje w ciągłym ruchu, lokalnie zmieniając swoją temperaturę czy ciśnienie, a zatem swoją gęstość. Wpływa to zauważalnie na natężenie promieniowania kosmicznego, które rejestrujemy. Im wyższe ciśnienie i mniejsza temperatura, tym powietrze bardziej gęste, a zatem większa ochrona przed wysokoenergetycznymi cząstkami z kosmosu.

Istnieje jeszcze kilka innych, bardziej złożonych i przez to interesujących zależności natężenia promieniowania od warunków atmosferycznych, które badane są m.in. dzięki pomiarom stacji takich jak „Monitor radioaktywności w powietrzu w Lublinie”, np. wpływ wilgotności gleby lub obecności pokrywy śnieżnej. Ale o tym może innym razem...

Dominik Kozieł

z Zakładu Unieszkodliwiania Odpadów
Promieniotwórczych w Otwocku

Radosław Zaleski

z Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej
w Lublinie



XIX edycja konkursu *Fizyczne Ścieżki*

Narodowe Centrum Badań Jądrowych i Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk zapraszają do udziału w XIX edycji konkursu *Fizyczne Ścieżki*.

W konkursie mogą brać udział:

- uczniowie szkół średnich (w tym szkół branżowych),
- uczniowie szkoły podstawowej z klas 7 i 8.

Konkurs odbywa się w 3 kategoriach:

- praca naukowa,
- pokaz zjawiska fizycznego,
- esej.

W kategoriach „Praca naukowa” i „Pokaz zjawiska fizycznego” – zgłoszenia mogą być indywidualne lub zespołowe (dwuosobowe lub trzyosobowe).

W kategorii „Esej” – tylko zgłoszenia indywidualne.

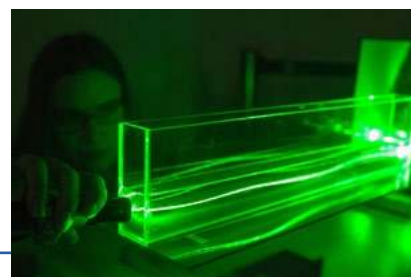
Termin nadsyłania prac mija 31 stycznia 2024 roku.

Prace i zapytania dotyczące Konkursu należy zgłaszać mailowo na adres: fizycznesciezki@ncbj.gov.pl

Informacje dodatkowe:

- Tematykę prac ustalają sami uczniowie.
- Każda praca, która pomyślnie przejdzie kwalifikacje formalną i merytoryczną, oceniana będzie przez przynajmniej dwóch recenzentów.
- Po dokonaniu oceny pracy grono recenzentów sporządzi recenzję naukową pracy, a następnie podejmie decyzję o zakwalifikowaniu bądź niezakwalifikowaniu autorów pracy do finału.
- Rozstrzygnięcie Konkursu w kwietniu 2024 r.
- Rozstrzygnięcie Konkursu nastąpi podczas seminarium finałowego, czyli spotkania jury z uczestnikami, w trakcie którego uczestnicy lub zespoły zaprezentują swoje prace przed jurorami oraz publicznością.
- Podczas finału prace oceniane będą przez pracowników naukowych wiodących polskich uczelni i instytutów naukowych.

Szczegółowe informacje o konkursie znajdują się na stronie internetowej: fizycznesciezki.pl



Epitaksja, czyli otrzymywanie ultraczystych kryształów

Kryształy często kojarzone z wyrobami jubilerskimi, elegancją i przepychem mają tak naprawdę wiele ważnych zastosowań w przyrządach, z których korzystamy na co dzień. Lasery, detektory promieniowania lub tranzystory obecne w urządzeniach multimedialnych i komputerach – te wszystkie przyrządy działają dzięki niewielkim kryształom półprzewodników czyniąc nasze życie i pracę wygodniejszymi. Jedną z najbardziej wyrafinowanych metod laboratoryjnego otrzymywania (hodowania) kryształów o najwyższej jakości jest epitaksja pozwalająca na uzyskanie spektakularnych rezultatów takich jak warstwy o grubości pojedynczych atomów lub o gładkości atomowej, studnie lub kropki kwantowe.

Michał Grzybowski

Czystość kryształów

Kryształy to ciała stałe wykazujące uporządkowane i powtarzalne (periodyczne) ułożenie budujących elementów (atomów, jonów lub cząsteczek). Jeśli w całej objętości materiału taki porządek jest zachowany to możemy mówić o monokryształach i to właśnie monokryształy mają znaczenie w zastosowaniach. Istotnymi parametrami kryształów jest ich jakość, mierzona np. koncentracją defektów, czyli odstępstw od idealnie regularnego ułożenia elementów oraz obecność domieszek, czyli niepożądanych obcych atomów lub jonów. Obecność nawet niewielkiej liczby defektów lub domieszek może w istotny sposób zmieniać właściwości kryształu. Dzieje się tak dlatego, że zaburzają one idealny porządek, czyli periodyczność sieci, z której biorą się intrygujące właściwości kryształów.

Defekty lub domieszki stanowią mogą na przykład swoiste pułapki dla elektronów przewodzących prąd w kryształach; elektrony te grzęzną w lokalnym minimum potencjału sprawiając, że materiał przestaje przewodzić prąd. Możliwy jest też odwrotny scenariusz – defekty krawędziowe mogą stanowić drogę o małym oporze dla elektronów sprawiając, że typowo izolujący kryształ wykazuje niskie napięcie przebicia i nie spełnia swojej izolującej roli.

Defekty lub domieszki silnie wpływają też na własności optyczne nadając materiałowi kolor – tak często dzieje się w przypadku szlachetnych minerałów. Idealnie czysty korund (tlenek glinu) jest bezbarwny, ale domieszki żelaza lub tytanu sprawiają, że mamy do czynienia z szafirem o charakterystycznej barwie, zaś domieszki chromu barwią kryształ na czerwono czyniąc go rubinem. Nic więc dziwnego, że wielu naukowców obrało za cel dokładne studiowanie własności defektów.

Co więcej, pojedyncze defekty typu „NV” w diamentach stanowią swoiste, niezwykle dokładne czujniki pola magnetycznego oraz są potencjalnymi elementami budul-

cowymi komputerów kwantowych. Skoro o diamentach mowa, to warto dodać, że laboratoryjnie otrzymywane diamenty są od pewnego czasu tańsze od tych naturalnych i mogą być otrzymywane metodą CVD (inna technika pokrewna do epitaksji z wiązek molekularnych).

Układ przestrzenny

Jeśli spojrzymy na układ okresowy dostrzeżemy tam około osiemdziesiąt różnych trwałych pierwiastków. Mogą one łączyć się ze sobą tworząc związki o różnorodnych cechach chemicznych i fizycznych. Połączenie dwóch pierwiastków w różnym stosunku ilościowym może skutkować zupełnie odmiennymi właściwościami powstającego związku chemicznego. Co więcej, połączenie dokładnie dwóch pierwiastków nawet w tym samym stosunku stechiometrycznym, lecz w odmiennym układzie przestrzennym także może wpływać na istnienie znaczących różnic w zachowaniu takich substancji (patrz ramka).

Dla czystych pierwiastków zjawisko istnienia różnych odmian układu przestrzennego i wynikających z nich właściwości nosi nazwę alotropii. Powszechnie znane są odmiany alotropowe węgla: grafit to miękki, nieprzezroczysty, przewodzący prąd materiał podczas gdy diament to przejrzysty, nieprzewodzący prądu kryształ, który jest najtwardszym znanym minerałem. Rozpowszechniony jest pogląd, że zmiana odmiany alotropowej cyny przyczyniła się do klęski Napoleona pod Moskwą – w mroźnej temperaturze guziki mundurów żołnierzy francuskich wykonane z tego materiału po prostu rozpadały się przechodząc z jednej odmiany w inną co miało tragiczne konsekwencje dla zmarzniętych żołnierzy. Analogiczne różnice mogą występować dla połączeń różnych pierwiastków, krystalicznych związków chemicznych: tellurek manganu – MnTe – w strukturze blendy cynkowej nie przewodzi prądu w temperaturze pokojowej, zaś jego forma heksagonalna jest przewodząca, inne są też temperatury, w których zanika porządek magnetyczny w tych dwóch kryształach.

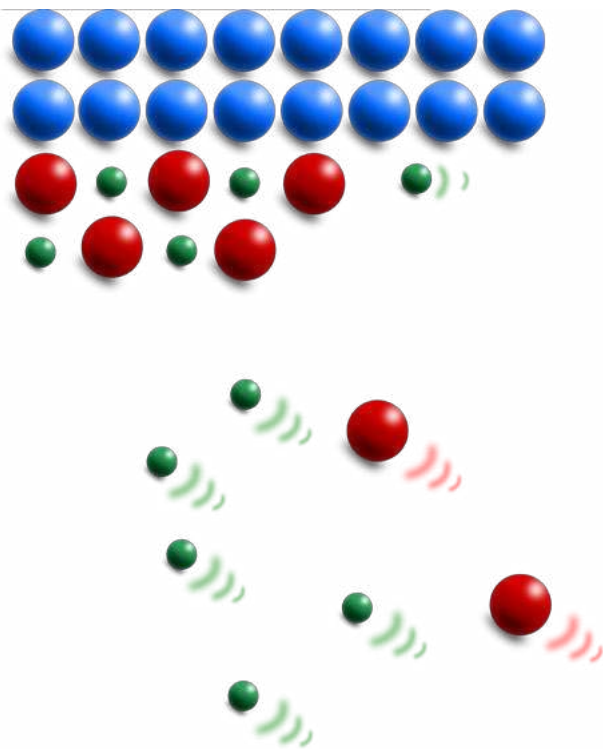
Z powyższych rozważań płyną dwa ważne wnioski. Po pierwsze, liczba możliwych do otrzymania substancji jest niewyobrażalna – nawet jeśli ograniczymy się tylko do samego świata nieorganicznego, a w tym krystalicznych ciał stałych. Po drugie, niezmiernie istotna jest kontrola nie tylko tak oczywistych czynników jak rodzaj, czystość i stosunek ilości substratów, ale także kontrola rozmieszczenia przestrzennego elementów stanowiących budulec kryształu. Jak podołać tak wyrafinowanemu zadaniu?

Epitaksja

Kontrolę układu przestrzennego atomów może zapewnić epitaksja, czyli metoda otrzymywania kryształów o najwyższej jakości. W szczególności na uwagę zasługuje jej bodaj najbardziej rozwinięta odmiana, czyli MBE (*molecular beam epitaxy*, czyli epitaksja z wiązek molekularnych). Istotną rolę w tej metodzie grają 3 czynniki: użycie odpowiedniego, już istniejącego podłoża krystalicznego, wysoka próżnia oraz niezależna kontrola temperatury różnych elementów układu.

Kluczowym zjawiskiem w epitaksji z wiązek molekularnych jest spontaniczne porządkowanie się atomów docierających do podłoża w sposób naśladujący jego strukturę (z greckiego „epi” + „taxis”, czyli – „na uporządkowanym”). Oddziaływania elektrostatyczne na poziomie molekularnym wymuszają ten proces i natura sama niejako umożliwia powstawanie nowej warstwy kryształu, która naśladuje poprzednią (Rys. 1).

Atomy, które docierają do powierzchni nie muszą być oczywiście tymi samymi, z których zbudowane jest pod-



Rys. 1. Artystyczna wizja epitaksji. Budujący się kryształ naśladuje strukturę podłoża (niebieskie atomy), co uwidoczniono symbolicznie przez zachowanie tej samej odległości między atomami (czerwone i zielone). Atomy docierające do podłoża mogą dyfundować po powierzchni w poszukiwaniu dogodnych miejsc.

łoża – to właśnie ten fakt stwarza ogromne możliwości. W przeciwnym razie technika MBE służyłaby jedynie do odtwarzania lub zwiększenia objętości takich kryształów które już istnieją.

Na przebieg i sukces procesu epitaksji składa się jednak wiele pomniejszych czynników i niuansów, które sprawiają, że nie jest to łatwa dyscyplina i nie zawsze osiągnięty jest pożądany rezultat. Innym razem jakość i właściwości wytworzonej w ten sposób substancji zadziwiają i zachwycają, dlatego też epitaksja ma w sobie coś ze sztuki.

Naprężenia

Owe naśladowanie struktury podłoża ma jednak ograniczenia, ponieważ każdy kryształ ma swoje charakterystyczne stałe sieci, czyli optymalne odległości między budującymi elementami, dla których energia całego układu jest najmniejsza. Gdy rozbieżność między naturalnymi stałymi sieci a stałymi sieci narzuconymi przez podłoże jest zbyt duża, kryształ w procesie wzrostu będzie bardzo szybko ulegał relaksacji, czyli procesowi wytworzenia defektów i zrywania wiązań chemicznych (jeśli takie istnieją) tak aby uzyskać strukturę najbliższą swojej „ulubionej”, czyli zdefiniowanej przez swoje stałe sieci.

Z jednej strony można w pewnym stopniu złagodzić ten proces stosując warstwy buforowe, czyli pośrednie, w których stała sieci stopniowo zmienia się do bardziej zbliżonej dla hodowanego kryształu. Z drugiej strony, silna spontaniczna relaksacja może prowadzić do powstania charakterystycznych wysp, a nie warstw, na powierzchni podłoża o ciekawych własnościach optycznych, zwanych kropkami kwantowymi (ze względu na efekty kwantowe ujawniające się z uwagi na ich niewielkie rozmiary).

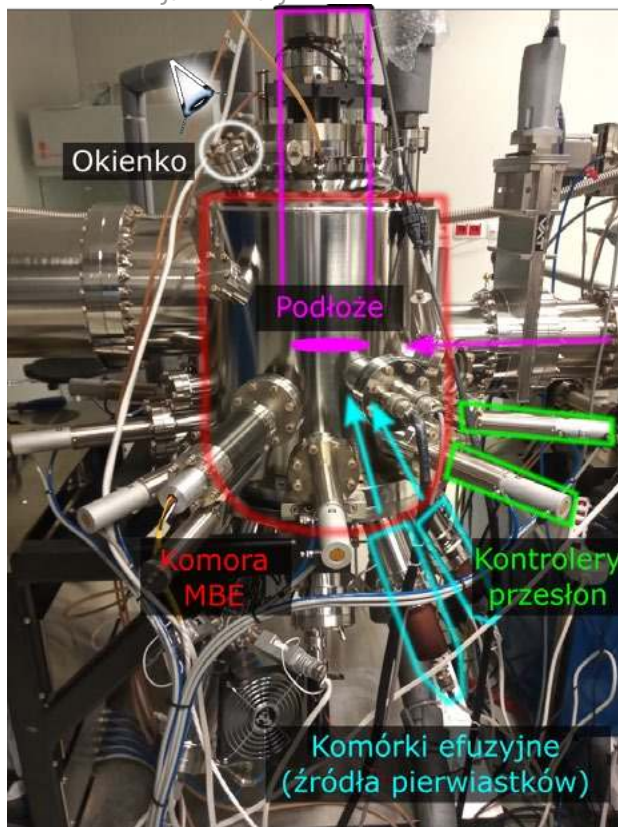
Dla mniejszych rozbieżności stałych sieci hodowanego kryształu i podłoża często udaje się wciąż przeprowadzić proces wzrostu cienkich, naprężonych warstw (czyli takich, w których stała sieci kryształu są istotnie narzucone przez podłoże i odbiegają od wartości dla objętościowych kryształów, które mogą występować w naturze).

Jak to działa?

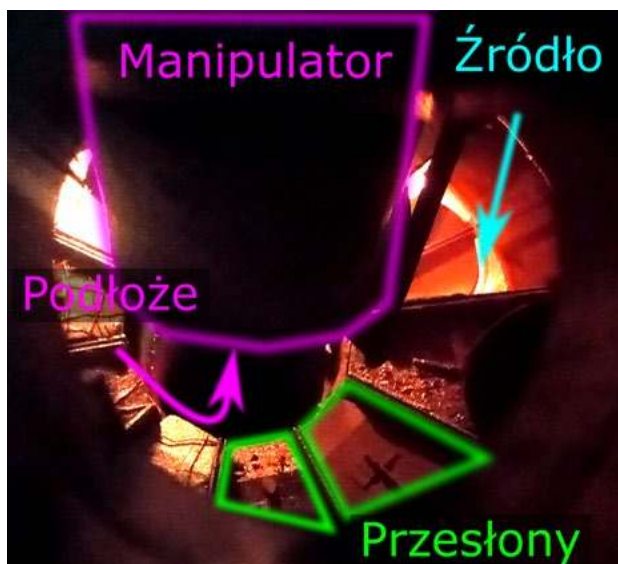
Procesy MBE mają miejsce w niezwykle szczelnej komorze próżniowej (Rys. 2), wewnątrz której utrzymywana jest ultrawysoka próżnia, a zatem ciśnienia na poziomie 10^{-6} - 10^{-7} Pa (ciśnienie atmosferyczne to ok. 10^5 Pa).

Jednak są też w niej niewielkie okienka, przez które warto zajrzeć do środka. Co tam zobaczymy? Źródła molekularne są umieszczone w dolnej części komory. Mogą być nimi komórki efuzyjne przykryte przesłonami (ang. *shutters*). Pod wpływem podgrzewania, następuje przechodzenie atomów pierwiastka do fazy gazowej (sublimacja) i ich unoszenie się w kierunku podłoża, gdy przesłona jest otwarta (Rys. 3). Wysoka próżnia gwarantuje, że atomy trafią do podłoża i ich tor ruchu pozostanie niezaburzony; gdyby nie było próżni, zderzenia z przypadkowymi cząsteczkami gazu powodowałyby rozpraszanie się wiązek atomów po całej komorze.

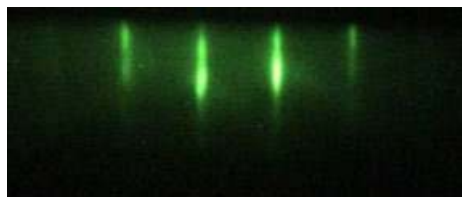
Intensywność strumienia atomów kontroluje się poprzez temperaturę źródła, która dla każdego pierwiastka jest dobierana indywidualnie (z uwagi na różne prężności



Rys. 2 Kluczowa część przykładowego układu do epitaksji z wiązek molekularnych. Na zdjęciu zaznaczono kolorami charakterystyczne elementy. Niebieskie strzałki pokazują orientacyjne kierunki strumieni atomów z dwóch wybranych komórek efuzyjnych. Różowa strzałka przedstawia kierunek, z którego wprowadzane jest do środka komory podłoże przez system słuz i transferów. Różowym kolorem zaznaczono również manipulator, który utrzymuje podłoże powierzchnią do dołu. (Na zdjęciu przedstawiono część układu eksperymentalnego znajdującego się na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego)



Rys. 3. Widok do wnętrza komory MBE przez okienko. Na pierwszym planie widać ciemny manipulator, który utrzymuje podłoże skierowane powierzchnią do dołu (nie-widoczne), jego miejsce wskazuje różowa strzałka. W tle widać przykryte przesłonami źródła. Jedno z nich (platyna) jest w trakcie rozgrzewania do temperatury 1800°C, co uwidacznia się przez silne promieniowanie (światło wydobywające się spod przesłony).



Rys. 4 Przykładowy obraz RHEED gładkiej powierzchni kryształu GaAs.

par). Temperatura podłoża również musi być odpowiednio wybrana. Z jednej strony nie może być ono zbyt zimne, bo wtedy wszystkie nadchodzące atomy natychmiast zostaną zaadsorbowane w losowych miejscach bez możliwości swobodnej dyfuzji po powierzchni w poszukiwaniu najdogodniejszych miejsc. Z drugiej strony nie może być też zbyt gorąco, bo wtedy atomy mając zbyt dużą energię będą natychmiast odparowywały z podłoża i wzrost kryształu w ogóle nie będzie następował.

W praktyce, w przypadku związków dwuskładnikowych często dobiera się temperaturę w ten sposób by jeden z nich, którego strumień jest większy, stale odparowywał z podłoża, zaś pozostawał na nim tylko wtedy, gdy zwiąże się z drugim składnikiem o mniejszym strumieniu. W ten sposób nie ma konieczności dobierania stechiometrycznych stosunków pierwiastków, a ponadto unika się niepożądanych wytrąceń jednego z nich.

Kiedy podłoże zostanie już pokryte warstwą nowego kryształu, ta nowa warstwa stanowi swego rodzaju „nowe podłoże”, dla kolejnej itd. Można dobrać parametry procesu tak by wzrost przebiegał on „warstwa po warstwie” umożliwiając kontrolę grubości niemal z monoatomową dokładnością – przynajmniej na pewnej ograniczonej powierzchni.

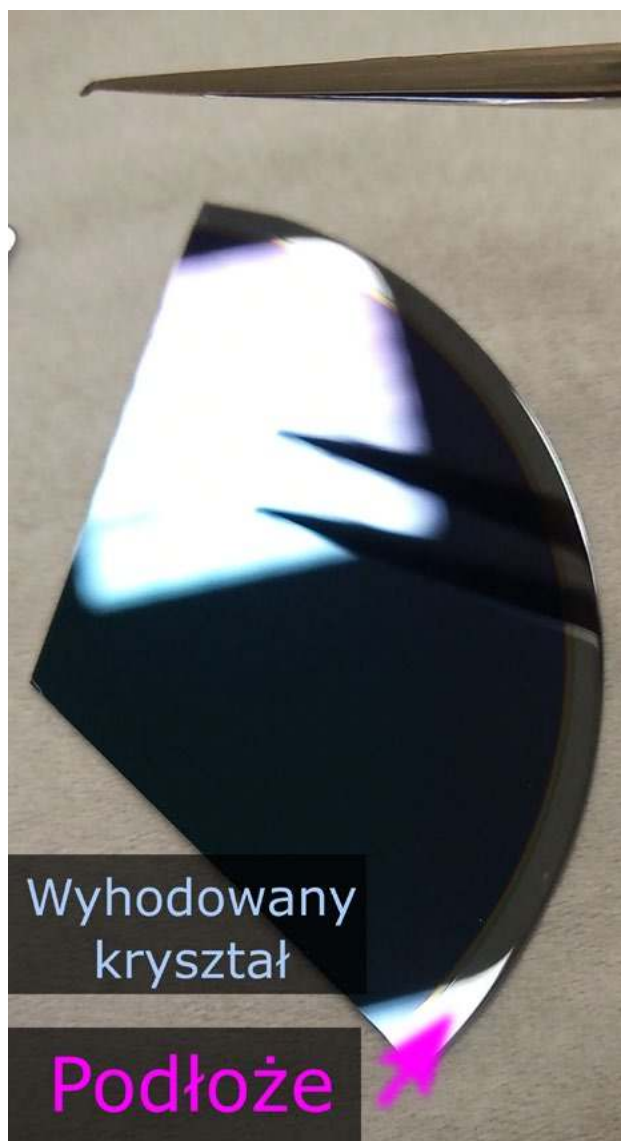
Istnieje mnogość rozwiązań technicznych i wariantów, dlatego poszczególne systemy mogą znacznie różnić się między sobą. W wielu z nich istnieje również możliwość swobodnego podglądu wzrostu kryształu za pomocą dyfrakcji wysokoenergetycznych elektronów (RHEED) padających na powierzchnię. Elektrony te następnie trafiają na ekran, na którym tworzy się obraz (Rys. 4). Na jego podstawie można wnioskować o tym czy wzrost przebiega dwuwymiarowo, (czyli warstwami, wtedy na obrazie uwidaczniają się ostre linie) czy też trójwymiarowo (czyli np. w postaci wysp, wtedy na obrazie widoczne są kropki), a także jak zmienia się stała sieci. To ważne narzędzie pozwala na monitorowanie procesu na bieżąco i w konsekwencji na modyfikacje jego parametrów, jeśli istnieje taka potrzeba.

Zastosowania

Rezultatem procesu wzrostu są zwykle cienkie i bardzo gładkie warstwy kryształów (Rys. 5).

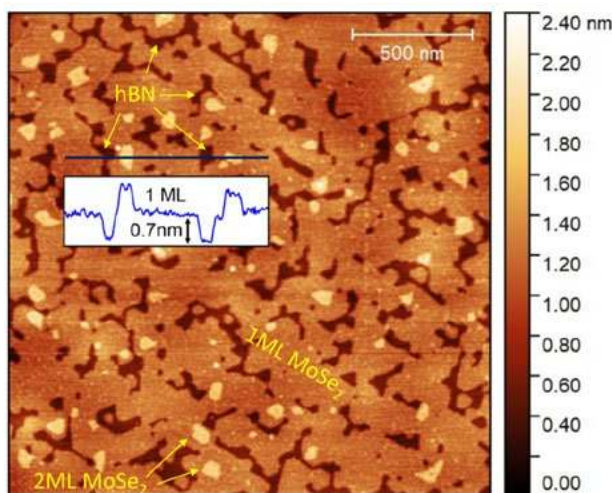
Skany mikroskopem sił atomowych mogą ujawnić pojedyncze stopnie atomowe (Rys. 6). Tak przygotowane warstwy mogą stanowić obiekt badań sam w sobie bądź punkt wyjścia do otrzymywania układów scalonych lub innych elementów elektronicznych w procesach litograficznych. Tego typu procesy litograficzne są rutynowo przeprowadzane w przemyśle półprzewodnikowym w najbardziej znanych korporacjach na świecie. Sama epitaksja jest często używana i lubiana przez badaczy, jest jednak mniej wykorzystywana przez przemysł – chociaż obecna i tam – ze względu na dość niską prędkość wzrostu.

Ta niska prędkość ma jednak poważną zaletę – pozwala na precyzyjne kontrolowanie grubości warstw, a przez to umożliwia tworzenie bardzo cienkich struktur, w których ujawniają się efekty kwantowe – takie jak studnie, kropki czy druty kwantowe (tzw. struktury o obniżonej wymia-



Rys. 5 Przykładowy wielowarstwowy kryształ (powierzchniowa warstwa to MnSe, jedną z warstw pod spodem jest CdSe o grubości 5 nm stanowiąca studnię kwantową) otrzymany metodą MBE na podłożu GaAs. Ze względu na bardzo wysoką jakość powierzchni widać bardzo wyraźnie odbicie pęsety laboratoryjnej na tle lampy sufitowej.

rowości). Dzięki ich małym rozmiarom wzbudzone elektrony, które trafiają do takiej struktury mogą zostać tam uwięzione i przyjmować tylko określone (skwantowane) wartości energii, co ujawnia się w ich rekombinacji, czyli w procesie powrotu do stanu podstawowego, w którym emitowane jest światło monochromatyczne, czyli o ściśle określonej długości fali. Dlatego to właśnie studnie kwantowe są istotnym elementem składowym laserów półprzewodnikowych. Dzięki MBE otrzymano i poznano różnorodne kryształy niespotykane w naturze jak na przykład



Rys. 6 Obraz z mikroskopii sił atomowych pozwala uwidocznić strukturę powierzchni dichalkogenu MoSe_2 . Ciemnopomarańczowe obszary to podłoże h-BN, jasnopomarańczowe – warstwy o grubości pojedynczej cząsteczki MoSe_2 (1 ML), natomiast żółte – dwuwarstwy MoSe_2 (2 ML). Zaprezentowano również zmianę topografii powierzchni wzdłuż grubej granatowej linii. Obrazek pochodzi z publikacji [4].

tetragonalny CuMnAs – materiał o ciekawych symetriach i związanych z nimi właściwościach magnetycznych.

W Polsce intensywnie rozwijana jest technologia kryształów GaN, ważnych w niebieskiej optoelektronice, a także detektorów podczerwieni, także w skali przemysłowej. W obszarze badań są np. warstwy o grubościach rzędu pojedynczych atomów, tzw. materiałów dwuwymiarowych, do których należą grafen i dichalkogenki metali przejściowych. Powyższe wybrane przykłady ilustrują jak bardzo różnorodny jest potencjał technik epitaksjalnych. Z pewnością wiele kryształów dopiero czeka na swoje odkrycie lub renesans znalezienia spektakularnych zastosowań.

Dr Michał Grzybowski

Autor jest adiunktem na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Serdeczne podziękowania dla dr. hab. Wojciecha Pacuskiego oraz mgr Julii Kucharek za pomoc w przygotowaniu artykułu.

LITERATURA:

- [1] S. Koizumi, C. E. Nebel, M. Nesladek (2008). Physics and Applications of CVD Diamond. Wiley VCH. pp. 50, 200–240 (2008).
- [2] P. Frigeri, L. Seravalli, G. Trevisi, and S. Franchi, Molecular Beam Epitaxy: An Overview, Elsevier (2011).
- [3] M. A. Herman, H. Sitter, Molecular Beam Epitaxy: Fundamentals and Current Status, Springer-Verlag (1989).
- [4] W. Pacuski et al., Narrow excitonic Lines and Large-Scale Homogeneity of Transition Metal Dichalcogenide Monolayers Grown by Molecular Beam Epitaxy on Hexagonal Boron Nitride, Nano Lett. 20, 3058–3066 (2020).

W następnych wydaniach polecamy m.in.

- Nierozwiązane problemy i kwestie sporne w fizyce teoretycznej
- „Na ścieżkach Fizyki Współczesnej” – wystawy, wykłady, książki
- CREDO-Maze: promieniowanie kosmiczne – zapomniani odkrywcy

Za co Nobel 2022?

Część 4. Bramki kwantowe

Podstawowymi elementami układów przetwarzających informacje są tak zwane bramki logiczne. Realizują one proste funkcje logiczne operując na podstawowych jednostkach informacji – bitach. Informację kwantową zapisujemy w kubitach (generalnie w kuditach), o których pisałem w poprzedniej części¹. Przetwarzanie informacji kwantowej wymaga zatem bramek logicznych innego typu niż klasyczne bramki. Nazywamy je bramkami kwantowymi. Niektóre z nich opiszę w tym artykule.

Jan Kurzyk

Bramki jednokubitowe

Działanie bramek kwantowych najprościej jest wyjaśnić na przykładzie bramek przetwarzających kubity będące stanami polaryzacji fotonów.

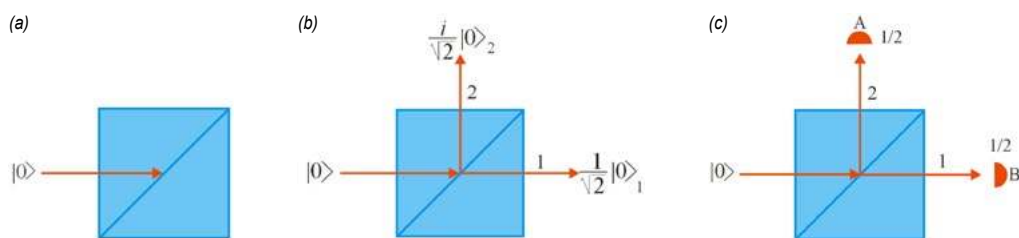
Zacznijmy od opisu działania tzw. płytki światłodzielnicy (PSD) nazywanej też dzielnikiem wiązki. Jest to najczęściej sześcienna kostka złożona z dwóch trójkątnych szklanych pryzmatów sklejonych podstawami specjalnym klejem. Niech stan $|0\rangle$ oznacza polaryzację poziomą, a stan $|1\rangle$ polaryzację pionową. Załóżmy, że foton znajdujący się w stanie $|0\rangle$ pada na PSD, jak na rysunku 1 (a). W naszej klasycznej wizji świata, foton z prawdopodobieństwem $\frac{1}{2}$ przejdzie przez PSD na wprost lub odbije się w kierunku pionowym. Ale takie wyobrażenie jest błędne. Zgodnie z mechaniką kwantową foton po przejściu przez PSD znajduje się w stanie będącym superpozycją stanów: $\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle_1$ i $\frac{i}{\sqrt{2}}|0\rangle_2$ (rysunek 1 (b)), gdzie indeks 1 oznacza przejście fotonu na wprost, a indeks 2 odbicie w kierunku pionowym. Obecność jednostki urojonej i w drugim stanie wynika z przesunięcia fazowego kubitów w przestrzeni Blocha [3] (obróć o kąt $\pi/2$ wokół osi Z).

Dopiero pomiar powoduje kolaps stanu fotonu będącego superpozycją obu stanów do stanu $|0\rangle_1$ lub $|0\rangle_2$. Fo-

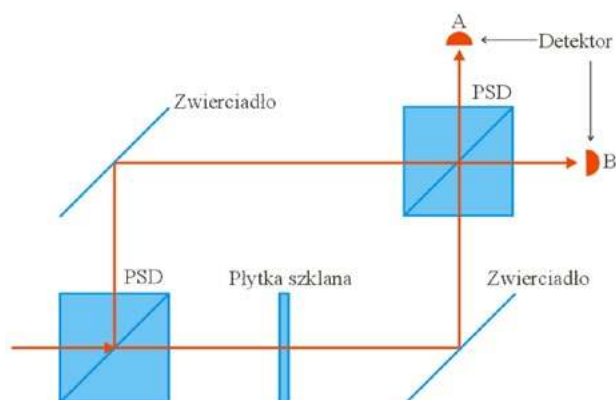
ton zostanie z prawdopodobieństwem $\frac{1}{2}$ zarejestrowany przez detektor A lub B (rysunek 1 (c)). Taki pomiar nie daje nam jednoznacznej odpowiedzi, czy foton znajdował się w superpozycji opisanych wyżej stanów, czy też, tak jak podpowiada nam mechanika klasyczna przeszedł tylko jedną z tych dróg. Aby sprawdzić jak jest naprawdę możemy skorzystać z interferometru Macha-Zendera [4]. Jeśli w kierunku tego interferometru będziemy kierować pojedyncze fotony, to zobaczymy, że pojedynczy foton interferuje sam ze sobą! A to oznacza, że faktycznie mamy do czynienia z superpozycją obu stanów. Interferometr Macha-Zendera składa się z dwóch płytek światłodzielnicy (lub zwierciadeł półprzepuszczalnych), dwóch lusterek, przezroczystej płytki równoległosciennej ustawionej na jednej z dróg optycznych i dwóch detektorów ustawionych za drugą PSD (patrz rysunek 2). Za pomocą płytki równoległosciennej możemy sterować długościami dróg optycznych [5] wprowadzając w ten sposób względne przesunięcie fazowe.

Założmy, że na pierwszą płytkę PSD w interferometrze Macha-Zendera pada tylko jeden foton jak na rysunku 2. Policzymy jakie jest prawdopodobieństwo, że zostanie on zarejestrowany przez detektor A. Prześledźmy najpierw kolejne zmiany amplitud prawdopodobieństwa i ich faz na drodze 1 (patrz rysunek 3). Po wyjściu z PSD otrzymujemy stan $\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle$. Następnie foton przechodzi przez płytkę

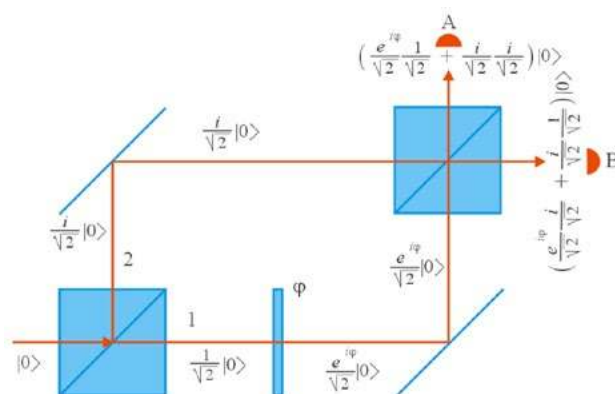
¹ Jak zwykle sugeruję zapoznanie się z poprzednimi odcinkami cyklu [1-3], gdyż w artykule będę posługiwał się pojęciami, które omówiłem wcześniej



Rysunek 1. (a) Foton padający na płytkę światłodzielącą PSD. (b) Za PSD foton znajduje się w stanie będącym superpozycją stanu po przejściu na wprost i po odbiciu. (c) Pomiar niszczy superpozycję. Stan fotonu kolapsuje z jednakowym prawdopodobieństwem $1/2$ do jednego z dwóch stanów. Foton jest rejestrowany tylko przez jeden detektor.



Rysunek 2. Interferometr Macha-Zendera.



Rysunek 3. Zmiany amplitud prawdopodobieństwa na kolejnych odcinkach dróg optycznych w interferometrze Macha-Zendera.

równoległościenną, która zmienia względną fazę kubitów o czynnik $e^{i\varphi}$. Kąt φ zależy od grubości płytki, jej współczynnika załamania i długości fali fotonu. Dostajemy stan $\frac{e^{i\varphi}}{\sqrt{2}}|0\rangle$. Odbicie od zwierciadła nie zmienia ani amplitudy prawdopodobieństwa, ani fazy kubitów. Następnie foton przechodzi na wprost przez drugą PSD i otrzymujemy stan $\frac{e^{i\varphi}}{\sqrt{2}}\frac{1}{\sqrt{2}}|0\rangle$.

Teraz prześledźmy drugą drogę do detektora A. Po przejściu przez pierwszą PSD mamy stan $\frac{i}{\sqrt{2}}|0\rangle$. Zwierciadło nie zmienia tego stanu. Po odbiciu w drugiej PSD stan fotonu przyjmuje postać $\frac{i}{\sqrt{2}}\frac{i}{\sqrt{2}}|0\rangle$. Ostatecznie stan fotonu przed detektorem A jest superpozycją obu opisanych stanów, czyli

$$\left(\frac{e^{i\varphi}}{\sqrt{2}}\frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{i}{\sqrt{2}}\frac{i}{\sqrt{2}}\right)|0\rangle = \frac{1}{2}(e^{i\varphi} - 1)|0\rangle.$$

A zatem prawdopodobieństwo zarejestrowania fotonu przez detektor A wynosi

$$P_A = \left|\frac{1}{2}(e^{i\varphi} - 1)\right|^2.$$

Po prostych obliczeniach dostajemy

$$P_A = \frac{1}{2}(1 - \cos(\varphi)).$$

Analogiczne rachunki dla detektora B prowadzą do wyniku

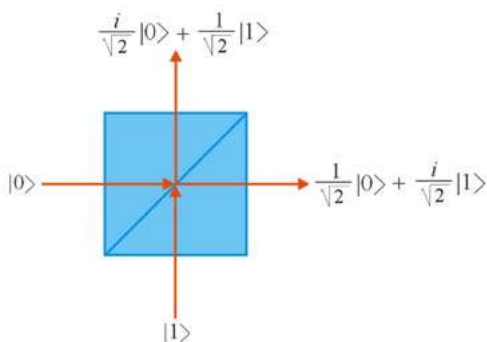
$$P_B = \frac{1}{2}(1 + \cos(\varphi)).$$

Kolejne zmiany amplitud prawdopodobieństwa dla obu dróg pokazano na rysunku 3.

Jak widzimy wybór płytki fazowej w interferometrze Macha-Zendera decyduje o prawdopodobieństwie zarejestrowania fotonu przez detektory A i B. Dla przykładu, gdy usuniemy płytkę, względna faza kubitów będzie zerowa ($\varphi = 0$) i wówczas $P_A = 0$ oraz $P_B = 1$, czyli foton nigdy nie trafi do detektora A, a zawsze trafi do detektora B. Taka sytuacja nie byłaby możliwa, gdyby foton przechodził z prawdopodobieństwem $1/2$ tylko jedną drogą i nie byłoby superpozycji stanów, o której pisałem wyżej. Według klasycznej mechaniki foton powinien z jednakowym prawdopodobieństwem $1/2$ trafiać do obu detektorów A i B. Jednak tak nie jest. Eksperymenty potwierdzają przewidywania mechaniki kwantowej – foton interferuje sam ze sobą!

Jeśli przeanalizujemy sytuację, w której na pierwszą PSD pada foton od dołu, to prawdopodobieństwa zarejestrowania tego fotonu przez detektory A i B będą odwrotne niż poprzednio. Skierujmy teraz z lewej strony PSD foton w stanie $|0\rangle$ (polaryzacja pozioma), a od dołu foton w stanie $|1\rangle$ (polaryzacja pionowa). Na wyjściu dostaniemy superpozycję obu stanów, takie jak na rysunku 4.

W sytuacji, gdy w interferometrze Macha-Zendera $\varphi = 0$ foton $|0\rangle$ zawsze trafi do detektora A, a foton $|1\rangle$ zawsze trafi do detektora B. Zastąpmy teraz detektory płytkami półfalowymi (tak zwanymi półfalówkami) [6]. Półfalówka jest przezroczystą płytką wykonaną z anizotropowego dwójłomnego kryształu (np. kwarcu) o grubości tak dobranej, żeby długości dróg optycznych promienia zwyczajnego i nadzwyczajnego różniły się o połowę długości fali świetlnej (stąd nazwa płytki). W przypadku światła spolaryzowanego kołowo półfalówka zmienia

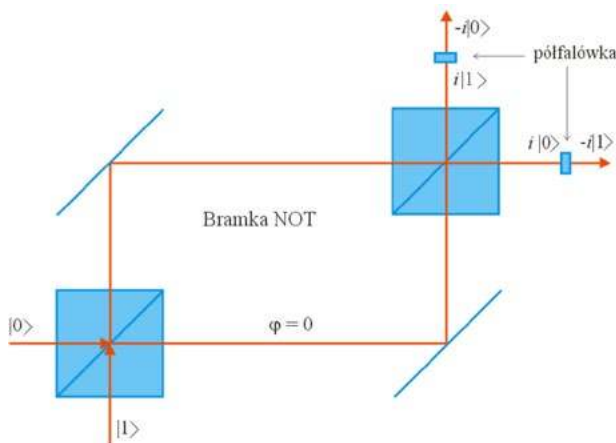


Rysunek 4. Superpozycja stanów dwóch fotonów o polaryzacji poziomej i pionowej za płytką światłodziącą.

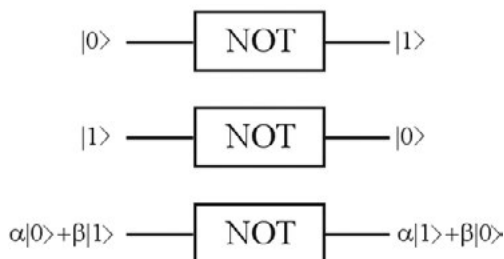
światło spolaryzowane kołowo prawoskrętnie na światło spolaryzowane kołowo lewoskrętnie i odwrotnie. Zaś w przypadku światła spolaryzowanego liniowo płytka obraca kierunek polaryzacji o kąt równy podwojonemu kątowi między kierunkiem polaryzacji światła, a jednym z kierunków głównych kryształu. Jeśli kąty dobierzemy tak, że kąt skręcenia kierunku polaryzacji będzie równy 90° , to płytka będzie zamieniać stan $|0\rangle$ na stan $|1\rangle$ i odwrotnie. W ten sposób możemy interferometr Macha-Zendera zmienić w bramkę logiczną typu NOT (bramkę negacji). Demonstruje to rysunek 5.

Klasyczna bramka logiczna NOT potrafi jedynie zamieniać bit 0 na 1 i odwrotnie. Kwantowa bramka logiczna NOT potrafi więcej, co pokazuje rysunek 6.

Interferencja kwantowa pozwala uzyskać operacje logiczne niedostępne w klasycznej informatyce. Skoro bramka NOT składa się z dwóch płytek światłodziących, to pojedynczą PSD można nazwać bramką $\sqrt{\text{NOT}}$.



Rysunek 5. Interferometr Macha-Zendera działający jako bramka kwantowa typu NOT



Rysunek 6. Schemat działania kwantowej bramki NOT.

Tego typu bramka nie ma swojego odpowiednika w informatyce klasycznej. Rysunek 7 przedstawia schemat działania kwantowej bramki $\sqrt{\text{NOT}}$.

Inną bramką jednokubitową jest bramka zmieniająca fazę stanu $|1\rangle$ (obracająca kubit w przestrzeni Blocha o dowolny kąt ϕ wokół osi Z). Jest to tzw. bramka P. Jej szczególnymi przypadkami są bramki Z, S i T [7]:

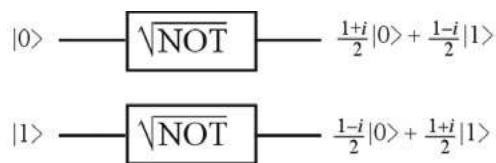
$$\text{bramka Z; } Z|1\rangle = e^{i\pi}|1\rangle = -|1\rangle,$$

$$\text{bramka S; } S|1\rangle = e^{i\pi/2}|1\rangle = i|1\rangle,$$

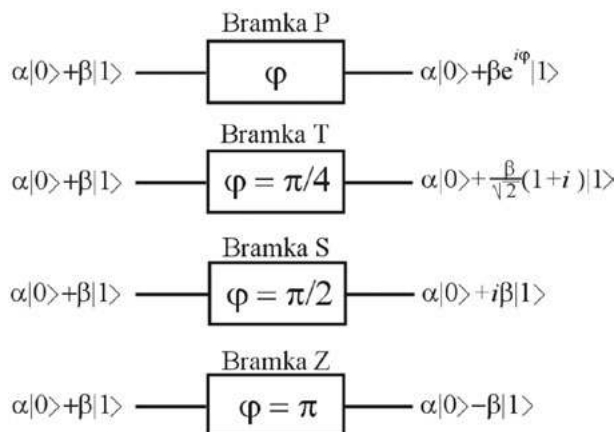
$$\text{bramka T; } T|1\rangle = e^{i\pi/4}|1\rangle = \frac{1+i}{\sqrt{2}}|1\rangle.$$

Działanie tych bramek przedstawia rysunek 8. Bramki Z, S, i T mogą być używane do konstruowania bardziej zaawansowanych bramek.

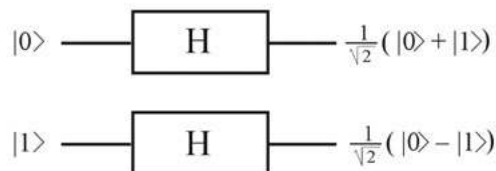
Bardzo ważną bramką jednokubitową jest bramka Hadamarda. Została tak nazwana na cześć francuskiego matematyka i fizyka Jacquesa Hadamarda (1865-1963), który odkrył własności macierzy kwadratowych z elementami o wartościach ± 1 nazywanych dziś macierzami Hadamarda [8]. Bramka Hadamarda działając na stan $|0\rangle$ lub $|1\rangle$ przekształca go w równą w superpozycję stanów $|0\rangle$ i $|1\rangle$, przy czym w przypadku działania na stan $|1\rangle$ zmienia jego fazę na przeciwną. Działanie bramki Hadamarda przedstawia rysunek 9.



Rysunek 7. Schemat działania kwantowej bramki $\sqrt{\text{NOT}}$.



Rysunek 8. Schemat działania bramki zmiany fazy kwantowej.



Rysunek 9. Schemat działania bramki Hadamarda.

Zauważmy, że niezależnie od tego czy przez bramkę Hadamarda przepuścimy kubit $|0\rangle$ czy $|1\rangle$ dostajemy kubit będący równą superpozycją stanów $|0\rangle$ i $|1\rangle$. Jeśli po tej operacji wykonamy pomiar otrzymanego kubit, to w wyniku kolapsu stanu, dostaniemy z jednakowym prawdopodobieństwem $\frac{1}{2}$ stan $|0\rangle$ lub $|1\rangle$. Przypomina, to rzut monetą, który też prowadzi z jednakowym prawdopodobieństwem do otrzymania jednego z dwóch stanów: „orzeł” lub „reszka”. Z tego powodu bramkę Hadamarda nazywamy czasami „monetą kwantową”. Jest jednak jedna różnica pomiędzy rzutem klasyczną monetą i „monetą kwantową”. W przypadku rzutu monetą klasyczną powtórzenie rzutu da ponownie z jednakowym prawdopodobieństwem wynik „orzeł” lub „reszka”. I będzie tak niezależnie od tego, czy po pierwszym rzucie spojrzymy na monetę (wykonamy pomiar), czy też nie.

Zobaczmy jak jest w przypadku „monety kwantowej” (bramki Hadamarda). Jeśli po „rzucie” spojrzymy na „monetę” (wykonamy pomiar) to otrzymamy z jednakowym prawdopodobieństwem stan $|0\rangle$ lub $|1\rangle$. Wówczas kolejny „rzut” doprowadzi do kubit będącego ponownie równą superpozycją stanów $|0\rangle$ i $|1\rangle$, a pomiar da znowu z jednakowym prawdopodobieństwem stan $|0\rangle$ lub $|1\rangle$. Jak dotąd wszystko jest dokładnie tak jak w przypadku monety klasycznej. Ale zupełnie inaczej będzie jeśli po pierwszym „rzucie” nie spojrzymy na „monetę kwantową” (nie wykonamy pomiaru) i „rzucimy” ją ponownie (przepuścimy przez bramkę Hadamarda). Łatwy rachunek pokazuje, że

$$H^2|0\rangle = H\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle + |1\rangle)\right) = |0\rangle,$$

$$H^2|1\rangle = H\left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)\right) = |1\rangle.$$

Oznacza to, że ponowny „rzut kwantową monetą” bez sprawdzania stanu po pierwszym „rzucie” zawsze przywraca stan początkowy. Takiej sytuacji nie spotkamy w żadnym klasycznym układzie probabilistycznym. Bramka Hadamarda jest odwracalna!

Bramki dwukubitowe

Analogicznie jak w przypadku bramek klasycznych, bramki kwantowe mogą działać na jednym dwu lub więcej kubitach. W poprzednim punkcie pokazałem kilka bramek jednokubitowych. Spośród bramek dwukubitowych szczególnie ważną bramką jest bramka kontrolowanej negacji CNOT (ang. controlled NOT). Bramka przyjmuje dwa kubity. Jeden z nich nazywamy kubit sterującym lub kontrolnym (ang. control qubit), a drugi kubitem sterowanym lub docelowym (ang. target qubit). Jeśli kubit sterujący jest w stanie $|1\rangle$ (i tylko wtedy) następuje negacja kubit docelowego. W wyniku operacji zmianie ulega jedynie kubit sterowany. Działanie bramki CNOT na stanach bazowych $|0\rangle$ lub $|1\rangle$ przypomina działanie klasycznej bramki XOR, czyli alternatywy rozłącznej co pokazuje poniższy schemat (czerwonym kolorem zaznaczono stany kubit docelowego):

XOR	CNOT
00→0	$ 00\rangle \rightarrow 00\rangle$
01→1	$ 01\rangle \rightarrow 01\rangle$
10→1	$ 10\rangle \rightarrow 11\rangle$
11→0	$ 11\rangle \rightarrow 10\rangle$

Na tym jednak podobieństwa obu bramek kończą się. Bramka CNOT pozwala nam otrzymywać stany splątane! Jeśli na przykład kubit sterujący ma postać $\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle - |1\rangle)$, a kubit docelowy postać $|1\rangle$, to w wyniku działania bramki otrzymamy stan $\frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$, który jest stanem splątany [1].

Opis przykładowej implementacji bramki CNOT można znaleźć w [9].



Rysunek 10. Wykorzystanie bramki CNOT do otrzymania stanu splątanego.

Reprezentacja macierzowa bramek kwantowych

Z matematycznego punktu widzenia bramki kwantowe są operatorami unitarnymi, więc możemy je opisywać macierzami unitarnymi [10]. W przypadku bramek jednokubitowych są to macierze kwadratowe 2×2 . Na przykład bramka NOT jest reprezentowana przez macierz Pauliego σ_x :

$$\sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Z kolei macierz Pauliego σ_y :

$$\sigma_y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$$

odpowiada bramce, która zmienia stan $|0\rangle$ w stan $i|1\rangle$, a stan $|1\rangle$ w stan $-i|0\rangle$.

Macierz Pauliego σ_z :

$$\sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$$

odpowiada opisywanej wyżej bramce fazowej Z ($\varphi = \pi$), która zmienia znak fazy stanu $|1\rangle$, a pozostawia bez zmiany stan $|0\rangle$ (patrz rysunek 8). Bramki Pauliego można wykorzystać między innymi do konstrukcji bramek realizujących obroty kubitów w przestrzeni Blocha [11]. O takich operacjach wspominałem w poprzedniej części [3] opisując ostatni etap teleportacji.

Bramkę Hadamarda reprezentuje macierz Hadamarda

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}.$$

Do jej konstrukcji moglibyśmy użyć dwóch bramek Pauliego σ_x i σ_z

$$H = \frac{1}{\sqrt{2}}(\sigma_x + \sigma_z).$$

Bramki dwukubitowe reprezentują macierze kwadratowe 4×4 . Na przykład bramce CNOT odpowiada macierz

$$\text{CNOT} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Unitarność macierzy reprezentujących bramki kwantowe sprawia, że ich kwadrat jest macierzą tożsamościową. Dzięki tej własności bramki kwantowe są odwracalne. Zauważmy, że dwubitowe klasyczne bramki logiczne (np. AND, OR) nie są odwracalne. Dzięki odwracalności bramek kwantowych możemy odtwarzać stan kubitów na wejściu bramki. Przykładem takiej sytuacji jest opisana powyżej sytuacja podwójnego działania bramki Hadamarda. Również bramka CNOT jest odwracalna. Po zadziałaniu bramką CNOT możemy doprowadzić do splątania stanów, a powtórne działanie prowadzi do ich rozplątania i przywraca stan początkowy.

Odwracalność bramek kwantowych jest bardzo ważną cechą. Pozwala ona na precyzyjne manipulowanie informacją kwantową. Dzięki odwracalności bramek kwantowych możemy wykonać jakieś obliczenia kwantowe, a następnie przywrócić stan początkowy układu kwantowego. Warunkiem koniecznym odwracalności bramki kwantowej jest taka sama liczba kubitów na wejściu i na wyjściu. Oczywiście nie każda operacja kwantowa jest odwracalna. Przykładem bramki nieodwracalnej jest bramka pomiaru (ang. measurement gate). Pomiar wprowadza dekoherencję układu kwantowego, co prowadzi do utraty informacji kwantowej. Taki proces jest nieodwracalny.

W przypadku klasycznych bramek logicznych istnieje skończona liczba typów bramek, za pomocą których

możemy zrealizować dowolny algorytm. Podobnie jest w przypadku bramek kwantowych. Jednym z takich uniwersalnych zestawów bramek kwantowych wystarczających do zrealizowania dowolnego algorytmu kwantowego są na przykład dwie bramki jednokubitowe: bramka Hadamarda i bramka fazowa oraz jedna bramka dwukubitowa: bramka CNOT. Przykładowo protokół teleportacji możemy zrealizować z wykorzystaniem bramki Hadamarda i bramki CNOT co opisałem w poprzedniej części [3].

Oprócz bramek jedno- i dwukubitowych istnieją bramki wielokubitowe. Ale na tym nie koniec. Istnieją również bramki operujące na kuditach wyższego rzędu niż 2 (przypomnę, że kubit jest kuditom rzędu 2). Opisane tu bramki kubitowe mają swoje uogólnienie na bramki kuditowe dowolnego stopnia np. bramki kuditowe, czyli bramki dla kuditów stopnia 3 [11]. Podobnie jak bramki kubitowe bramki kuditowe są również odwracalne.

W następnej części zajmę się praktycznymi zastosowaniami przetwarzania informacji kwantowej. Między innymi opiszę na czym polega kryptografia kwantowa.

dr Jan Kurzyk

Katedra Fizyki Politechniki Krakowskiej

LITERATURA

- [1] J. Kurzyk, *Za co Nobel 22? Część 1. Interpretacja kopenhaska, paradoks EPR, stany splątane*. „Fizyka w Szkole” 1/2023.
- [2] J. Kurzyk, *Za co Nobel 22? Część 2. Nierówność Bella, eksperymenty ze splątanymi fotonami*. „Fizyka w Szkole” 2/2023
- [3] J. Kurzyk, *Za co Nobel 22? Część 3. Kubity, stany Bella, teleportacja*. „Fizyka w Szkole” 3/2023
- [4] https://pl.wikipedia.org/wiki/Interferometr_Macha-Zehndera. [Dostęp 12.06.2023].
- [5] https://pl.wikipedia.org/wiki/Droga_optyczna. [Dostęp 15.06.2023].
- [6] <https://pl.wikipedia.org/wiki/P%C5%82ytk%C3%B3rka>. [Dostęp 22.06.2023].
- [7] https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_logic_gate. [Dostęp 13.06.2023].
- [8] https://pl.wikipedia.org/wiki/Macierz_Hadamarda. [Dostęp 19.06.2023].
- [9] <https://docplayer.pl/48913660-V-quantowe-bramki-logiczne-janusz-adamowski.html>. [Dostęp 12.06.2023].
- [10] https://pl.wikipedia.org/wiki/Macierz_unitarna. [Dostęp 29.06.2023].
- [11] M. Saverwain, J. Wiśniewska, *Informatyka Kwantowa. Wybrane obwody i algorytmy*. PWN, Warszawa 2015.

Superkomputer i polskie badania kwantowych fenomenów

Badania fermionów, dające nadzieje na głębsze zrozumienie procesów zachodzących wewnątrz gwiazd neutronowych oraz badania turbulencji kwantowych występujących w nadcieczkach przeprowadził – wykorzystując możliwości superkomputera LUMI – naukowiec z Politechniki Warszawskiej.

Jak poinformowała uczelnia, dr hab. inż. Gabriel Włazłowski zakończył prace w ramach grantu obliczeniowego, realizowanego z wykorzystaniem infrastruktury najpotężniejszego europejskiego superkomputera.

Superkomputer LUMI (Large Unified Modern Infrastructure), jak porównano w komunikacie Wydziału Fizyki PW, jest „olbrzymi jak kort tenisowy”. Wykonuje maksymalnie 550 petaflopsów (550 milionów miliardów) obliczeń na sekundę. Ma ekologiczne zasilanie. Jako jedyny na Starym Kontynencie pozwala na prowadzenie obliczeń będących poza zasięgiem większości badaczy.

Polska jest jednym z 10 krajów tworzących konsorcjum umożliwiające swoim członkom prowadzenie badań opartych o obliczenia wysokiej wydajności.

Dr inż. Włazłowski badał złożone problemy mechaniki kwantowej, ze szczególnym uwzględnieniem turbulencji

kwantowych występujących w nadcieczkach. Szczególną uwagę poświęcił fermionom, z nadzieją na głębsze zrozumienie procesów zachodzących wewnątrz gwiazd neutronowych.

„Numeryczne symulacje układów kwantowych stanowią cały czas wyzwanie dla techniki. Dotyczy to głównie układów zbudowanych z cząstek, dla których obowiązuje zasada Pauliego. Zabrania ona dwóm fermionom zajmowania tego samego stanu kwantowego. Aby zrozumieć zachowanie się całego układu, należy śledzić zatem wszystkie stany kwantowe” – wyjaśnił naukowiec w materiale prasowym.

Przyznał, że wygenerowane w ten sposób znaczne zapotrzebowanie obliczeniowe, było wąskim gardłem dla badaczy w tej dziedzinie.

„W ramach grantu pilotażowego udało się wykonać symulację układów kwantowych, gdzie liczba rozważanych cząstek sięgała setki tysięcy. Dopiero tak duże układy dają szansę na zrozumienie właściwości układów nadciekłych i warunków, w których przepływy zmieniają charakter z laminarnego na turbulentny, co jest niezbędne w kontekście przyszłych zastosowań” – ocenił fizyk. (PAP)

Koleje dużych prędkości – aspekt poznawczy i edukacyjny

Transport jest nierozzerwalnie związany z rozwojem cywilizacyjnym, a ludzie, aby się przemieszczać na długich trasach potrzebują coraz szybszych środków transportu. Koleje dużych prędkości (w skrócie KDP), jak poprawnie powinny być nazywane opisywane w mediach „szybkie koleje”, stają się konkurencją dla transportu samochodowego, a także lotniczego. Ich atutami oprócz znacznego skrócenia czasu podróży, są jeszcze bezpieczeństwo jazdy oraz komfort podróżowania.

Edward Rydygier

Niestety, w programach szkolnych zredukowane zostały treści nauczania związane z transportem, rodzajami napędów środków transportu, infrastrukturą kolejową i drogową czy stosowanymi paliwami. Wobec rozwoju kolei dużych prędkości koniecznym staje się powrót do nauczania o elementach transportu na lekcjach fizyki, chemii czy geografii.

Przed reformą systemu edukacji wprowadzoną przez premiera Jerzego Buzka w 2000 roku w programach nauczania 4-letnich liceów i techników, a także 8-letnich szkół podstawowych znajdowały się treści związane z transportem. Na lekcjach fizyki uczniowie poznawali budowę silników parowych, spalinowych i elektrycznych, rodzaje paliw używanych w napędach spalinowych, poznawali strukturę baterii i akumulatora, konstrukcję torów kolejowych (szczeliny w połączeniach szynowych), wykorzystanie tarcia w transporcie lądowym, podstawy napędu odrzutowego i rakietowego, a nawet atomowego. Na lekcjach chemii nauczano o składzie chemicznym paliw kopalnych. Na zajęciach technicznych w szkołach średnich uczniowie poznawali podstawy motoryzacji.

Ponieważ rozwój kolei szybkich jest zaawansowany na świecie i w Unii Europejskiej, więc także nasz kraj musi się dostosować do tych nowoczesnych trendów komuni-

kacyjnych. Tymczasem nauczyciele, aby przekazać uczniom wiedzę o nowoczesnym transporcie nie mają źródeł rzetelnej wiedzy o konieczności rozwoju kolei dużych prędkości. Trochę na te tematy próbują pisać czasopisma popularnonaukowe, ale raczej w kontekście światowym, gdyż nie chcą wchodzić w zagadnienia polityczne (niestety polityka rządowa rzutuje na rozwój transportu i na pozyskiwanie funduszy zagranicznych na kosztowne inwestycje infrastrukturalne).

Media często podają ciekawostki dotyczące alternatywnego transportu kolejowego, jak superszybkie pociągi na poduszce magnetycznej, pojazdy mknące w specjalnych tunelach, zamiast rozpowszechniać wiedzę o szynowych pociągach dużych prędkości. W mediach nie jest przytaczana krytyka podróżnych korzystających z polskich pociągów dużych prędkości, chodzi tu o niedostosowanie peronów do wchodzenia do wagonów, sposób przechowywania bagażu. Mało się mówi o awariach i katastrofach na trasach, gdzie jeżdżą szybkie pociągi. Dlatego celowym jest przedstawienie czytelnikom „Fizyki w Szkole z Astronomią” rzetelnej wiedzy o transporcie kolejami dużych prędkości, szczególnie w Polsce.

Czym są koleje dużych prędkości?

Szybkie pociągi fachowo nazywane są „kolejami dużych prędkości” (KDP), co oznacza system kolejowych

przewozów pasażerskich charakteryzujący się znacznie większą prędkością handlową pociągów niż pozostałe rodzaje przewozów. Prędkość handlowa to iloraz odległości dzielącej punkt początkowy i końcowy trasy pokonywanej przez środek transportu oraz czasu, w jakim ta trasa została przebyta.

Prędkość handlowa jest zależna od prędkości, z jaką porusza się środek transportu, jak również od czasu postoju na przystankach pośrednich, warunków ruchu (np. korki uliczne). Prędkość handlowa jest parametrem pozwalającym realnie ocenić szybkość zapewnianą przez dany środek transportu.

Termin KDP odnosi się nie tylko do taboru, ale do całości usługi transportowej i związanej z nią infrastruktury. Zatem do funkcjonowania kolei dużych prędkości niezbędne są nie tylko pociągi o dużych prędkościach, ale przede wszystkim specjalne linie kolejowe, a także dworce kolejowe oraz odrębne systemy biletowe.

Dlaczego budowane są koleje dużych prędkości?

Ograniczeniem transportu pasażerskiego opartego na autostradach i portach lotniczych jest tzw. kongestia systemów transportowych, co oznacza nasycenie ruchu na drogach i lotniczych trasach transportowych. W wielu miastach na autostradach tworzą się korki drogowe w godzinach szczytu. Podobnie jest w przypadku portów lotniczych, które często działają na granicy maksymalnej przepustowości.

Konkurencja KDP wobec transportu samochodowego polega na możliwości przewiezienia bardzo dużej liczby pasażerów z większymi prędkościami niż pozwalają na to samochody, przy uniknięciu zatorów drogowych. Przewaga KDP nad transportem samochodowym polega głównie na większym bezpieczeństwie oraz możliwości uzyskania dużo większej prędkości przejazdu na wybranych trasach.

Dla podróży, dla których punktem startowym i docelowym nie są okolice dworców kolejowych czas ten staje się porównywalny z samochodem (bez uwzględnienia czasu związanego ze znalezieniem miejsca do zaparkowania i samym parkowaniem oraz przy założeniu braku lub najwyżej obecności niewielkich korków drogowych), co jest argumentem często podnoszonym przez krytyków kolei dużych prędkości. Niemniej podróż koleją jest uważana za wygodniejszą niż samochodem oraz bardziej produktywną dla pasażerów, którzy nie muszą skupiać uwagi na prowadzeniu samochodu i mogą wykorzystać ten czas na inne zajęcia.

Jeśli chodzi o transport lotniczy to prędkości osiągane przez współczesne odrzutowce pasażerskie są z reguły ok. trzykrotnie wyższe niż te, z jakimi poruszają się składy pociągów dużych prędkości, lecz przypadku podróży na trasach rzędu 400-800 km, czas podróży samolotem i pociągiem jest zwykle porównywalny. Składają się na to dwa główne czynniki:

- położenie lotnisk, które są zwykle zlokalizowane w znacznym oddaleniu od centrów miast, co wymaga uwzględnienia czasu na dojazd do nich,
- procedura wsiadania i wysiadania, odnośnie pociągu jest dużo prostsza i zajmuje mniej czasu niż odprawa



Rys. 1. Pociąg Pendolino. Źródło: wikimediacommons

pasażerów samolotu (zwłaszcza w warunkach obecnego zaostrzenia procedur bezpieczeństwa).

Budowa kolei dużych prędkości ma uzasadnienie w relacjach, w których istnieje bardzo duży popyt na przejazdy pasażerskie (powyżej 5 mln osób rocznie), a odległości największej liczby przejazdów zamykają się w przedziale 200-800 km.

Na świecie najbardziej rozbudowane systemy kolei dużych prędkości funkcjonują w Chinach, Japonii, Niemczech, Hiszpanii, Włoszech, Wielkiej Brytanii i Korei Południowej.

Charakterystyka kolei dużych prędkości

Kryterium uznania kolei za kolej dużej prędkości jest prędkość handlowa pociągów. Jest ona różna w różnych krajach. Według UIC (fr. *Union Internationale des Chemins de fer* – Międzynarodowy Związek Kolei) organizacji zrzeszającej przedsiębiorstwa zajmujące się transportem kolejowym i reprezentującej je na arenie międzynarodowej, jest to kolej osiągająca prędkość powyżej 250 km/h.

W Unii Europejskiej kryteria zaliczenia do kolei dużych prędkości zostały określone w Załączniku I do dyrektywy Rady 96/48 z dnia 23 lipca 1996 r. w sprawie interoperacyjności transeuropejskiego systemu kolei dużych prędkości:

- jako linie zbudowane specjalnie dla dużych prędkości, pozwalające na osiąganie prędkości równej lub większej niż 250 km/h (i odpowiadający temu wymogowi tabor),
- jako linie o standardzie dostosowanym do dużych prędkości, pozwalające na osiąganie prędkości rzędu 200 km/h (i odpowiadający temu wymogowi tabor),
- jako linie o standardzie dostosowanym do dużych prędkości, które mają szczególne cechy będące rezultatem ograniczeń topograficznych lub planowania przestrzennego miast, na których prędkość musi być dostosowana do warunków (a tabor jak przy największej możliwej prędkości na pozostałych liniach).

W innych krajach na świecie przyjmowane są niższe progi prędkości kwalifikujące linię do kategorii kolei dużych prędkości, np. w USA wynosi ona według *Federal*

Railroad Administration od 110 mph (177 km/h) do 150 mph (241 km/h).

Obowiązujący rekord prędkości pociągu konwencjonalnego poruszającego się po szynach wynosi 574,8 km/h, a został uzyskany przez testowy zespół trakcyjny TGV V150 3 kwietnia 2007 we Francji. Składy TGV *Sud-Est* produkowane w latach 1978-1983, które łączyły Paryż z Lyonem, osiągają obecnie prędkość 300 km/h, ale TGV na innych trasach osiągną nawet 320 km/h. Szybsze są pociągi na poduszce magnetycznej, pociąg tego typu zwany *Maglev* osiągnął światowy rekord prędkości wynoszący 603 km/h.

Historia budowy kolei dużych prędkości

Do czasu upowszechnienia się transportu samochodowego w latach 20. XX w. kolei była pierwszym efektywnym środkiem masowego transportu lądowego. Rozbudowa infrastruktury drogowej po II wojnie światowej spowodowała, że transport samochodowy stał się wydajnym środkiem komunikacyjnym, transport kolejowy, szczególnie pasażerski, stracił na znaczeniu. W szczególności załamanie przeżyła kolej pasażerska w USA, gdzie władze federalne wspierały rozwój transportu lotniczego kosztem transportu kolejowego. Jednak transport samochodowy mimo posiadania wielu zalet, nie jest jednak rozwiązaniem zapewniającym wysoką prędkość podróży na odległościach rzędu 300-1000 km, szczególnie w obszarach silnie zurbanizowanych. Dlatego zaczęto rozwijać środki transportu szynowego ukierunkowane na zwiększenie ich prędkości.

Pierwsza kolej dużej prędkości, we współczesnym znaczeniu tego określenia, powstała w Japonii w 1964 r. Do tego czasu prędkości normalnych pociągów nie przekraczały 160 km/h. Pociągi klasy *Shinkansen* serii 0, zbudowane przez firmę Kawasaki Heavy Industries osiągały prędkości rzędu 210 km/h na trasie Tokio – Nagoja – Kioto – Osaka.

Japońskie doświadczenia stały się inspiracją dla kolei francuskich. Francuzi jako pierwsi w Europie uruchomili w 1967 roku pociąg dużej prędkości *Le Capitole* jeżdżący z prędkością 200 km/h między Paryżem i Tulużą. Był to zwykły elektrowóz z klasycznymi wagonami pasażerskimi. We Włoszech w 1976 roku uruchomiono pociąg *Pendolino* jeżdżący z prędkością 200 km/h.

We Francji, gdzie prowadzono doświadczenia nad wieloma metodami szybkiego transportu, ostatecznie zdecydowano się na budowę sieci kolei dużych prędkości w oparciu o tradycyjną technikę kolejową wykorzystującą nowo wybudowane linie kolejowe i zespoły trakcyjne o specjalnej konstrukcji. Pierwszy pociąg TGV wyruszył na trasę Paryż – Lyon w 1981 roku z prędkością 260 km/h. W kolejnych latach prędkość była stopniowo podwyższana aż do osiągnięcia aktualnej prędkości pociągów pasażerskich TGV wynoszącej 320 km/h.

Od tego czasu kolejne kraje wdrażały systemy kolei dużych prędkości oparte na produktach krajowego przemysłu lub pozyskanej technologii. Obecnie koleje dużych prędkości funkcjonują w wielu krajach Europy i Azji, nadal projektowane są nowe linie kolei dużych prędkości.

Pomimo przewagi elektrowozów w światowych systemach kolei dużych prędkości niektóre kraje takie jak Wielka Brytania (od 1976 r.) oraz USA (od 2018 r.) stosunkowo od dawna używają lokomotyw spalinowych jeżdżących z prędkością 201 km/h.

Podsumowując można powiedzieć, że koleje dużych prędkości rozwijane początkowo jako metoda walki o pasażerów z transportem lotniczym i samochodowym, odniosły niezaprzeczalny sukces jako nowoczesny, ekologiczny, wygodny i bezpieczny środek transportu.

Koleje dużych prędkości na świecie

Od początku połączenia z wykorzystaniem kolei dużych prędkości służą głównie do transportu między centrami wielkich miast, takimi jak Paryż – Lyon (Francja),



Rys. 2. Pierwsze japońskie pociągi Shinkansen łączyły Tokio z Osaką przed letnią olimpiadą w 1964 r. Foto - Dremastime



Rys. 3. Pociąg KDP Trenitalia „Frecciarossa”. Źródło: wikimediacommons

Tokio – Osaka (Japonia) czy Berlin – Frankfurt nad Menem. W USA jedyną istniejącą obecnie trasą KDP jest *Northeast Corridor* (Boston – Nowy Jork – Waszyngton), w planach jest budowa wielu nowych linii tego typu. W Chinach na dużą skalę budowę ogólnokrajowej sieci kolei dużych prędkości rozpoczęto od 2006 roku. W ciągu 5 lat (do czerwca 2011 roku) wybudowano w Chinach 9676 km linii kolei dużych prędkości, w tym 3515 km linii, na których pociągi osiągają prędkość 300 km/h bądź większą, co stawia Chiny na pierwszym miejscu na świecie.

Z ekonomicznego punktu widzenia koleje dużych prędkości są zorientowane przede wszystkim na pasażerów podróżujących w celach służbowych. Tym niemniej coraz powszechniejsze jest korzystanie z pociągów dużej prędkości przez pasażerów podróżujących w celach prywatnych, szczególnie wypoczynkowych. Dzięki relatywnie niskim cenom, często niższym niż w przypadku transportu lotniczego, pociągi stały się popularnym środkiem transportu.

Koleje dużych prędkości stały się również w wielu przypadkach czynnikiem przyspieszającym rozwój gospodarczy obszarów, do których docierają. Obecnie niektóre trasy KDP są planowane w celu połączenia obszarów wysoko rozwiniętych gospodarczo z biedniejszą prowincją, jak na przykład w Hiszpanii linia Madryt – Sewilla. W drugiej połowie 2011 roku, zaplanowano uruchomienie najszybszej konwencjonalnej linii KDP TGV *Est*, na której regularnie osiągana jest prędkość 320 km/h. We Włoszech przewoźnik Trenitalia rozwija KDP *Frecciarossa* osiągające obecnie prędkość 300 km/h.

Otwarte w 2009 r. połączenie Mediolanu z Turynem pozwala na podróż w czasie 1 godziny.

Koleje dużych prędkości w Polsce

W 2005 roku został zaprezentowany projekt kolei dużych prędkości w Polsce jako odpowiedź na potrzebę szybkiego transportu kolejowego między największymi miastami w kraju. Pierwszą linię ze stacją węzłową w pobliżu Kalisza, łączącą Warszawę, Łódź, Kalisz, Wrocław i Poznań planowano uruchomić w 2014 roku (tzw. *Linia Y*).

W 2010 roku pojawił się projekt budowy drugiej linii kolei dużych prędkości łączącej Warszawę, Płock, Włocławek, Toruń (z odgałęzieniem do Bydgoszczy, Grudziądz, Kwidzyna, Gdańska, Sopotu i Gdyni).

W 2014 roku Polskie Koleje Państwowe rozpoczęły planową jazdę pociągów pasażerskich z prędkością 200 km/h na fragmencie Centralnej Magistrali Kolejowej (w skrócie CMK, nazwa linii kolejowej nr 4).

Obecnie na większości linii kolejowej nr 4 pociągi ED250 *Pendolino*, należące do przewoźnika PKP *Intercity*, jeżdżą z prędkością maksymalną 200 km/h. Wraz z postępem prac remontowych odcinek linii nr 4 dostosowany do prędkości 200 km/h i większych, ma się wydłużyć. Uzyskanie prędkości 200 km/h jest możliwe również na fragmentach linii nr 9. Planowana jest także budowa nowych linii kolejowych dużych prędkości pod roboczą nazwą *Linia Y*.

Linia nr 4 to linia o długości 224 km łącząca Grodzisk Mazowiecki z Zawierciem. Linia otwierana była etapami w latach 1974-1977. Już podczas budowy została zelektryfikowana. 3 maja 1984 roku na tej linii wprowadzono prędkość maksymalną dla pociągów pasażerskich wynoszącą 140 km/h, 29 maja 1988 roku prędkość 160 km/h, a 14 grudnia 2014 roku prędkość 200 km/h. Geometria linii, sieć trakcyjna i nawierzchnia kolejowa są dostosowane do prędkości 250 km/h, a obiekty inżynierskie są przebudowywane dla prędkości 300 km/h.

Przekroczenie prędkości 230 km/h w normalnej eksploatacji może być jednak niemożliwe ze względu na niewystarczającą wydajność systemu zasilania elektrycznego. CMK wykorzystywana jest przede wszystkim przez pociągi łączące Warszawę z Katowicami, Krakowem i Wrocławiem. Linia CMK jest także wykorzystywana do testów taboru pod kątem maksymalnej prędkości, 24 listopada 2013 roku ustanowiono na niej rekord prędkości pociągu w Polsce wynoszący 293 km/h.

Linia kolejowa nr 9 to linia na trasie Warszawa Wschodnia – Gdańsk Główny, zelektryfikowana, dwutorowa o długości 323 km. Dzisiejsza linia nr 9 powstawała oddzielnie w zaborze rosyjskim i zaborze pruskim. Pierwszy odcinek z Gdańska do Tczewa powstał w 1852 roku. W latach 2006-2014 linia została gruntownie zmodernizowana i przystosowana do prędkości 200 km/h dla pociągów pasażerskich i 120 km/h dla pociągów towarowych przy nacisku na oś 22,5 t. Przed modernizacją na linii obowiązywała prędkość 80-120 km/h, w dniu 13 grudnia 2020 r. podniesiono maksymalną prędkość szlakową do 200 km/h. Najszybszy pociąg odcinek Warszawa Centralna – Gdańsk Główny pokonuje w czasie 2 godzin i 30 minut.

Tabor kolei dużych prędkości

30 maja 2011 roku PKP *Intercity* podpisało z firmą *Alstom Transport* umowę na dostawę 20 pociągów *Alstom EMU250 Pendolino* o maksymalnej prędkości 250 km/h. Koncern *Alstom*, który przejął włoską fabrykę produkującą pociągi *Pendolino* jest przedsięwzięciem francuskim. Umowa z 2011 roku obejmowała również budowę zaplecza technicznego i utrzymanie techniczne pociągów przez 17 lat. 14 grudnia 2014 roku pociągi *Pendolino* rozpoczęły

kursowanie w zakresie nowej kategorii pociągów *Express InterCity Premium*, obsługującej relacje łączące Warszawę z Gdynią, Katowicami, Krakowem i Wrocławiem. 13 grudnia 2015 r. wydłużono trasy części pociągów do Bielska-Białej, Gliwic i Rzeszowa, a 29 kwietnia 2016 r. jeszcze do Jeleniej Góry i Kołobrzegu. Zakupione składy nie mają wychylnych nadwozi (pudeł balansowych) typowych dla *Pendolino*.

Wcześniej starano się wyprodukować w Polsce własny tabor kolei dużych prędkości, próby rozpoczęto już na przełomie lat 60. i 70. XX w. Ze względu na brak regulacji dotyczących nazewnictwa i przedziałów wartości, prędkości od 100 do 140 km/h nazywano wówczas podwyższonymi prędkościami, od 140 do 200 km/h – dużymi prędkościami, a 200 km/h i więcej – bardzo dużymi prędkościami. Prace projektowe prowadzono w latach 1972–1975 w Ośrodku Badawczo-Rozwojowym Pojazdów Szynowych, gdzie w latach 1975–1976 opracowano dokumentację konstrukcyjną wagonu w standardzie Z2, któremu nadano typ 127A. W 1980 roku w zakładach *Pafawag* wyprodukowano dwa prototypowe egzemplarze – po jednym typu podstawowego 127A i zmodyfikowanego 127Aa.

W roku 1988 w zakładach HCP (H. Cegielski – Fabryka Pojazdów Szynowych) wykonano dwa prototypowe wagony typu 134A na prędkość 160 km/h zgodne ze standardem UIC-Z2, zaś w roku 1992 od typu 134Ab rozpoczęła się seryjna produkcja wagonów tego standardu. W latach 1996–1997 firma *Adtranz/ABB* dostarczyła PKP 50 wagonów standardu UIC-Z1 na prędkość 200 km/h. W 1996 roku w zakładach *Pafawag* wykonano wagon typu 150A w tym standardzie, a rok później w zakładach HCP od typu 152A rozpoczęto produkcję seryjną wagonów Z1.

W 1997 roku PKP rozpiisało przetarg na dostawę 16 pociągów dużych prędkości z wychylnym nadwoziem. W przetargu tym oferty złożyły firmy *Fiat*, *Ferroviana*, *Siemens* i *Adtranz*. Zwyciężyła oferta złożona przez spółkę *Adtranz*, która zaoferowała pociąg ETR460 *Pendolino*, jednak po kontroli NIK, która wykazała szereg nieprawidłowości, m.in. brak finansowania kupna i niedostatki techniczne infrastruktury kolejowej w Polsce w stosunku do możliwości pociągu, w grudniu 1999 roku przetarg unieważniono.

W połowie października 2009 roku PKP Intercity rozpoczęło eksploatację lokomotyw elektrycznych *Siemens* EuroSprinter typu ES64U4, oznaczone w Polsce serią EU44.

Lokomotywy EU44 EuroSprinter mogą rozwijać prędkość 230 km/h przy zasilaniu prądem zmiennym i 200 km/h przy prądzie stałym.

Przyszłość kolei dużych prędkości w Polsce

Komisja Europejska uznała, że kolej to najbardziej ekologiczny i przyszłościowy środek transportu. Żeby go rozwijać, potrzebne są m.in. inwestycje w koleje dużych prędkości oraz koleje w aglomeracjach. Problemem jest sposób zasilania lokomotyw pociągów dużych prędkości, gdyż w efekcie wpływa on na oszczędności ich eksploatacji. W związku z tym badano wykorzystanie w kolejnictwie napędu wodorowego. Dziś możliwe jest zasilanie wodorem pociągów stosunkowo lekkich, ale trwają pra-



Rys. 4. Lokomotywa EU44 EuroSprinter. Źródło: wikimediacommons

ce nad paliwem, które pozwoli na zastosowanie napędu wodorowego również w ciężkich lokomotywach towarowych czy w jednostkach pasażerskich przystosowanych do dużych prędkości.

Obecnie kolej dużych prędkości opiera się w zasadzie wyłącznie na pojazdach elektrycznych. Często jest traktowana jako mniej efektywna energetycznie niż kolej konwencjonalna. Jest to jednak pogląd niesłuszny, gdyż stosowane są nowoczesne pojazdy o aerodynamicznym kształcie, a także współczesne technologie infrastrukturalne i energetyczne np. krócej zasilana jest klimatyzacja, co ma znaczenie przy końcowym bilansie zużycia energii podczas przejazdu pociągu pomiędzy stacją początkową a docelową.

Istotnym, korzystnym czynnikiem eksploatacji KDP jest czas przejazdu. Obecnie pociągi *Pendolino* łączą Trójmiasto i Warszawę z aglomeracjami południowymi (Krakowem, Katowicami, Wrocławiem, Gliwicami), a także umożliwiają dojazd do miast takich jak Kołobrzeg, Bielsko-Biała, Rzeszów czy Jelenia Góra. Biorąc pod uwagę fakt, że maksymalna prędkość eksploatacyjna pojazdów ED250 wynosi 200 km/h, a za kilka lat będzie to aż 250 km/h dzięki ETCS Level 2, zatem w ciągu zaledwie 3 godzin można dojechać z centrum Warszawy do Trójmiasta. Nie ma innego środka transportu, żeby w podobnym czasie pokonać tę trasę.

Kolejnym korzystnym czynnikiem eksploatacji pociągów dużych prędkości jest komfort podróżowania. Komfort podróży jest zresztą kluczową korzyścią dla kolei dużych prędkości. W każdym pociągu *Pendolino* znajduje się łącznie 402 miejsc – 45 w klasie pierwszej i 357 w drugiej. Pasażerowie mogą korzystać z regulowanych foteli, rozkładanych stolików, indywidualnego oświetlenia, gniazdek elektrycznych przy każdym siedzeniu. Pociąg dostosowany jest do potrzeb osób z niepełnosprawnościami – posiada windę, która ułatwia wsiadanie do pociągu i wysiadanie z niego osobom poruszającym się na wózkach inwalidzkich, przystosowaną toaletę, a miejsca siedzące oznaczono alfabetem Braille’a. Do dyspozycji podróżnych są także trzy przedziały dostosowane do potrzeb

opiekunów z małymi dziećmi oraz przewijak w toalecie. W pojeździe można skorzystać ze strefy gastronomicznej, jak również ze „Strefy Ciszy”, a także najlepiej działającego w Polsce bezprzewodowego Internetu.

Ważne jest również bezpieczeństwo i pełna sprawność szybkich pociągów. Pociągi *Pendolino* od samego początku są serwisowane w Warsztacie Utrzymania Technicznego (WUT) prowadzonym przez firmę *Alstom*. Ten warsztat to najnowocześniejszy w Europie obiekt, jest zlokalizowany w Olszynie Grochowskiej w Warszawie i zajmuje teren o powierzchni 26 ha. W jego skład wchodzi hala o powierzchni 1 hektara, w której można serwisować jednocześnie pięć pociągów. WUT dysponuje także automatyczną i ekologiczną myjnią przejazdową, w której umycie jednego składu zajmuje zaledwie 12 minut. Woda wykorzystywana do mycia jest utrzymywana w obiegu zamkniętym, a w jednym cyklu można umyć nawet 10 pociągów.

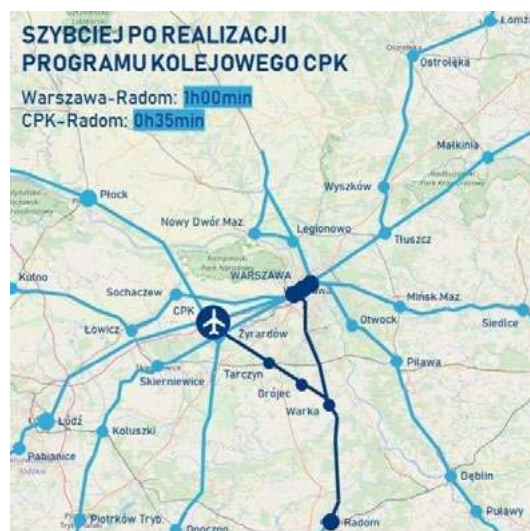
Przeglądami i serwisem pociągów zajmuje się codziennie 116 specjalistów zatrudnionych w *Alstom*. Dzięki precyzyjnie zdefiniowanym i restrykcyjnie przestrzeganim procedurom bezpieczeństwa, obecny rekord bezwypadkowości pracowników warsztatu to aż 1679 dni. Jesienią 2020 roku został uruchomiony system HealthHub TrainScanner, innowacyjne rozwiązanie z zakresu predykcyjnego utrzymania pociągów. TrainScanner służy do obsługi utrzymaniowej 20 pociągów *Pendolino* z floty operatora PKP *Intercity*.

Dzięki zautomatyzowanym rozwiązaniom gromadzącym i analizującym dane można stale doskonalić procesy w ramach utrzymania predykcyjnego, co przekłada się na bezpośrednie korzyści dla klientów i pasażerów. Dzięki cyfrowej analizie danych pozwala wskazać optymalny moment wymiany komponentów. TrainScanner wykorzystując kamery i lasery 3D umożliwia automatyczną ocenę stanu technicznego i predykcyjne utrzymanie kół, klocków hamulcowych i ślizgów węglowych do pantografów, jak również integralności elementów podwozia i poszycia składu.

Dane pozyskane z podsystemów zbierane podczas przejazdu pociągu przez TrainScanner są szczególnie przydatne w przypadku większych lub rozproszonych terytorialnie flot pojazdów oraz w sytuacji, gdy wymagany jest wysoki poziom ich dyspozycyjności. Po automatycznej kontroli dane są przesyłane do platformy Alstom HealthHub, która przy użyciu odpowiednio przygotowanych algorytmów przekształca surowe dane w przydatne informacje, prowadząc do obliczenia wskaźnika kondycji dla każdego sprawdzanego elementu.

TrainsScanner i HealthHub zapewniają znaczące korzyści zarówno w zakresie konserwacji jak i eksploatacji, przyczyniając się do niższego zużycia materiałów i mniejszej liczby wymaganych działań serwisowych, przez co przynoszą istotne oszczędności dla właścicieli i operatorów flot. System ten przyczynia się do wydłużenia interwałów utrzymaniowych, zwiększenia żywotności komponentów oraz zapewnienia większego bezpieczeństwa podczas eksploatacji.

W związku z planowanym przeniesieniem warszawskiego lotniska z Okecia pod Żyrardów i budową Cen-



Rys. 5. Połączenia kolejowe z CPK. Źródło: Materiały reklamowe spółki CPK

tralnego Portu Komunikacyjnego (CPK), planowana jest rozbudowa infrastruktury KDP tak, aby zapewnić szybki dojazd kolejowy pasażerów do portu lotniczego stolicy.

Firma *Alstom* jest zainteresowana kursowaniem pociągów *Pendolino* na trasach dojazdowych do CPK, jest też w stanie zbudować w pełni zautomatyzowany system transportu pasażerskiego INNOVIA w ramach projektu CPK oraz w największych aglomeracjach, gdzie przepustowość dróg jest już niewystarczająca.

Podsumowanie

Obecnie na świecie jeździ ok. 5 tys. szybkich pociągów, czyli zdolnych osiągnąć prędkość ponad 200 km na godzinę. Minęło już 40 lat, odkąd szybki pociąg TGV został po raz pierwszy wprowadzony na tory we Francji. Obecnie pociągi TGV we Francji osiągają maksymalną komercyjną prędkość eksploatacyjną 320 km/h.

Pociągi TGV są najszybszymi pociągami dużych prędkości na świecie, osiągnęły 3 światowe rekordy prędkości kolei, w 1981, 1990 i 2007 roku. Dwukrotnie bijąc swój poprzedni wynik, TGV w kwietniu 2007 roku osiągnął maksymalną prędkość 574.8 km/h.

Firma *Alstom* pracuje nad innowacją w zakresie szybkiej kolei, nazwaną „pociągiem przyszłości”, jaką jest pociąg dużych prędkości nowej generacji *Avelia Horizon*, który został zamówiony przez SNCF (skrót od fr. *Société nationale des chemins de fer français* – Narodowe Towarzystwo Kolei Francuskich – francuski państwowy przewoźnik kolejowy) w liczbie 100 sztuk i ma wejść do eksploatacji przed igrzyskami olimpijskimi w Paryżu w 2024 r. Pociągi te powstały w ramach partnerstwa innowacyjnego z SNCF, które jest obecnie jednym z największych przedsiębiorstw kolejowych we Francji.

Pociąg *Avelia Horizon* jest wyposażony w dwie innowacyjne, krótsze głowice napędowe, łączące wysoką wydajność i kompaktowość. Wagony pasażerskie są przegubowe i dwupoziomowe. Projekt umożliwia zwiększenie przestrzeni dla pasażerów o 20%, dzięki czemu pociąg



Rys. 6. TGV POS – najszybszy na świecie skład konwencjonalny osiągnął 574 km/h.
Źródło: Wikipedia

może pomieścić do 740 pasażerów. Koszty utrzymania będą o ponad 30% niższe od obecnych. System konserwacji pociągu jest uwzględniany już od etapu projektu, stanowi on zdalny system diagnostyczny umożliwiający konserwację predykcijną, zwiększający niezawodność i dostępność pociągu. Wiele elementów pociągu ma zoptymalizowaną konstrukcję umożliwiającą uproszczenie i ograniczenie czynności konserwacyjnych oraz wydłużenie okresów między kolejnymi konserwacjami. Dzięki swej aerodynamicznej budowie i bardziej wydajnemu napędowi trakcyjnemu, francuskie KDP nowej generacji będą zużywać o 20% mniej energii niż obecnie.

Firma *Astrom* liczy na to, że przy budowie infrastruktury kolejowej dla CPK zostanie wdrożony podobny model rozwoju innowacyjnej kolei w Polsce.

Rozwój infrastruktury dla KDP w Polsce można rozpatrywać także w aspekcie społecznym. Przy budowie nowych linii kolejowych dojazdowych do CPK w fazie początkowej trzeba pozyskać tereny pod przyszłe trasy. Spółka CPK wykupuje tereny pod infrastrukturę samego portu, jak i wzdłuż tras przyszłych pociągów KDP. Przymusowy wykup terenów pod budowę bezkolizyjnych torów natrafia na opór właścicieli, którzy nie chcą sprzedać pod przymusem swojej ziemi, a okoliczni mieszkańcy protestują obawiając się hałasu, zanieczyszczenia powietrza oraz trudności w transporcie lokalnym. Tak więc aspekt



Rys. 7. Niektóre trasy KDP są planowane w celu połączenia obszarów wysoko rozwiniętych gospodarczo z biedniejszą prowincją. Foto – Dremastime

poznawczy, edukacyjny i społeczny budowy kolei dużych prędkości w Polsce wymaga od nauczycieli pozyskania rzetelnej wiedzy o tych nowoczesnych i innowacyjnych środkach transportu tak, aby mogli ją dalej przekazać uczniom ku pożytkowi społeczeństwa.

Edward Rydygier

fizyk jądrowy, dr nauk techn.

jest aktywistą Sekcji Nauczycielskiej PTF, posiada tytuł Fizyka Europejskiego (EurPhys), doktorat uzyskał na Politechnice Radomskiej w specjalizacji transport

Od 2014 roku w Polsce jeżdżą szybkie pociągi zwane *Pendolino* (w jęz. polskim „wahadełko”), lecz obywatele nie są informowani o konieczności rozwoju tego typu środka transportu. W 2013 roku w prasie rozpowszechniono wiadomości o zakupie przez PKP szybkich pociągów *Pendolino* od włoskiego producenta w związku z konferencją prasową ówczesnego ministra transportu Sławomira Nowaka przeprowadzoną 28 maja 2013 r. Minister zachwalał zakup nowych składów jako symbol przemian na polskiej kolei, jednak nie przedstawił społeczeństwu argumentów za koniecznością rozwoju przez polskie kolejnictwo tego innowacyjnego i przyszłościowego środka transportu.

Z korzyści rozwijania kolei dużych prędkości minister podkreślił tylko skrócenie czasu podróży, podał spodziewane bardzo krótkie czasy przejazdu na takich dalekich trasach, jak Warszawa-Gdańsk (2 godz. 45 min.) czy na trasie z Warszawy do Krakowa i Katowic (2 godz. 15 min.). Poza tym w przyszłości pociągi dużych prędkości miałyby jeździć na trasie z Warszawy do Wrocławia (3 godz. 30 min.), Rzeszowa (3 godz. 45 min.), a w dalszej kolejności do Bielska-Białej i Gliwic, a nawet do Słupska.

Z szumnie zapowiadanej w prasie prędkości szybkich pociągów 350 km/h, minister uściślił rzeczywistą wartość prędkości szybkiego pociągu na torach w zakresie 160-200 km/h i wskazał na konieczność modernizacji torowisk, zamontowania nowoczesnego systemu zarządzania ruchem czy wzmocnienia sieci energetycznej. Minister poinformował też o zakupie wolniejszych składów tzw. *Pendolino II*, które miałyby jeździć z maksymalną prędkością do 160 km/h na trasie z Krakowa do Szczecina czy z Warszawy do Bydgoszczy.

We wrześniu 2021 roku jechałem takim *Pendolino II* do Bydgoszczy na 47. Zjazd Fizyków. Niektóre redakcje podały rzeczywiste przyczyny obniżenia prędkości pociągów *Pendolino* na trasach w Polsce. Otóż pociągi *Pendolino*, aby osiągnąć prędkość 300 km/h i większą (obecnie na świecie prędkość kolei dużych prędkości to maksymalnie 320 km/h) muszą być wyposażone w wysuwane na boki pudła służące do balastowania na łukach, gdzie działa na pociąg siła odśrodkowa zdolna do spowodowania wykoślenia pociągu. Bez tego balastu pociągi nie mogą rozwinąć prędkości 300 km/h na całej trasie. Już zdarzały się obecnie katastrofy kolejowe w Polsce z udziałem pociągów *Pendolino*, bo maszynista zapomniał zwolnić na łuku toru jadąc z prędkością 200 km/h.

Fizyka nowotworów

Foto – Dreamstime

Ewelina Kędzierska

Każdy z nas zapewne zna kogoś, kto chorował lub choruje na nowotwór. Ta koszmarna diagnoza stała się plagą ostatnich lat. Pomimo takiego stanu rzeczy ich wykrywalność nie należy do najwyższych, a wielu chorych umiera. Czy można coś zrobić, by poprawić statystyki? I czy pismo poświęcone fizyce to dobre miejsce, by o tym wspominać? Okazuje się, że tak. Bez fizyków trudno byłoby w ogóle mówić nie tylko o wykryciu, ale i leczeniu tej choroby. W największych ośrodkach jądrowych w Polsce (na przykład w Narodowym Centrum Badań Jądrowych) czy na świecie (np. CERN) naukowcy zastanawiają się, jak wykorzystywać rozprędkowane cząstki i antycząstki do zwalczania skutków nowotworów. W Narodowym Instytucie Onkologii im. Marii Skłodowskiej-Curie pokój fizyków stanowi strategiczne miejsce – bo to właśnie tam odbywa się kluczowy etap leczenia – jego planowanie. Tam podejmowane są najważniejsze decyzje dotyczące przyszłości pacjentów.

Rozwój i charakterystyka nowotworów

Komórki biologiczne są naturalnie zaprogramowane do apoptozy, czyli ich naturalnego usunięcia w przypadku uszkodzeń, nieprawidłowości czy po prostu – mówiąc krótko – zużycia. Czasem zdarza się jednak, że komórka wymyka się z genetycznej kontroli pod wpływem różnych czynników – zarówno wewnętrznych jak i zewnętrznych – na przykład narażenia na działanie niektórych związków chemicznych lub promieniowanie jonizujące. Niesie to za sobą procesy zaburzające prawidłowy podział komórkowy. Następuje wówczas lawinowy wzrost liczby niepra-

widłowych komórek, które tworzą masę guzową zajmującą tkanki. Taka sytuacja to właśnie nowotwór.

Nowotwory, nie dość że naciekają i niszczą okoliczne tkanki, to bardzo szybko się rozwijają. Do tego cechuje je zdolność do przerzutów do odległych narządów. Mogą mieć różne postacie i kształty. Zasadniczo mówi się o ich łagodnych i złośliwych odmianach. Łagodny guz nie prowadzi do powstawania przerzutów. Jego kształt jest regularny, do tego ma określoną granicę i jest prawidłowo unaczyniony. Guz złośliwy charakteryzuje się nieregularnym kształtem, nieprawidłowym unaczynieniem oraz tym, że stopniowo niszczy cały organizm.

Leczenie nowotworów

Mimo że każdy nowotwór wymaga indywidualnego podejścia, to cel leczenia jest jeden – usunięcie z organizmu wszystkich nieprawidłowych komórek. Wśród metod leczenia wymienić można operację chirurgiczną (wycięcie guza wraz z okolicznymi tkankami), chemioterapię (doustne lub dożylnie podanie leków) i radioterapię (naświetlanie guza dużą dawką promieniowania), którą można jeszcze podzielić na teleradioterapię (źródło promieniowania znajduje się na zewnątrz organizmu) oraz brachyterapię (źródło znajduje się w bezpośrednim kontakcie z guzem). Zazwyczaj metody te są ze sobą łączone. Najpopularniejszą i najczęściej wykorzystywaną jest radioterapia. I to jest właśnie „działka” fizyków. Należy tak dobrać rodzaj promieniowania, geometrię (kąty wejścia wiązek w przypadku technik 3D i IMRT lub zakresu łuku w przypadku techniki VMAT) oraz jego energię, by przy jak największym napromienianiu komórek nowotworowych zadbać o jak najmniejsze uszkodzenie zdrowych tkanek. Rolą fizyków jest także pomiar dozymetryczny

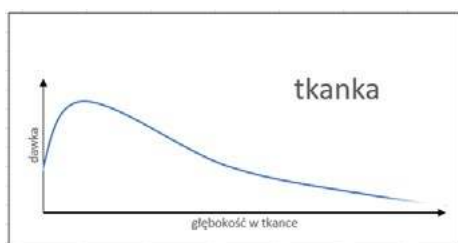
planu, czyli sprawdzenie na akceleratorze zgodność podanej dawki z planem. W Polsce do radioterapii stosuje się fotony, a także – od 2015 roku – wiązki protonów (Centrum Cyklotronowe Bronowice).

Terapia wiązką protonów (ang. *Proton Beam Therapy*) – jeden z najlepiej rozwijających się trendów w medycynie – umożliwia uzyskiwanie lepszych wyników klinicznych w porównaniu do konwencjonalnych źródeł promieniowania, a także pozwala na obniżenie kosztów leczenia. Mimo to nie jest powszechnie stosowana. Dlaczego? Przyjrzyjmy się temu dokładniej.

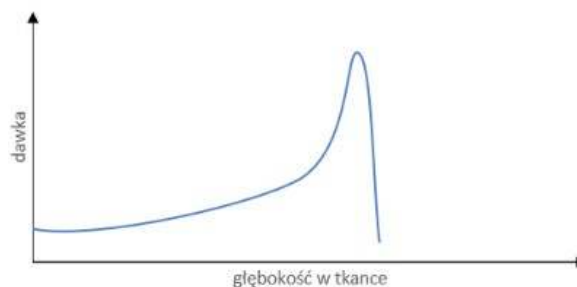
Zasada terapii protonowej i jej porównanie z napromieniowaniem fotonami

W 1895 roku Wilhelm Conrad Röntgen odkrył promieniowanie X, za które otrzymał w 1901 roku Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki. Wydarzenie to zapoczątkowało wykorzystywanie promieniowania w medycynie. I chociaż na początku nie zdawano sobie sprawy z tego, jak wiele złego może pociągnąć za sobą jego niewłaściwe zastosowanie, to z biegiem lat i wraz z rozwojem nauki ludzie stawali się coraz bardziej świadomi i wykorzystywali je z rozważą. Radioterapeutyczne napromieniowanie pacjentów ma na celu jonizację atomów budujących tkanki, a w konsekwencji niszczenie złośliwych komórek. Współcześnie wykorzystuje się do tego promieniowanie hamowania, które powstają poprzez zderzenie przyspieszonych w akceleratorach elektronów z tarczą konwersji, która jest zbudowana z materiału o dużej gęstości np. wolframu, a także emitowane z radioizotopów promieniowanie gamma.

Komórki nowotworowe nie są w organizmie odosobnionym tworem – dookoła nich znajdują się tkanki zdrowe, które w trakcie radioterapii są narażone na uszkodzenie. W przypadku zastosowania fotonów dawka promieniowania będzie malała wraz z głębokością w tkankę, dlatego komórki znajdujące się pod skórą będą najbardziej narażone na uszkodzenia [Rys. 1]. Z tego też względu stosuje się m.in. IMRT (ang. *Intensity-Modulated Radiation Therapy*). Na drodze wiązki umieszcza się kolimatory w postaci poruszających się podczas napromienienia listków, które – przykrywając różne części pola napromienienia – pozwalają modulować intensywność promieniowania. IMRT można podzielić na dwie metody: *step and shoot* oraz *sliding window*. Pierwsza z nich polega na nakładaniu w tej samej lokalizacji kolejnych pól o złożonych kształtach w celu osiągnięcia pożądanej modulacji natężenia. W trakcie ruchu listków promieniowanie nie jest emitowane, więc jest to metoda statyczna.



Rys. 1. Wykres zależności dawki pochłoniętej od głębokości w tkance dla fotonów. [3]



Rys. 2. Wykres zależności dawki pochłoniętej od głębokości w tkance dla protonów. [3]

Druga zalicza się już do metod dynamicznych – w trakcie napromieniowania zmienia się jeden z parametrów, które kształtuje wiązkę. W przypadku *sliding window* parametrem jest pozycja listków MLC.

W większości przypadków ten typ promieniowania wystarcza, by pomóc pacjentowi. Jeśli nowotwór usytuowany jest w pobliżu narządów radiowrażliwych, terapia ta jest często bezradna. Rozwiązaniem może być tutaj zastosowanie protonów. Dzięki temu można zmniejszyć uszkodzenie otaczających nowotwór tkanek zdrowych, a tym samym stosować do leczenia guzów zlokalizowanych blisko ważnych narządów i struktur. Kolejną zaletą jest znaczące zmniejszenie ryzyka wystąpienia działań niepożądanych w trakcie oraz po zakończeniu leczenia, a tym samym szybszy powrót pacjentów do zdrowia. Zmniejsza się także prawdopodobieństwo wystąpienia wtórnych nowotworów złośliwych.

Protony, wnikając w tkankę, tracą stopniowo swoją energię. Na pewnej, ściśle określonej głębokości, zależnej od ich energii, strata ta staje się maksymalna, po czym zanika, gdyż protony się zatrzymują. Odpowiednio planując leczenie, można regulować głębokość, na której wystąpi maksimum dawki nazywane pikiem Bragga [Rys. 2]. I to jest właśnie podstawa terapii protonowej. Modulowanie głębokości jest możliwe dzięki przepuszczeniu wiązki poprzez cienką płytkę z pleksiglasu. Zmieniając grubość płytki, możemy dostosowywać szerokość piku Bragga dla każdego pacjenta indywidualnie.

Porównując obie terapie, możemy zauważyć, że protony niszczą tkankę tylko w wybranym obszarze. Można zatem tak dopasować parametry wiązki, żeby zniszczyć komórki nowotworowe, a także zachować tkankę zdrową wokół guza, co daje protonom ogromną przewagę nad fotonami.

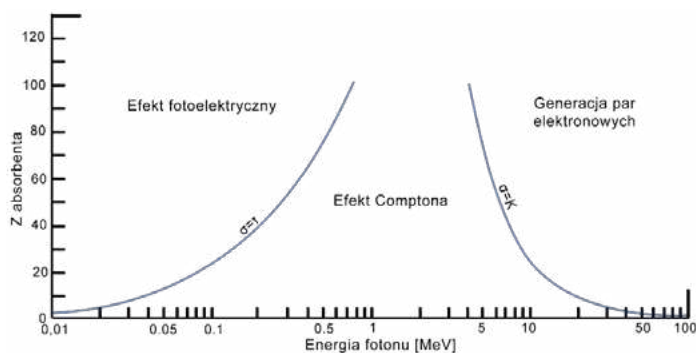
Szczegółowy opis fizyczny

Jak wiadomo, fotony mogą oddziaływać z materią poprzez jedno ze zjawisk fizycznych:

- efekt fotoelektryczny i rozproszenie Rayleigh'a (z całym atomem),
- efekt Comptona (z pojedynczym elektronem w atomie),
- generację par elektronowych (w polu jądra atomowego),
- rzadsze zjawiska takie jak wywołane przez fotony reakcje jądrowe.

Prawdopodobieństwo ich wystąpienia ukazuje Rys. 3.

Gdy przez materię przechodzą ciężkie cząstki (wszystkie cząstki naładowane oprócz elektronu i pozytonu), posiadające ładunek elektryczny i charakteryzujące się masą dużo większą od masy elektronu, zachodzą inne procesy



Rys. 3. Wykres obrazujący prawdopodobieństwo wystąpienia oddziaływań. [3]

fizyczne. Są to przede wszystkim oddziaływania polem elektrycznym na elektrony atomów ośrodka powodujące jonizację. Cząstki ciężkie oddziałują z elektronami orbitalnymi i jądrami atomowymi ośrodka poprzez oddziaływania kulombowskie. Mamy wówczas do czynienia ze zderzeniami.

Podczas zderzeń cząstek naładowanych z elektronami w atomach energia tracona przez cząstkę naładowaną zostaje przekazana elektronom orbitalnym. Atomy ośrodka ulegają wówczas jonizacji lub wzbudzeniu. Natomiast przy zderzeniach elektronów z jądrami atomowymi energia elektronu może zostać przekształcona w energię kwantu promieniowania X i wypromieniowana w postaci fotonu o energii równej tej, którą utracił padający elektron. Proces ten może zachodzić również dla ciężkich cząstek naładowanych, ale tylko przy bardzo dużych energiach.

Oddziaływanie cząstki naładowanej z materią opisuje parametr nazwany LET (ang. *Linear Energy Transfer*). Określa on ilość energii promieniowania jonizującego absorbowaną na jednostkowej drodze.

Straty energii cząstki hamowanej na jonizację ośrodka można opisać formułą Bethe-Bloch'a, określającą straty energii kinetycznej cząstki naładowanej przy przechodzeniu przez ośrodek materialny, spowodowane jonizacją atomów ośrodka:

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi N_A Z \rho}{A m_e c^2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{z^2}{\beta^2} \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \beta^2 T_{\max}}{(1-\beta^2) I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta}{2} \right],$$

gdzie:

- $-\frac{dE}{dx}$ – strata energii cząstki na jednostkę przebytej odległości,
- N_A – liczba Avogadro,
- Z – liczba atomowa,
- ρ – gęstość ośrodka,
- A – liczba masowa atomów ośrodka,
- m_e – masa elektronu,
- e – ładunek elektryczny elektronu,
- z – ładunek cząstki w jednostkach e (ładunek cząstki $q = ze$),
- β – prędkość cząstki w jednostkach prędkości światła ($\beta = \frac{v}{c}$),

ϵ_0 – przenikalność elektryczna próżni,

$T_{\max}$ – maksymalna energia kinetyczna, jaka może być przekazana elektronowi w pojedynczym zderzeniu

$$T_{\max} = \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2}{1 + \frac{2\gamma m_e}{M} + \left(\frac{m_e}{M} \right)^2},$$

gdzie

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}} \text{ – czynnik relatywistyczny,}$$

M – masa cząstki,

I – średnia energia jonizacji [eV],

$\frac{\delta}{2}$ – poprawka na gęstość pola istotna przy wyższych energiach.

Na podstawie formuły Bethe-Bloch'a można wyznaczyć krzywą opisującą liczbę cząstek w zależności od przebytej drogi w absorbencie [Rys. 4].

Średni zasięg cząstek ciężkich w danym ośrodku jest równy średniej długości przebiegu. Zasięg projekcji R' równy jest zaś grubości warstwy materiału, przez którą przejdzie połowa cząstek z równoległej wiązki.

Dodatkowo wielkością charakteryzującą proces spowalniania cząstek naładowanych w danym ośrodku jest zdolność hamowania S zdefiniowana jako strata energii (dE) na jednostkę drogi (dx) oraz masowa zdolność hamowania:

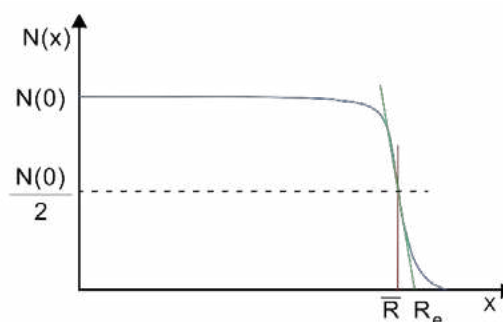
$$\frac{S}{\rho} = -\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} \left[\frac{\text{MeV} \cdot \text{cm}^2}{\text{g}} \right].$$

Należy również wspomnieć, że ze zdolnością hamowania powiązana jest liniowa gęstość jonizacji:

$$J = \frac{\Delta I}{\Delta x} = \frac{1}{W} \frac{\Delta E}{\Delta x},$$

gdzie ΔI to liczba par jonów wytworzona na odcinku Δx , zaś W – średnia energia potrzebna na wytworzenie pary jonów. Zależność liniowej gęstości jonizacji (lub dawki) od odległości od źródła (lub granicy ośrodka) nosi nazwę krzywej Bragga.

Pik Bragga jest bardzo wąski. W celu naświetlenia całego guza nowotworowego konieczne jest więc jego rozszerzenie. Dokonuje się tego poprzez superpozycję pików Bragga wiązek o różnych energiach. Obszar płaski utwo-



Rys. 4. Wykres obrazujący liczbę cząstek w zależności od głębokości w absorbencie. [5]



rzony ze złożenia wielu pików Bragga określany jest mianem SOBP (ang. *Spread-Out Bragg Peak*).

Przebieg terapii i wynikające z niego problemy techniczne

Do przyspieszania protonów służą akceleratory, czyli urządzenia (zwane przez fizyków „maszynami”), które rozpędzają cząstki naładowane, formując z nich wiązki o określonym kierunku, zbieżności i energii. Cząstki te przyspieszane są po orbitach kołowych, co jest możliwe dzięki zastosowaniu pola magnetycznego. W polu tym znajduje się komora akceleracji, w której łukiem elektrycznym jonizuje się wodór, wytwarzając w ten sposób protony. Zmienne pole elektryczne powoduje rozpędzenie cząstek do bardzo dużych prędkości. Następnie cząstki przez jonowód opuszczają akcelerator i trafiają do szatera medycznego, otwieranego i zamykanego przez osoby prowadzące terapię. Kolejnym krokiem jest uformowanie wiązki w zależności od indywidualnych potrzeb pacjenta. Można tego dokonać na przykład poprzez umieszczenie folii tantalowej na drodze wiązki. Spowoduje to jej poszerzenie. Ostatecznie wiązka dociera do pomieszczenia, w którym prowadzona jest terapia pacjentów.

Aby móc w pełni wykorzystać możliwości terapii protonowej, trzeba najpierw właściwie zaplanować ekspozycję pacjenta na promieniowanie. By tego dokonać, konieczne jest zebranie informacji o dokładnej lokalizacji tkanek nowotworowych, m.in. poprzez zastosowanie rentgenowskiej tomografii komputerowej (CT). W czasie badania pacjent leży nieruchomo z założoną na głowę specjalną maską z perforowanego termoplastiku, zapewniającą jednakowe ułożenie głowy pacjenta podczas kolejnych sesji napromieniowania. Następnie wyniki są przesyłane do komputera, który pozwala na obliczenie najlepszych parametrów naświetlania. Wykonywane są również symulacje przebiegu terapii.

Po zakończeniu pozycjonowania pacjent umieszczany jest przed jonowodem, z którego ma wylecieć strumień protonów. Wiązka nie powinna być zbyt duża, dlatego na końcówkę jonowodu zakłada się kolimator.

Choć metoda wydaje się idealna, wymaga przede wszystkim dostępu do akceleratora, co jest utrudnione – przede wszystkim ze względu na wymiary urządzenia. Chociaż fizykom łatwiej byłoby przewieźć pacjenta do ośrodka jądrowego, nie w każdym przypadku jest to możliwe. Kolejnym utrudnieniem jest ciągłe monitorowanie sytuacji. Nieustannie należy dbać, by protony osiągnęły wymaganą energię oraz miały stałe natężenie. Pomiaru tych parametrów dokonuje się za pomocą fantomów w miejscu, gdzie ma się odbyć terapia. Każdego dnia przed rozpoczęciem sesji napromieniowania następuje dokładna dozymetria. Mierzone są profile wiązki oraz rozkład dawki z głębokością w fantomie. Dopiero gdy wszystko jest już dokładnie skontrolowane i precyzyjnie ustawione, można rozpocząć radioterapię.

Aktualnie w największych ośrodkach jądrowych szuka się nowych rozwiązań, które znalazłyby zastosowanie w terapii pacjentów nowotworowych. Fizycy zastanawiają się, czy można wykorzystać do tego celu ciężkie jony bądź antymaterię. Miejmy nadzieję, że te badania przyniosą wymierne rezultaty i zapoczątkują przełom w leczeniu chorób nowotworowych, które stały się plagą naszej cywilizacji.

BIBLIOGRAFIA

- [1] *Rak staje się głównym zabójcą ludzi w XXI wieku* [on-line] <https://www.rynekzdrowia.pl/Serwis-Onkologia/Rak-staje-sie-glownym-zabojca-ludzi-w-XXI-wieku,169863,1013.html> [dostęp: 06.05.2023].
- [2] *Domowa encyklopedia zdrowia Reader's Digest*. Reader's Digest. Warszawa 2007.
- [3] *Golnik N.: Wykłady do przedmiotu Wstęp do fizyki medycznej przeznaczone dla studentów Wydziału Fizyki PW*. Warszawa, 2014.
- [4] *Nowina-Konopka M.: Terapia hadronowa w Krakowie*. Kraków, 2013.
- [5] *Woźniak K.: Terapia hadronowa*. Warszawa, 2009.
- [6] *Циклотрон с регулируемой энергией для протонной терапии*. Dubna, 2004.
- [7] *Terapia protonowa – najlepsza w życiu*. [on-line] <http://www.protonowa-terapia.pl/terapia-protonowa/> [dostęp: 06.04.2023].

Żywoty fizyków

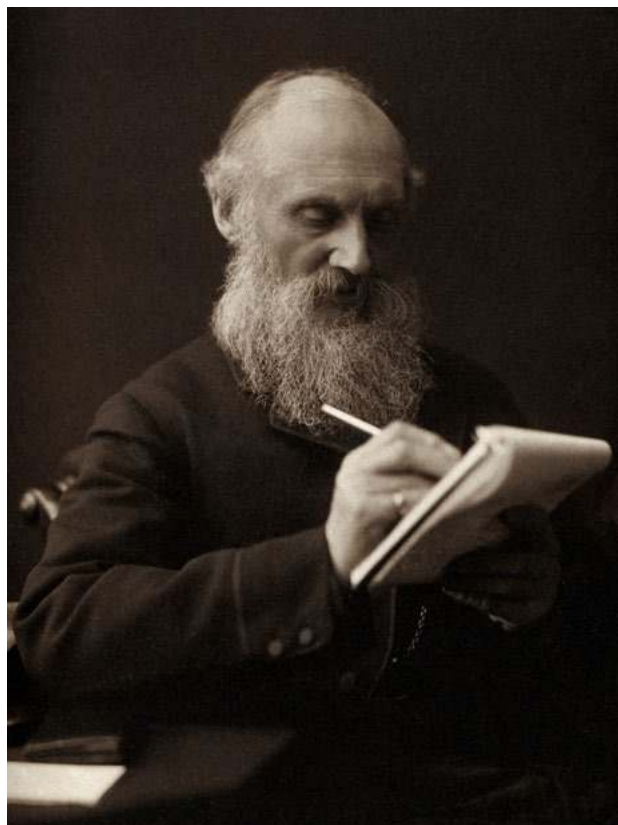
Lord Kelvin

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

Tadeusz Wibig

Lord Kelvin (1824–1907) urodził się jako Wiliam Thomson w Irlandii, ale całe niemal swoje życie związał z Uniwersytetem w Glasgow, na który najpierw uczęszczał, a potem, na którym wykładał. Wszyscy (chyba) wiedzą, że temperaturę w fizyce mierzy się w **kelwinach** i pewnie niektórzy wiedzą, że Kelvin był jednym z „ojców założycieli” nauki zwanej termodynamiką. To wszystko prawda, ale nie cała. Od tego się zaczęło i tu Wiliam Thomson zdobył sobie światową sławę i uznanie. A gdy już zdobył pieczętując to w roku 1851 swoim słynnym dziełem o przydługim tytule: „*On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr Joule's equivalent of a Thermal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam*” (*O dynamicznej teorii ciepła, z wynikami liczbowymi wyprowadzonymi z prac Joule'a nad równoważnością jednostek temperatury i obserwacjami M. Regnaulta pary wodnej*) [Transactions of the Royal Society of Edinburgh. XX (part II): 261, 289], zaczął rozglądać się nad innymi naukowymi poletkami, na których mógłby wypróbować swoje szczególne zdolności.

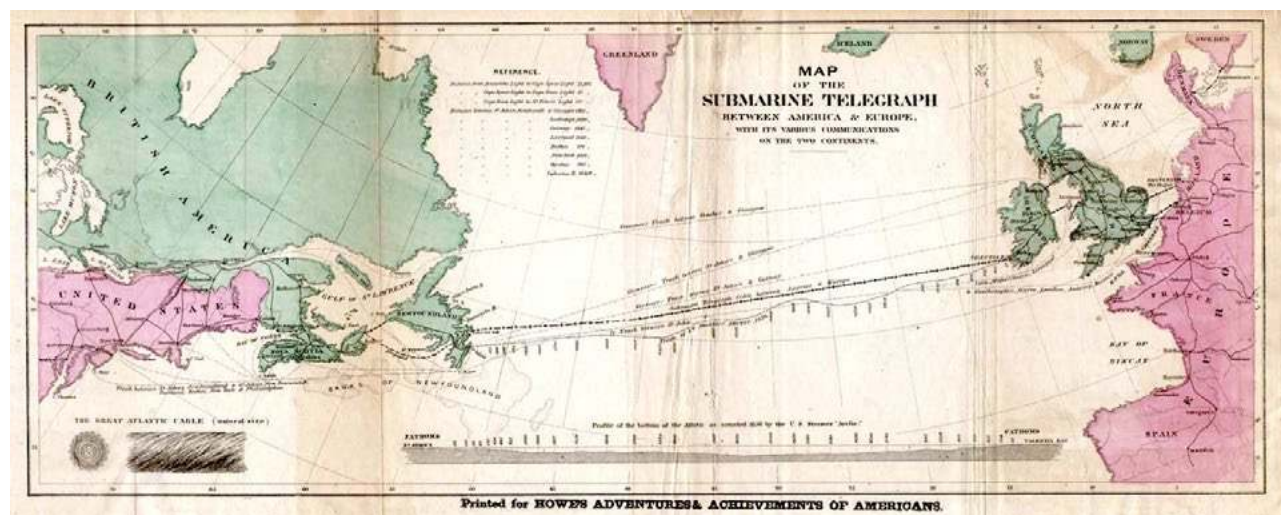
W roku 1854 otrzymał od **George'a Gabriela Stokesa**, wybitnego matematyka i znawcy przepływów¹ propozy-



cję włączenia się do prac nad koncepcją położenia na dnie Atlantyku telekomunikacyjnego kabla łączącego Stary i Nowy Świat.

Thomson dał się namówić i podszedł do problemu od strony fizycznej. Już na początku XIX wieku zauważono, że kabel zakopany w ziemi, czy też zanurzony w wodzie, zachowuje się inaczej niż zwyczajny kawałek drutu rozciągnięty na laboratoryjnym stole. Z prac Faradaya wynika, że izolowany kabel pod napięciem powoduje indukowanie się ładunków elektrycznych w ośrodku i właściwie zachowuje się jak bardzo długi kondensator. Dodanie do tego oczywiście oporności samego drutu prowadzi to do znacznego spowolnienia szybkości przesyłania sygnałów na duże odległości. Tę prędkość mierzyło się w słowach na minutę. Thomson używając nowego matematycznego

¹ - jednostka lepkości kinematycznej w układzie CGS nazywa się stokes; woda w temperaturze 20° ma lepkość ~1 cSt (centystoksa)



wynalazku, tak byśmy to dziś określili: transformata Fouriera i analogii do transportu ciepła sformułował *równanie telegraficzne*

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = RC \frac{\partial v}{\partial t}$$

i podał jego rozwiązanie znane jako *prawo kwadratów*:

$$t_{\max} = \frac{1}{2} RCx^2$$

Rozwiązanie Thomsona nie było do końca słuszne, gdyż nie uwzględnił on kilku istotnych czynników, takich jak indukcyjność kabla, upływy prądu przez izolację, ale zasadniczo miał on rację. Im grubszy drut, tym mniejszy opór R i im grubsza izolacja, tym mniejsza pojemność C , a to, jak wynikało z rachunków Thomsona (prawa kwadratów) spowoduje szybszy transfer danych.

Ale głównym inżynierem w firmie *Atlantic Telegraph Company* był wtedy Edward Orange Wildman Whitehouse, z wykształcenia lekarz, a inżynier z zamiłowania, który oczywiście wyrafinowanych rachunków Thomsona pojąć nie mógł, no i jak to się zdarza uznał, że to wszystko nie ma sensu, a jedynie podraża koszty przedsięwzięcia. Dla firmy koszty też były istotne i propozycję Thomsona zignorowano.

Szalony plan telekomunikacyjny

Thomson jako doradca naukowy projektu wypłynął na morze w 1858 roku na *HMS Agamemnon* mającym na pokładzie 1250 ton kabla Whitehouse'a. Pierwsza próba nie udała się, ale przyczyną była siła wyższa: nadszedł niezwykle silny sztorm, który trwał przez osiem dni, kabel splątał się i w końcu po prostu się urwał.

Jeszcze w tym samym roku podjęto kolejną próbę tym razem startując z obu stron Atlantyku z planem spotkania się gdzieś po drodze i tym razem ten szalony plan zakończył się sukcesem. Był to jednak sukces połowiczny. Wysłano wprawdzie pierwsze telegramy. Gratulacje od angielskiej królowej Wiktorii do prezydenta Stanów Zjednoczonych Buchanana (99 słów) transmitowano przez 16 i pół godziny i na tym zasadniczo się skończyło.

Cieńszy drut, a zatem większy opór kabli Whitehouse próbował zrekompensować stosowaniem coraz to wyższych napięć, a to doprowadziło już po trzech tygodniach do definitywnej klęski. W 1863 roku powołano specjalną komisję z Thomsonem na czele dla wyjaśnienia przyczyn

porażki i podjęcia prób rozwiązania problemu. Jej prace zaowocowały tym, że po dwóch latach Thomson ponownie wypłynął w morze, tym razem na większym okręcie *Great Eastern* wioząc 6000 ton grubszego kabla swojego pomysłu. I znowu za pierwszym razem się nie udało. Po ułożeniu prawie 2000 km kabel został stracony (ale nie do końca, jak okazało się później).

Problem łączności transatlantyckiej był jednak na tyle ważny, że w 1866 roku podjęto kolejną próbę i za czwartym w sumie razem udało się wreszcie i z pokładu *Great Eastern* popłynęła wiadomość do amerykańskiego sekretarza stanu do spraw zagranicznych: „ustanowiliśmy doskonałą łączność między Anglią i Ameryką; niech Bóg sprawi, że będzie ona trwałym źródłem korzyści dla naszego kraju”. Niedługo potem udało się wyłowić kabel, który urwał się podczas poprzedniej wyprawy i po naprawie były już dwa transatlantyckie kable. Kolejne były już tylko kwestią czasu. Problem został rozwiązany.

Pomiary pól i prądów elektrycznych

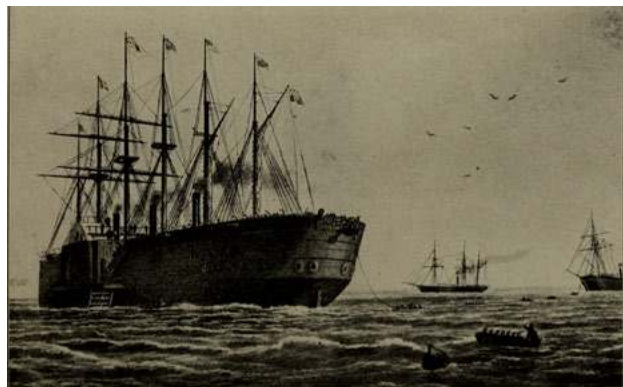
Po przygodzie telekomunikacyjnej zostało Thomsonowi doświadczenie z pomiarami niewielkich pól i prądów elektrycznych. Wynalazł i opatentował w międzyczasie galwanometr z odchylanym zwierciadłem, gdzie przepływ prądu wyznaczano obserwując zachowanie plamki światła. Wykorzystał go potem oddając się przez kilka niezwykle owocnych lat 1859-1861 roku badaniom elektryczności atmosferycznej. Zaczął od zbudowania specjalnego przyrządu mierzącego gradient pola w pobliżu powierzchni ziemi, a właściwie zbudował ich kilka. Jedną z metod pomiaru polegała na porównaniu mierzonej różnicy potencjałów ze standardem zapewnianym przez ogniwa chemiczne. O pomiarze przeprowadzonym w Aberdeen we wrześniu 1859 roku sam Thomson pisał:

„Maszt miał wysokość 3 stóp, a obserwator wraz z elektrometrem leżał na ziemi, aby zminimalizować zniekształcenia wprowadzane do układu przez samo jego własne ciało. Wynik wskazywał na różnicę potencjałów pomiędzy ziemią (naładowaną ujemnie) i powietrzem (dodatnim) równą 115 ogniwi Daniela.”
[Thomson, W. (1859) „On the necessity for incessant recording, and for simultaneous observations in different localities, to investigate atmospheric electricity”, Report of 29th Meeting, British Association for the Advancement of Science, Aberdeen, UK]

Przeliczając to na dzisiejsze miary, wychodzi, że zanotował on pionowy gradient pola o wartości 137 V/m.

Inny miernik gradientu Thomsona oparty był na obserwacji położenia punktu, w którym cienki strumyczek wody wypływający z izolowanego elektrycznie zbiornika zaczyna się rozpryskiwać na pojedyncze kropelki. Oczywiście było to trochę bardziej skomplikowane, ale, zdumiewające, działało!

Kolejny wynaleziony przez Thomsona typ miernika gradientu opierał się na obserwacji potencjału kondensatora o zmiennej geometrii, w którym jedna z okładek obracała się względem drugiej, stacjonarnej. Po połącze-



niu z galwanometrem lusterkowym i urządzeniem, w którym powoli przesuwiała się światłoczuła taśma powstało urządzenie nadające się doskonale do automatycznego i ciągłego monitorowania elektrycznego stanu atmosfery.

Marynistyczne zamiłowania Thomsona, jakie ujawniły się podczas układania kabla przez Atlantyk, doprowadziły w roku 1976 do skonstruowania kompasu okrętowego z możliwością kompensacji uwzględniającej żelazne elementy konstrukcji statku. Udoskonalił też metodę pomiaru głębokości wody pod stępką zastępując zwyczajową linę struną od fortepianu (tylko dłuższą). Można też powiedzieć, że w latach 70 XIX wieku Thomson skonstruował pierwszy analogowy komputer: maszynę do przewidywania pływów morskich.

Wiek Ziemi

Z niezwiązanych z morzem aktywności Thomsona trzeba wspomnieć o jego pracach dotyczących określenia wieku Ziemi. W młodości analizował Ziemię jako konkretną bryłę materii i jako nastolatek napisał „*Essay on the figure of the Earth*”. Później zajął się ciepłem i z połączenia tych dwóch zainteresowań po prostych rachunkach doszedł do wniosku, że Ziemia ma od 20 do 400 milionów lat. Tyle przynajmniej potrzebowałaby, żeby ostygnąć od ciała o temperaturze roztopionej lawy do sytuacji zbliżonej do tego, co mamy na jej powierzchni dziś. Tak krótki czas, w jakim na Ziemi mogło istnieć życie, zdecydowanie przeczył teorii doboru naturalnego Darwina, co Thomson stwierdził wyraźnie w roku 1969 w pracy „*Of Geological Dynamics*” [Transactions of the Geological Society of Glasgow, 1869].

Dodatkowym argumentem przeciw darwinizmowi było oszacowanie przez Thomsona czasu, w jakim Słońce mogło w przeszłości ogrzewać żyjące na Ziemi stworzenia. Ciepło Słońca zapewniły jakiś czas temu spadające nań meteoryty i wszelkie inne drobiny kosmiczne. Gorące Słońce oczywiście zupełnie zwyczajnie wypromieniowywało światło i ciepło stygnąc dość szybko i to wszystko można było policzyć. Rachunki doprowadziły Thomsona do stwierdzenia, że „wydaje się więc w sumie najbardziej prawdopodobne, że Słońce nie oświetlało ziemi przez więcej niż 100 000 000 lat, a prawie pewne jest, że nie czyniło tego przez 500 000 000 lat. Co do przyszłości, możemy z równą pewnością powiedzieć, że mieszkańcy Ziemi będą mogli cieszyć się światłem i ciepłem niezbędnym do życia przez następne wiele milionów lat, chyba że w wielkim dziele stworzenia zostały przygotowane źródła energii obecnie nam nieznane.” [“*On the Age of the Sun's Heat*”, Macmillan's Magazine, vol. 5 (March 5, 1862), pp. 388-393].

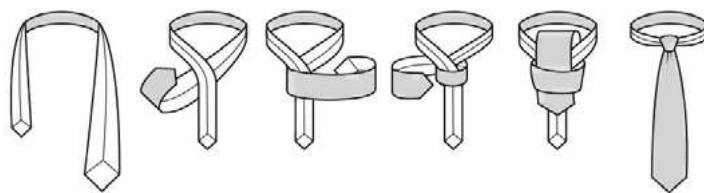
Oczywiście Thomson 150 lat temu nie mógł przewidzieć, że grawitacja spadających ciał ogrzeje materię we wnętrzu Słońca na tyle, że rozpali gigantyczny piec energii termojądrowej, który, jak wiemy dziś, pali się już od jakiś 4 miliardów lat, ale ostatnie zacytowane słowa Thomsona można interpretować jako przeczucie, przepowiednię tego, co rzeczywiście się zdarzyło ($E = mc^2$!).

Atom i węzły

Nie miał też Thomson racji próbując zbudować teorii niedawno odkrytego przez chemików atomu. Odwołał

się do swoich doświadczeń z teorii rozmaitych przepływów i do zagadkowej stabilności wirów powstających w turbulentnej cieczy. Przestrzeń, zdaniem **Hermanna Ludwiga Ferdinanda von Helmholtza**, wypełniona jest hipotetyczną substancją, którą można nazwać na przykład *eterem*. Jeśli wytworzyć w nim wir, na przykład wirujący torus, taki jak kółko z dymu papierosowego, to taki najprostszy stabilny obiekt mógłby odpowiadać atomowi wodoru. Na takich wirach można wiązać dużo i to skomplikowanych węzłów tworząc nowe jakościowo wiry, które mogą być atomami innych pierwiastków. Teorię swoją Thomson opublikował w roku 1867 [„*On Vortex Atoms*”, Proceedings of the Royal Society of Edinburgh 6, 94]. W kolejnych pracach na ten temat w pewnym sensie położył podwaliny pod rozwój dziedziny nauki zwanej dziś teorią węzłów. Znalazła ona zastosowania w zupełnie niespodziewanych obszarach ludzkiej działalności.

Na cześć Thomsona **węzłem Kelvina** nazwany został wymyślony i rozpropagowany całkiem niedawno (data jest trudna do ustalenia, ale już na pewno po śmierci Thomsona) sposób wiązania krawata. Szczegóły pokazuje rysunek:



Inne projekty i teorie

W 1893 roku Thomson stanął na czele międzynarodowej komisji, która miała podjąć decyzję w sprawie projektu budowy elektrowni nad wodospadem Niagara. Rozstrzygnięcie miało istotne znaczenie dla rozgrywanej się wtedy wojnie AC/DC. Thomson uważał, że przyszłość należy do prądu stałego Edisona, ale mimo to, nie wiedzieć dlaczego zagłosował za prądem zmiennym Tesli i Westinghouse'a.

Usłyszawszy o odkryciu w 1985 roku promieni X przez Röntgena, był przekonany, że to jakieś oszustwo. Na szczęście szybko zmienił zdanie.

Nie wierzył też w praktyczne powodzenie awiacji opartej na maszynach cięższych od powietrza.

Miał oryginalny pogląd na efekty spalania paliw kopalnych, problem, który nas ostatnio dręczy niezwykle. Thomsona nie interesowały produkty spalania (CO_2), a raczej wprost przeciwnie. Zauważył bowiem, co nie było specjalnie odkrywcze, że do spalania potrzebny jest tlen (O_2) i z tego oczywistego faktu Thomson wyciągnął niepokojące, a nawet katastroficzne wręcz wnioski: Tlen, jak wiadomo, produkują rośliny i mniej więcej wiadomo, z jaką szybkością to robią. Jeśli będziemy go spalać w przewidywalnej ilości, lub coraz szybciej, to starczy go, jak oceniał Thomson, na jakieś 400 lat [„*The Oxygen Famine*”, The Evening News, Jul 16, 1901]. Potem nie da się już rozpaść żadnego ognia. Nie będzie nawet komu próbować, nie będzie bowiem czym oddychać.

Doświadczenie domowe:**Kropelkowa maszyna elektrostatyczna lorda Kelvina****A. Potrzebne materiały**

1. Dwie metalowe puszkę poj. ~0,4 litra.
2. Puszka po jakimś napoju, niewielka 0,2 litra.
3. Pół metra drutu miedzianego o średnicy ~2 mm.
4. Cztery śrubki (średnica gwintu 2-3 mm) z nakrętkami i z osiem małych podkładek.
5. Dwie aluminiowe tacki do grillowania 20x30 cm.
6. Elektroskop (może uda się skądś pożyczyć, a jak nie, to trzeba będzie zrobić samemu, to nie jest trudne – nie będziemy tego tu opisywać!).
7. Mała neonówka.
8. Konstrukcja, jaka podtrzymywać będzie całą konstrukcję. Może to być kawałek deski opierający się na krzesłach, a może też być samo krzesło, szczegóły należy ustalić samodzielnie z zależności od możliwości.

B. Narzędzia – nożyczki, nóż, wiertarka (lub coś innego, co pozwoli uczynić w puszkach otwory dla śrubek), gwoździ o średnicy około 1 mm**C. Kolejność czynności**

1. Duże metalowe puszkę, w których przechowywano artykuły spożywcze są powleczone od wewnątrz warstwą tworzywa sztucznego, które jest izolatorem; przy użyciu noża zarysować warstwę tworzywa na dnie (od wewnątrz oczywiście).
2. W tackach metalowych zrobić gwoździem po jednym otworze (w rogu po 1 – 2 cm od brzegu).
3. Tacki zamontować na „konstrukcji” tak, aby otwory były w odległości ~ 20 – 30 cm od siebie i wystawały poza konstrukcję.
4. Pod otworami w odległości (pionowej) ~ 40 – 50 cm ustawić puszkę.
5. Spróbować nalać do tacek wody i zaobserwować, czy wycieka ona z otworów w miarę równym strumyczkiem, który rozdziela się po kilku centymetrach na pojedyncze kropelki. Jeśli tak nie jest, poszerzyć otwór, albo spróbować go zmniejszyć na tyle, aby woda wylewała się tak, jak to właśnie opisano,
6. Jeśli wszystko jest w porządku, wylać wodę z puszek i tacek. Należy starać się nie pochłapać wszystkiego wokół. Wilgotna podstawa znacznie utrudni wykonanie eksperymentu.
7. Ustawić tacki ponownie i zapewnić między nimi kontakt elektryczny.
8. Z małej, cienkiej puszkę ostrożnie wyciąć nożyczkami dwa pierścienie o szerokości około 2 – 3 cm.
9. W odległościach 1 – 2 cm od górnych (otwartych) końców puszek wykonać otwory na śrubki.
10. Takie same otwory wykonać w pierścieniach wyciętych z małej puszkę.
11. Odciąć dwa kawałki drutu odpowiedniej długości (30-40 cm, patrz rysunek).
12. Na wszystkich końcach drutów zrobić pętelki pasujące do średnicy śrubek.

13. Połączyć solidnie drutem każdą dużą puszkę i jednym pierścieniem.
14. Ustawić całość tak, jak na rysunku: odległość małych pierścieni od tacek powinna być kilkucentymetrowa, woda powinna wypływać z tacek przez małe pierścienie i wpadać do puszek. To proste.

Uwagi:

1. Należy zwrócić uwagę, by puszkę stały na suchej powierzchni. Gdyby było podejrzenie, że jest wilgotna można ustawić je na czymś, co by je dobrze od siebie izolowało.
 2. Oczywiście druty nie mogą się dotykać i powinny zachowywać pewną, możliwie dużą odległość od siebie i od puszek.
15. Jeśli mamy elektroskop podłączamy go do obu puszek (pamiętając, o ochronnej, izolacyjnej warstwie w puszkach).
 16. Jeśli nie mamy elektroskopu możemy zamiast niego po prostu ułożyć na suchej powierzchni końcówki przewodów w bardzo małej odległości od siebie (iskrownik) podłączonych do puszek i starać się zaobserwować przebiegające pomiędzy nimi iskry, ale to jest trudniejsze.
 17. Dużo lepiej widać wyładowania, jeśli połączyć za iskrownikiem szeregowo małą neonówkę.

Jeśli wszystko zadziała, a nie jest to proste, wymaga trochę cierpliwości i dokładności, zauważymy, że między dużymi puszkami pojawia się po jakimś czasie różnica potencjałów i jest ona całkiem spora. Oznacza to, że w układzie zmagazynowana jest jakaś energia. I pytanie dla dociekliwych:

Skąd się ta energia wzięła?

„Doświadczenia skutków rzeczy pod zmysły podpadających ...”

– tarcie, siła odśrodkowa i lepkość

W latach 1765-1776 r. zostało wydane w Poznaniu dzieło życia księdza Józefa Feliksa Rogalińskiego pod długim, barokowym tytułem, zaczynającym się od słów zacytowanych w tytule tego artykułu [1]. Jest to obszerna, czterotomowa praca, licząca ponad 2000 stron, uważana obecnie za pierwszy podręcznik fizyki w języku polskim.

Stanisław Bednarek

Początkowe słowa tytułu bardzo dobrze charakteryzują proces poznawczy w naukach przyrodniczych, gdzie rozstrzygające znacznie mają eksperymenty i obserwacje. Chociaż obecnie skutki tych działań są przetwarzane i rejestrowane przy użyciu coraz bardziej skomplikowanej aparatury naukowej i komputerów, to i tak w końcu oddziałują na zmysły eksperymentatorów. Celem tego artykułu jest podanie opisów kilku interesujących i łatwych do wykonania doświadczeń, których wyniki w zaskakujący sposób mogą podzielać na zmysły uczniów i nauczyciela.

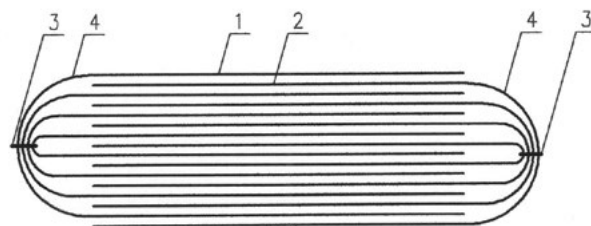
Tarcie zeszytów

Do tych doświadczeń wystarczą dwa, nawet cienkie zeszyty, o jednakowej liczbie kartek i o takim samym formacie. W przeprowadzonych eksperymentach wykorzystano dwa zeszyty szesnastokartkowe formatu A5, czyli o rozmiarach ok. 210×149 mm. Takie zeszyty są dostępne już po 95 gr. za sztukę. Można też wykorzystać zeszyty zapisane, jeżeli ich kartki nie są pogniecione.

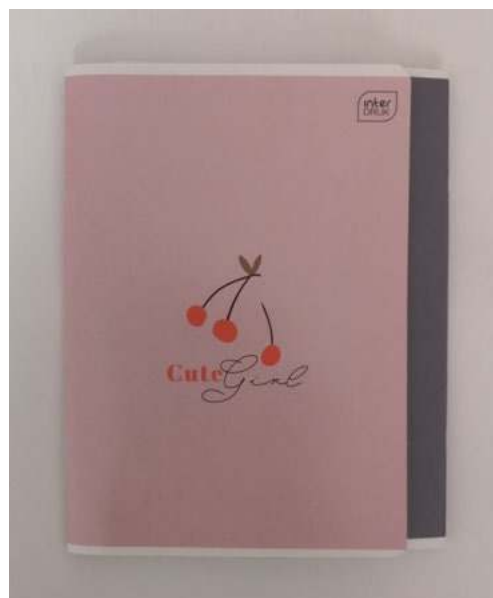
Przygotowanie zeszytów do doświadczeń polega na połączeniu dwóch zeszytów ze sobą. W tym celu kartki i okładki jednego zeszytu należy powkładać na przemian między kartki drugiego zeszytu w sposób pokazany na rys. 1. W podstawowej wersji doświadczenia kartki powinny zachodzić na siebie prawie na całą szerokość zeszytów. Tak przygotowane zeszyty przedstawia fot. 1.

Do wykonania doświadczenia potrzebne są dwie osoby. W wersji interaktywnej można zaprosić dwóch uczniów, którzy stają naprzeciw siebie. Każdy uczeń chwytając oburącz za jeden zeszyt, trzymając go płacami po stronie grzbietowej, gdzie znajdują się zszywki. Polecamy uczniom, żeby rozdzielili zeszyty, ciągnąc je każdy w swoim kierunku. Okazuje się, że mimo usilnych starań jest to niewykonalne. Do tego celu jest potrzebna bardzo duża siła, przekraczająca możliwości człowieka.

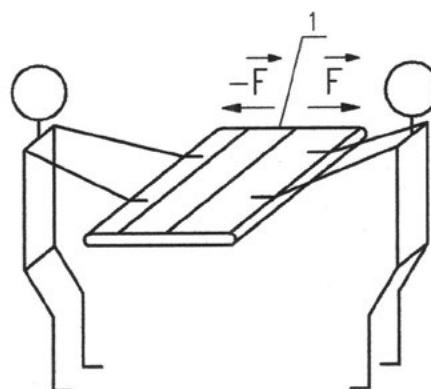
To doświadczenie należy powtórzyć w dwóch wariantach, zmieniając sposób połączenia zeszytów. W pierwszym wariantcie kartki zeszytów należy poprzekładać, podobnie jak poprzednio, ale powinny one zachodzić na siebie tylko do połowy ich szerokości (rys. 3, fot. 2). W drugim wariantcie kartki powinny zachodzić na siebie prawie na całą szerokość zeszytów, ale przekładając je należy składać razem po dwie kartki z każdego zeszytu (rys. 4).



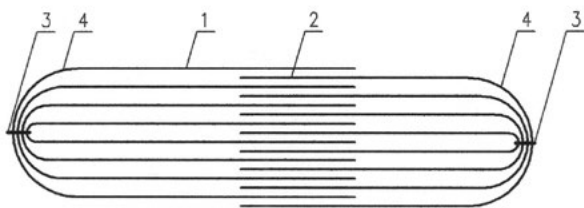
Rys. 1. Sposób poprzekładania kartek zeszytów pokazany z boku – wersja podstawowa: 1 – kartka pierwszego zeszytu, 2 – kartka drugiego zeszytu, 3 – zszywka, 4 – część grzbietowa zeszytu.



Fot. 1. Podstawowa wersja przygotowania zeszytów do doświadczeń.



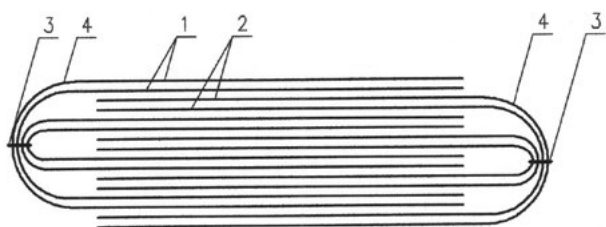
Rys. 2. Schemat doświadczenia z wyciąganiem zeszytów: 1 – zeszyty z poprzekładanymi kartkami; F – siła rozciągająca.



Rys. 3. Sposób poprzekładania kartek zeszytów pokazany z boku – wersja ze zmniejszoną powierzchnią kartek; oznaczenia cyfrowe są takie same jak na rys. 1.



Fot. 2. Przygotowanie zeszytów do doświadczeń w wersji o zmniejszonej powierzchni.



Rys. 4. Sposób poprzekładania kartek zeszytów pokazany z boku – wersja ze złożonymi wielokrotnie kartkami: 1 – złożone kartki pierwszego zeszytu, 2 – złożone kartki drugiego zeszytu, 3 – zszywka, 4 – część grzbietowa zeszytu.

Po powtórzeniu doświadczenia z zeszytami, których kartki zostały złożone według dwóch zmienionych sposobów okazuje się, że rozdzielenie zeszytów jest znacznie łatwiejsze. Wykonując to doświadczenie nie zaszkodzi zachować ostrożność i zapewnić trochę wolnego miejsca wokół osób rozciągających zeszyty, żeby w przypadku ich rozdzielenia ktoś przypadkowo nie uderzył w twardy przedmiot lub w inną osobę.

Teraz pytanie; dlaczego tak się dzieje? Na lekcjach fizyki uczniowie dowiadują się, że wartość siły tarcia T zależy od siły nacisku N i od współczynnika tarcia f , zgodnie ze wzorem

$$T = fN \quad (1)$$

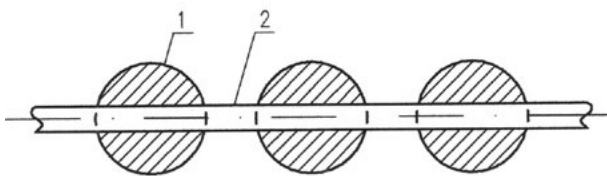
natomiast nie zależy od wielkości trących się powierzchni. To jest jednak znacznie uproszczony opis zjawiska tarcia [2, 3]. Rozdzielenie zeszytów złożonych według dwóch zmienionych wariantów okazało się o wiele łatwiejsze, ponieważ w tych przypadkach wielkość trących się powierzchni była mniejsza. Zgodnie z tym, we wzorze (1) należy dodać drugi składnik, który zależy od powierzchni styku trących się ciał S i ten składnik w pewnych przypadkach ma decydujące znaczenie, co okazało się w przeprowadzonych eksperymentach.

Zaskakujący łańcuszek

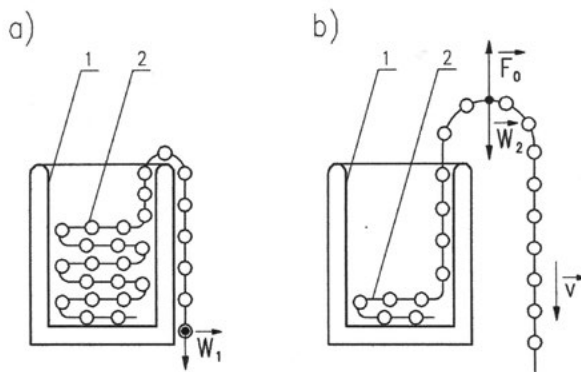
Żeby wykonać to doświadczenie należy zaopatrzyć się w łańcuszek o długości ok. 1 m lub większej, przeznaczony do zwijania rolet lub przesuwania zasłon i trzy niewielkie naczynia szklane o różnych wysokościach. Wspomniany łańcuszek ma budowę pokazaną na rys. 5 i składa się z metalowych, albo plastikowych kulek o średnicy ok. 3 mm, zamocowanych w równych odległościach od siebie na giętkiej linie, wykonanej z plastiku. Naczyniami szklanymi mogą być małe zlewki, szklanki lub kieliszki. Ważne, żeby górny brzeg tych naczyń był zaokrąglony – może być wygięty na zewnątrz, jak w przypadku zlewek, i nie był zbyt cienki. Pojemność najmniejszego naczynia powinna umożliwiać włożenie do niego całego łańcuszka. Zaokrąglony lub wywinięty brzeg naczynia zmniejsza hamowanie łańcuszka.

Przed rozpoczęciem doświadczenia łańcuszek należy włożyć do naczynia o średniej wysokości w sposób pokazany na rys. 6.a. Ważne jest, żeby kolejne odcinki łańcuszka nie były poprzepłatanne ze sobą w kierunku pionowym, ani splecione, a tylko leżały jeden na drugim. Naczynie z łańcuszkiem należy trzymać poniesione wysoko jedną ręką. W tej pozycji drugą ręką trzeba wyciągnąć z naczynia górny odcinek łańcuszka o długości kilkunastu centymetrów i poprzez brzeg naczynia skierować go pionowo w dół, a następnie puścić swobodnie (fot. 3). W tej sytuacji łańcuszek zaczyna opadać, początkowo ślizgając się po brzegu i wyciągając jego kolejne odcinki z naczynia. Po upływie kilku sekund odcinek łańcuszka poruszający się nad brzegiem naczynia unosi się ku górze i tworzy coraz większy łuk (rys. 6.b, fot. 4).

Co jest przyczyną tego zadziwiającego zachowania się łańcuszka? Odcinek łańcuszka, nad górnym brzegiem naczynia musi poruszać się po łuku. Dlatego na ten odcinek działa siła odśrodkowa, skierowana ku górze. Prędkość



Rys. 5. Budowa łańcuszka pokazana w przekroju: 1 – kulka, 2 – linia.



Rys. 6. Sposób przeprowadzenia doświadczenia z łańcuszkiem: a) sytuacja początkowa, b) sytuacja końcowa: 1 – małe naczynie szklane, 2 – łańcuszek, W_1 – ciężar zwisającej części łańcuszka, F_0 – siła odśrodkowa, W_2 – ciężar zewnętrznej części łańcuszka, v – prędkość łańcuszka.



Fot. 3. Łańcuszek w sytuacji początkowej.



Fot. 4. Łańcuszek w końcowej fazie ruchu.

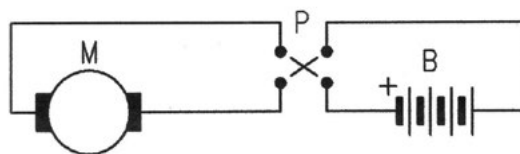
łańcuszka wzrasta, wraz ze wzrostem długości jego części, która już wysunęła się z naczynia. Wzrost prędkości powoduje również zwiększenie siły odśrodkowej, a jej wartość w pewnym momencie staje się większa niż wartość ciężaru odcinka łańcuszka, znajdującego się na zewnątrz naczynia i wtedy ten odcinek łańcuszka unosi się ku górze.

Ruch łańcuszka odbywa się pod działaniem wzrastającego ciężaru jego odcinka, który już wysunął się z naczynia. Masa tego odcinka też wzrasta. Jest to więc przykład ruchu ciała o zmiennej masie pod działaniem zmiennej siły [4]. Dokładny opis tego ruchu wymaga zastosowania skomplikowanego równania różniczkowego, uwzględniającego wiele czynników. Nieco łatwiej przybliżony opis ruchu można uzyskać stosując zasadę zachowania energii mechanicznej. W tym przypadku należy napisać Hamiltonian, czyli funkcję całkowitej energii mechanicznej łańcuszka w zależności od czasu.

Zamiast rozważań teoretycznych łatwiej wykonać jeszcze dwa eksperymenty. Doświadczenie należy powtórzyć po ułożeniu łańcuszka raz w naczyniu o mniejszej wysokości, a następnie w naczyniu o wysokości większej. W pierwszym przypadku wysokość, osiągnięta przez łańcuszek na brzegu naczynia będzie większa. Powód tego stanowi wzrost prędkości łańcuszka, który jest łatwiej przyspieszany. Bez trudu da się zauważyć, że tym przypadku do wprawienia w ruch pozostaje odcinek łańcuszka o mniejszej długości i mniejszej masie, znajdujący wewnątrz naczynia między jego górnym brzegiem i częścią łańcuszka, leżącą na jego dnie. W przypadku naczynia o większej wysokości sytuacja będzie odwrotna.

Mieszanie cieczy

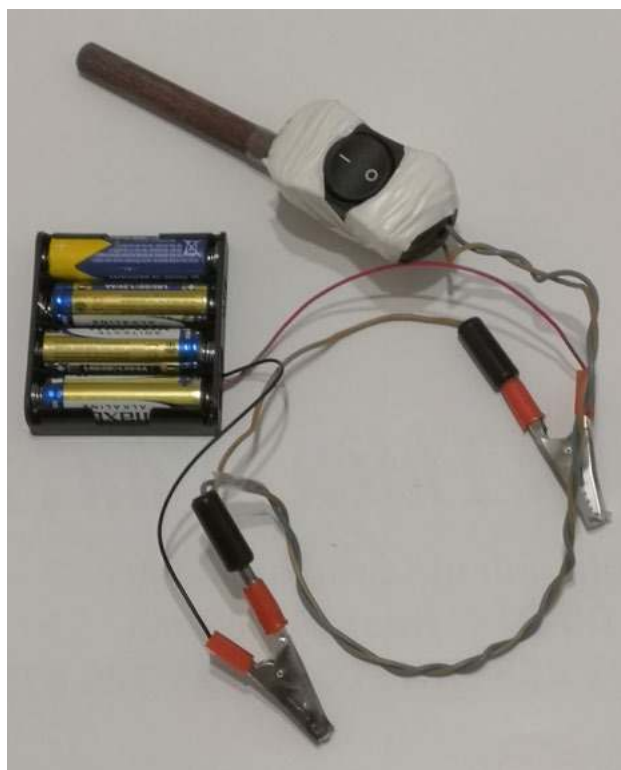
Do doświadczenia będzie potrzebne małe mieszadło z napędem elektrycznym. Takie mieszadło łatwo wykonać samemu, wykorzystując mikrosilnik elektryczny, czyli mały silniczek prądu stałego np. od napędu zabawek o napięciu zasilania 3-6 V. Schemat połączenia elementów mieszadła przedstawia rys. 7. Przełącznik służy do zmiany kierunku obrotów silniczka. Do jego zasilania



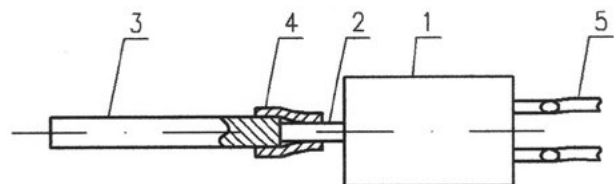
Rys. 7. Schemat obwodu mieszadła: M – mikrosilnik na prąd stały, P – przełącznik, B – bateria.

nia zastosowano baterie typu AA, czyli tzw. „paluszki”, umieszczone w pojemniku. Bardzo prostym i wygodnym rozwiązaniem okazało się przymocowanie wyłącznika od lampki nocnej do obudowy silniczka taśmą izolacyjną oraz wykorzystanie krokodyłków i wtyczek bananowych do zmiany jego kierunku obrotów (fot. 5). Elementem obracającym się i zanurzonym w cieczy był pręcik z tworzywa sztucznego o średnicy 8 mm i długości 6 cm, połączony z osią silniczka za pomocą kawałka koszulki termokurczliwej (rys. 8). Oprócz tego należy przygotować dwa niewielkie, szklane naczynia z cieczami o znacznie różniących się lepkościach. Najprostszym rozwiązaniem jest użycie wody jako pierwszej z tych cieczy i słoików od produktów spożywczych o pojemności ok. 200 ml w roli naczyń. Jako druga ciecz najlepszy okazał się sos tatarski, ale dobrze widoczny efekt uzyskano też z innymi sosami, musztardą, farbą emulsyjną i żywicą epoksydową.

Wykonanie doświadczenia jest bardzo proste. Koniec obracającego się pręcika należy włożyć do naczynia z wodą. Widać wtedy, że wokół pręcika utworzy się zagłębienie w kształcie lejka (rys. 9.a, fot. 6). Jeżeli zmienić kierunek obrotu pręcika, to okaże się, że kształt tego zagłębienia będzie taki sam. Gdy jednak koniec obracającego się pręcika zostanie zanurzony w naczyniu z jedną z cieczy wymienionych w drugim przypadku, wtedy zachodzi zadziwiający efekt. Zamiast spodziewanego zagłębienia obserwuje się wzniesienie cieczy wokół pręcika (rys. 9.b, fot. 7). Wygląda na to, że ciecz „nawija się” na wirujący pręcik. Kształt tego wzniesienia również nie zależy do kierunku obrotów pręcika.

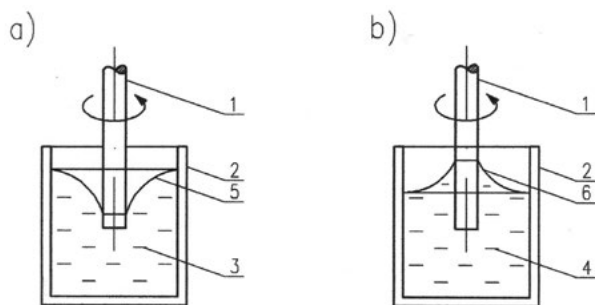


Fot. 5. Przykład wykonania mieszadła.



Rys. 8. Przykładowy sposób połączenia mikrosilnika z prętem: 1 – mikrosilnik na prąd stały, 2 – oś mikrosilnika, 3 – pręt, 4 – koszulka termokurczliwa, 5 – przewód silnika.

Co jest przyczyną tak różnego zachowania się obu cieczy? Potocznie mówi się, że woda i jedna cieczy użytych w drugiej części doświadczenia, np. sos, różnią się gęstością. Zgodnie z nazewnictwem przyjętym w fizyce jest to nieporozumienie. Gęstość w fizyce jest zdefiniowana masa jednostki objętości ciała. Przy takiej definicji gęstości sosu i wody są prawie takie same i nie można



Rys. 9. Sposób przeprowadzenia doświadczenia z cieczami o różnej lepkości: a) z cieczą newtonowską, b) z cieczą nienewtonowską: 1 – wirujący pręt, 2 – małe naczynie szklane, 3 – ciecz newtonowska, 4 – ciecz nienewtonowska, 5 – powierzchnia zagłębienia, 6 – powierzchnia wzniesienia.



Fot. 6. Zagłębienie w wodzie spowodowane ruchem obrotowym.



Fot. 7. Wzniesienie cieczy nienewtonowskiej (sos tartarski) spowodowane ruchem obrotowym.

na tej podstawie wytłumaczyć ich zupełnie różnego zachowania. Na obie tych cieczy podczas mieszania działa przecież siła odśrodkowa, która powinna spowodować utworzenie zagłębienia.

Powszechnie wiadomo, że sos jest znacznie trudniej wprawić w ruch, np. przez mieszanie lub wylewanie ze słoika, niż wodę. Tej własności cieczy, polegającej na stawianiu przez nie oporu podczas przepływu. W fizyce przypisuje się wielkość nazywaną lepkością. Tak więc sos czy olej mają większą lepkość niż woda. Jednak duża wartość lepkości nie wystarcza, żeby uzyskać wzniesienie cieczy podczas mieszania. Do tego potrzeba jeszcze, żeby lepkość miała różne wartości w różnych kierunkach, czyli była anizotropowa. Taka sytuacja występuje m.in. w pewnych zawiesinach, do których należą także sosy i farby. W przypadku tych cieczy ruch w jednym kierunku powoduje, dzięki oddziaływaniu ze sobą ich składników, również ruch w kierunku prostopadłym. To właśnie tłumaczy „nawijanie się” sosu na pręcik podczas mieszania.

Zaobserwowane zjawisko nazywa się efektem Weissenberga i można je zaobserwować m.in. podczas wyrabiania ciasta, mieszania farb i klejów. Dodatkowo lepkość niektórych cieczy zależy od prędkości ruchu [5]. Ciecze o takiej własności są nazywane reologicznymi albo nienewtonowskimi w odróżnieniu od cieczy newtonowskich, dla których lepkość jest stała, np. wody.

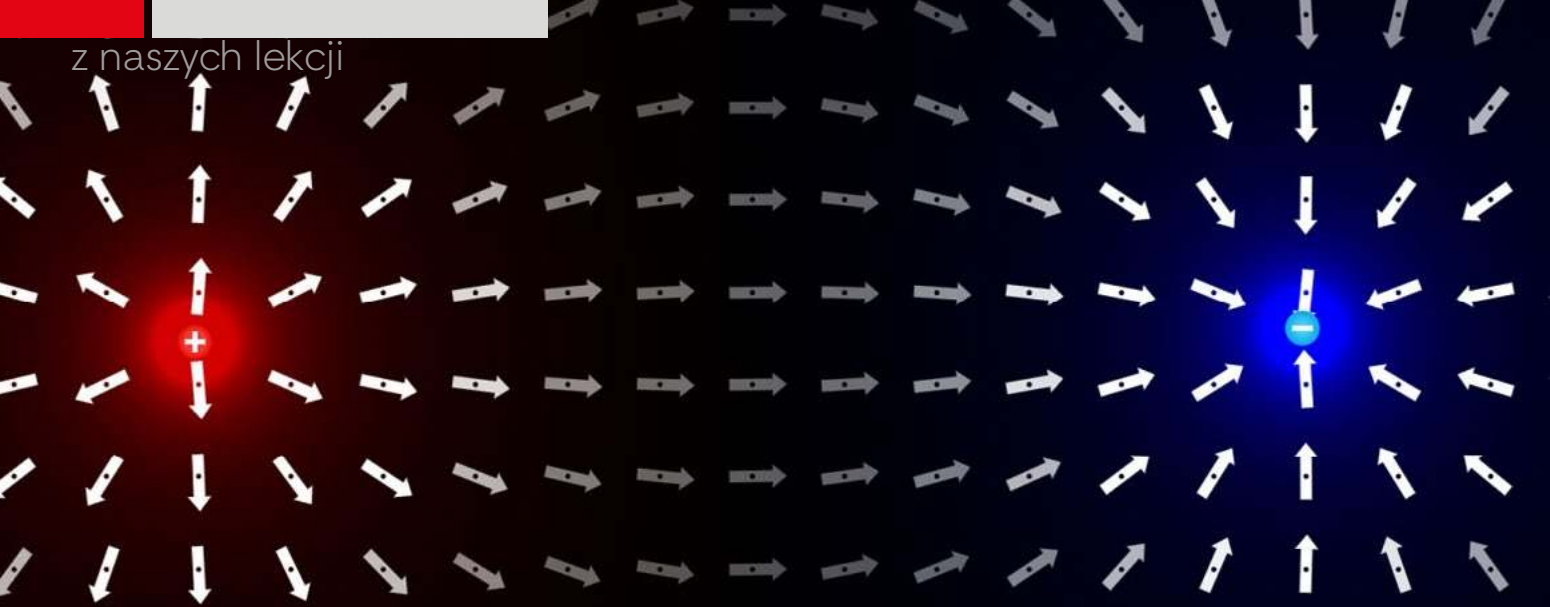
Stanisław Bednarek

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego

(fotografie autora)

LITERATURA

- [1] J.F. Rogaliński, Doświadczenia skutków rzeczy pod zmysły podpadających na publicznych posiedzeniach w szkołach poznańskich Societatis Jesu na widok wystawione y wykładane przez x. Józefa Rogalińskiego, tegoż zakonu, matematyki i fizyki doświadczający nauczyciela, a dla łatwiejszego słuchających y patrzących pojęcia za dozwoleniem zwierzchności do druku poddane, (pisownia oryginalna), Drukarnia Jezuitcka, Poznań 1765-1776.
- [2] H. Stoker, Nowoczesne kompendium fizyki, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2010.
- [3] W. Mizerski (red.), Tablice fizyczno-astronomiczne, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa 2013.
- [4] J. Leyko, Mechanika ogólna, t. 1, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2016.
- [5] J. Ferguson, Z. Kembłowski, Reologia stosowana płynów Wydawnictwo Marcus, Łódź 1995.



Badanie właściwości ładunków elektrycznych, pól i sił z wykorzystaniem symulacji

Jolanta Sokołowska, Andrzej Sokołowski

Właściwości pól elektrycznych, a szczególnie ich dodawanie, jest trudne dla uczniów z uwagi na wektorową naturę tych wielkości fizycznych. Pomocne w wyjaśnieniu tych operacji mogą być symulacje (https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html), które w wygodny sposób ułatwiają obrazowanie tych zjawisk.

Lekcja ta składa się z kilku niezależnych części, które nauczyciel może również wykorzystać niezależnie podczas kilku lekcji w dziale elektrostatyki.

Podczas tej lekcji, uczeń będzie pracował jako odkrywca właściwości pól elektrostatycznych i sił natężeń tych pól. Lekcja jest napisana w formie, która umożliwia uczniowi samodzielną pracę i jako taka może być również zadana jako praca domowa. Sugerowalibyśmy jednak, by lekcja była przeprowadzona w klasie tak aby nauczyciel mógł pomóc uczniom, jeśli to jest wymagane. Lekcja może być zrealizowana jako podsumowanie działu elektrostatyki w szkole średniej. Kilka jej elementów może być też wykorzystane na lekcji fizyki w szkole podstawowej.

CZĘŚĆ 1: Badanie wektorowej reprezentacji właściwości pola elektrostatycznego

Wektory posiadające kierunek i wartość są używane do opisu chwilowych wartości wielkości fizycznych, które zależą od określonego czasu i/lub lokalizacji.

Wprowadzenie konceptualne

Otwórz: https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html

Wykorzystaj elementy umieszczone w ramce: proton + oraz Sensor (Czujnik) by badać wartości pola w różnych miejscach.

1. Umieść ładunek dodatni w środku pola. Jak powinna zmieniać się długość wektorów, przedstawiających na-

tężenie pola, gdy odległość od ładunku wzrasta? _____

2. W polu elektrycznym umieszczony jest ładunek dodatni (zobacz ilustracja po prawej stronie). Naszkicuj wektory pola w różnych miejscach, równo oddalonych od tego ładunku.



a) Czy długości wektorów będą (wszędzie) takie same?

b) Czy kierunki wektorów będą (wszędzie) takie same?

3. Jaki jest konwencjonalny (umowny) kierunek pola elektrostatycznego wytwarzanego przez ładunek dodatni?

4. Sprawdź swoje przewidywania dotyczące powstałego pola elektrostatycznego używając animacji:

https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html.

Wykorzystaj elementy umieszczone w ramce: proton + oraz Sensors (Czujnik) by badać wartości pola w różnych miejscach. Zauważ różnice w ilustracji pola, gdy użyjesz tylko przycisk *Electric Field (Pole elektryczne)* i obydwa przyciski: *Electric Field (Pole elektryczne)* oraz *Direction only (Tylko kierunek)*.

Bardziej dokładna matematyczna analiza

Wzór $E = \frac{k|q|}{r^2}$ służy do obliczania natężenia pola elektrostatycznego, gdzie r = odległość od ładunku wytwarzającego pole i q jest wielkością tego ładunku.

5. Odpowiedz na następujące pytania używając formułę

$$E = \frac{k|q|}{r^2}. \text{ Przeprowadź obliczenia matematyczne.}$$

Założmy, że odległość od ładunku wytwarzającego pole wzrasta z $r = 0,5 \text{ m}$ do $r = 2 \text{ m}$.

- a) O jaki czynnik zmieni się wartość natężenia pola? (Aby znaleźć czynnik, utwórz iloraz wielkości i uprość powstałe wyrażenie).

- b) O jaki czynnik powinna zmienić się długość wektora?

6. Natężenie pola można analizować poprzez zmianę wielkości $E(x)$ w zależności od parametru x .

Jaka generalna funkcja algebraiczna (np. funkcja wykładnicza, wymierna itp.) przedstawi natężenie pola w zależności od wartości parametru x , gdzie x jest odległością od ładunku wytwarzającego pole?

Wskazówka, użyj formułę na natężenia pola $E = \frac{k|q|}{r^2}$, znajdź parametry stałe i zmienne. Przekształć ten wzór w równanie funkcji $E(x)$ oraz naszkicuj graf zależności $E(x)$. Poniżej, wykonaj wstępny szkic funkcji $E(x)$.



Znajdź następujące wartości funkcji.

- a) $E(0) =$
 b) $\lim_{x \rightarrow 0^+} E(x) =$
 c) $\lim_{x \rightarrow \infty} E(x) =$
 d) Wyjaśnij znaczenie wyniku wyrażenia: $\frac{dE(x)}{dx} =$
 e) Wyłumacz co jest wynikiem znalezienia granicy: $\lim_{x \rightarrow \infty} \frac{dE(x)}{dx} ?$

Dodatkowe pytania konceptualne i algebraiczne

7. Załóżmy, że hipotetyczny układ elektrostatyczny zbudowany jest z dwóch ładunków: protonu i elektronu.

- a) Czy każdy ładunek wytwarza pole elektryczne?

- b) Jaka jest przewidywana wielkość i kierunek natężenia pola (netto) wokół tego układu? Uzasadnij swoją odpowiedź.

- c) Zweryfikuj swoje przewidywania wykorzystując ponownie animację: https://phet.colorado.edu/sims/html/charges-and-fields/latest/charges-and-fields_en.html (aby zbudować taki atom, wykorzystaj elementy umieszczone w ramce: proton +, elektron -. Umieść elektron nad protonem. Użyj elementu o nazwie Sensors (Czujnik) by badać wartości pola w różnych miejscach).

8. Załóżmy, że inny atom zbudowany jest z 1 protonu i 2 elektronów. Porównaj pole wytworzone przez ten atom z polem wytwarzanym przez 1 proton? Rozważ wielkość i kierunek natężenia pola.

9. Czy pole elektryczne wytwarza siłę elektrostatyczną (uwaga: siła wyrażona jest w niutonach)?

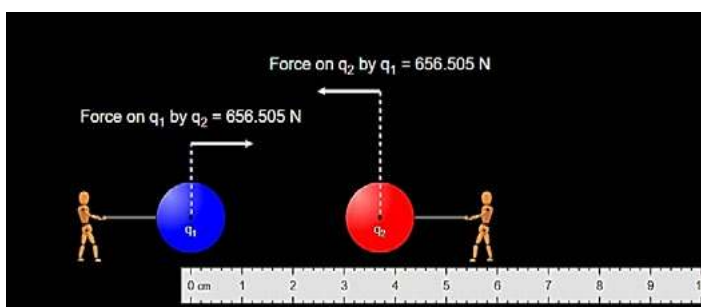
Jeśli ładunek netto obiektu wynosi zero (a zatem, jeśli obiekt posiada taką samą liczbę protonów i elektronów), to pole netto wytwarzane przez obiekt wynosi zero. Pole elektrostatyczne jest właściwością przestrzeni otaczającej naładowane obiekty.

CZĘŚĆ 2: Analiza sił działających między ciałami naładowanymi

Otwórz: https://phet.colorado.edu/sims/html/coulombs-law/latest/coulombs-law_en.html

Wybierz: Micro Scale

1. Ładunki na każdej kuli są identyczne i równe $10 \mu\text{C}$. Załóżmy, że osoba po prawej stronie porusza prawą sferą, a lewa sfera jest nieruchoma.



- a) Wraz ze wzrostem separacji zmniejszają się siły wzajemnego przyciągania. Przedstaw teorię wyjaśniającą, dlaczego siły maleją. Uzasadniając swoją teorię załóż, że pole elektrostatyczne jest wytwarzane przez lewą kulę.

- b) Załóżmy, że kula q_2 jest przesunięta tak, że odległość między środkami kul wynosi 2 cm. Znajdź wyrażenie, aby obliczyć chwilowe przyspieszenie ładunku q_2 . Wskazówka: wyprowadź równanie Newtona przedstawiające F_{net} działającą na q_2 . Ignoruj efekty grawitacyjne.

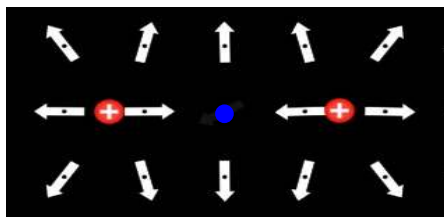
- c) Czy przyspieszenie q_2 będzie stałe, gdy kula porusza się w kierunku q_1 ? Uzasadnij swoją odpowiedź.

- d) Załóżmy, że osoba po prawej stronie przesunęła q_2 na nieskończoną odległość.
- Czy praca wykonana nad ładunkiem q_2 jest pozytywna czy negatywna? Uzasadnij swoją odpowiedź.

Rozważmy zmianę energii potencjalnej układu.

- Napisz wzór na (tak wykonaną) pracę posługując się notacją funkcji całkowej.

2. To pytanie odnosi się do symulacji z CZĘŚCI 1. Układ zawiera dwa ładunki dodatnie jak pokazano poniżej.



- a) Czy wektory reprezentują natężenie pola elektrostatycznego czy siły elektrostatyczne?

Jak to uzasadnisz?

- b) Dlaczego nie pokazano poziomych wektorów pola w miejscu oznaczonym jako niebieska kropka między ładunkami?

- c) Jeśli ładunek dodatni zostanie umieszczony w miejscu niebieskiej kropki, jaka jest siła netto działająca na nią?

Udowodnij to algebraicznie.

Dodatkowe pytania sprawdzające zrozumienie pól elektrostatycznych

1. Każdy obiekt wytwarza pole elektrostatyczne, ponieważ jest zbudowany z naładowanych cząstek, takich jak protony i elektrony. Jednak nie wszystkie obiekty wytwarzają pole elektryczne netto. Wyjaśnij poprawność tego stwierdzenia.

2. Ładunki wytwarzają pola elektrostatyczne ale nie wytwarzają sił elektrostatycznych. Co jest wymagane do wytworzenia siły elektrostatycznej?

3. Twierdzenie o energii kinetycznej ($\Delta KE = W_{\text{NET}}$) stwierdza, że praca netto wykonana na obiekcie o masie m przekształca się w energię kinetyczną obiektu.

- a) Czy prawo może mieć zastosowanie do pól elektrycznych i poruszających się ładunków?

- b) Jaka siła wykonuje pracę nad ładunkami?

- c) Sformułuj prawo, aby znaleźć prędkość ładunku q znajdującego się pod działaniem zmiennej siły elektrostatycznej $F(x)$.

Fizyka szkolna na cenzurowanym

(Miniatura dydaktyczna)

Coraz głośniej mówi się o potrzebie zmian programowych nauczania poszczególnych przedmiotów, zarówno na poziomie szkoły podstawowej jak i średniej. W szczególności dotyczy to przedmiotów przyrodniczych.

Waldemar Reńda

Jako nauczyciel fizyki z 38 letnim stażem pracy zarówno w szkole podstawowej jak i w szkołach średnich oraz wieloletni pracownik Wojewódzkiego Ośrodka Metodycznego w Katowicach, a także rzeczoznawca MEiN do spraw podręczników szkolnych, pozwolę sobie na wystawienie cenzurki obecnemu nauczaniu fizyki.

Zacznę jednak od *Podstawy Programowej*. Czytamy w niej:

„Zadaniem szkoły jest:

- 1) rozbudzanie zainteresowania zjawiskami otaczającego świata;
- 2) kształtowanie ciekawości poznawczej przejawiającej się w formułowaniu pytań i szukaniu odpowiedzi z wykorzystywaniem metodologii badawczej;
- 3) wyrabianie nawyku poszerzania wiedzy, korzystania z materiałów źródłowych i bezpiecznego eksperymentowania;
- 4) posługiwanie się pojęciami i językiem charakterystycznym dla fizyki, odróżnianie znaczenia pojęć w języku potocznym od ich znaczenia w nauce;
- 5) wykorzystywanie elementów metodologii badawczej do zdobywania i weryfikowania informacji;

- 6) kształtowanie podstaw rozumowania naukowego obejmującego rozpoznawanie zagadnień naukowych, wyjaśnianie zjawisk fizycznych w sposób naukowy, interpretowanie oraz wykorzystywanie wyników i dowodów naukowych;
- 7) uświadamianie roli fizyki jako naukowej podstawy współczesnej techniki i technologii, w tym również technologii informacyjno-komunikacyjnej;
- 8) kształtowanie kompetencji kluczowych: wiedzy, umiejętności oraz postaw jako stałych elementów rozwoju jednostki i społeczeństwa;
- 9) wartościowanie znaczenia fizyki w procesie rozwoju gospodarczego i społecznego, a także codziennego życia.”

Czy obecnie realizowane są te postulaty?

Niestety, tylko w niewielkiej części. Oto już w punkcie 1) owej *Podstawy* czytamy: „Zadaniem szkoły jest rozbudzanie zainteresowania zjawiskami otaczającego świata.” Niestety, przeglądając *Podstawę programową* nie znalazłem zbyt wiele tematów, które spełniałyby to zalecenie.

¹ Autorom podręczników na ogół jedynie wydaje się, że je realizują.

Zniknęła z programu cała statyka. Nie będziemy więc wiedzieć, dlaczego wstając z krzeselka, musimy się pochylić do przodu. Nie ma też informacji na temat działania dźwigni jedno- i dwustronnej, mimo że posługujemy się nożyczkami, obcęgami, a cały nasz kościec to zbiór tego typu dźwigni. Nie będziemy wiedzieć, dlaczego chcąc odkręcić oporną nakrętkę, należy użyć klucza o możliwie długim ramieniu. Nie wiemy, co to jest para sił i że nie można jej zrównoważyć jedną siłą, a przecież niemal codziennie otwieramy słoiczek z dżemem, czy butelkę wody mineralnej. Zniknął też temat o włosowatości, więc jak wyjaśnić odżywianie się roślin?

Ktoś powie, że to jakaś staroświecka wiedza, ale to jest to, z czym mamy do czynienia na co dzień i uczeń powinien na ten temat coś wiedzieć. W dodatku ucząc tego, pokażemy, że fizyka jest nauką interdyscyplinarną i nie można bez niej zrozumieć zarówno techniki jak i zjawisk, które zachodzą nie tylko w przyrodzie nieożywionej, ale i ożywionej.

A oto inny przykład:

Zapewne zauważyliśmy, że im większy mróz na dworze, to powietrze w mieszkaniach jest coraz bardziej suche. No tak, ale dlaczego? Tego już uczeń się nie dowie na lekcjach fizyki. Nie dowie się też, w jakich warunkach powstają np. poranne mgły, chmury i niż baryczne.

Aby to wyjaśnić, należałoby trochę czasu poświęcić problemowi wilgotności powietrza. Można nawet pokazać, jak zmierzyć ową wilgotność, nie mając higrometru ani też psychrometru. Wystarczy zwykły termometr pokojowy, byleby był swobodny dostęp do banieczki z cieczą termometryczną. Jak to zrobić?

Notujemy temperaturę w pomieszczeniu przed doświadczeniem. Następnie owijamy banieczkę termometru odrobiną waty lub ligniny, zwilżamy ją wodą o temperaturze pokojowej. Czekamy kilkanaście minut i ponownie odczytujemy temperaturę. Teraz musimy w Internecie lub w tablicach fizycznych odszukać tabelę psychrometryczną, z której odczytamy ową wilgotność względną w procentach. I tak np. przy temperaturze w pokoju 22 st. i różnicy temperatur $\Delta T = 3,5^{\circ}$, odczytamy wartość 70%. Dodam, że te problemy są przyrodniczo bardzo ważne.

Pytania

Nie znalazłem też w podręcznikach takiego pytania: „Czy siedząc w ławce szkolnej, jesteśmy w spoczynku, czy w ruchu?” Zawsze z zaciekawieniem uczniowie przyjmowali moją propozycję, by obliczyć, z jaką prędkością poruszamy się, uczestnicząc w ruchu obrotowym Ziemi. Ktoś powie, że trzeba znać długość równoleżnika, na którym leży nasza miejscowość, a więc i promień owego równoleżnika. A tego nie znamy. Otóż jest sposób, który możemy z powodzeniem zastosować już w kl. VII. Uczniowie tej klasy umieją bowiem posługiwać się mapą, jej podziałką oraz wiedzą, co to jest siatka geograficzna. Wystarczy zatem zmierzyć linijką odległość pomiędzy sąsiednimi południkami w pobliżu naszej miejscowości, wyrazić

to w kilometrach i pomnożyć przez 360. Poniżej obliczenie dla mieszkańców Płocka. Wybrałem mapę, która ma dość wierne odwzorowanie równopowierzchniowe. I tak na owej mapie odległość pomiędzy sąsiednimi południkami w okolicy Płocka wynosi 5,4 cm, co przy skali 1:1 250 000 odpowiada odległości 67,5 km. Mnożąc to przez 360, otrzymamy 24300 km. Zatem uczeń tego miasta, siedząc w ławce szkolnej, porusza się z prędkością: 24300 km : 24 h = 1012,5 km/h, czyli większą niż samoloty pasażerskie. Zaletą tego zadania jest i to, że łączymy tu wiedzę fizyczną z wiedzą geograficzną oraz astronomiczną.

Można też obliczyć czas, w jakim światło dociera ze Słońca na Ziemię. Przy okazji uczeń dowie się, jaka jest ta odległość, z jaką prędkością porusza się światło, a także poćwicz sprawność w działaniach na dużych liczbach, co potem przyda mu się wielokrotnie.

I jeszcze coś. Wprawdzie węzeł jest jednostką pozaukładową, ale powszechnie stosowaną dla określania prędkości jednostek pływających. Otóż – jak wiemy – węzeł to mila morska na godzinę. A co to jest ta mila morska? Otóż jest to łuk południka odpowiadający 1 minucie kątowej. A zatem mila morska ma: $40\,000 : (360 \cdot 60) = 1,852$ km. Tak więc węzeł to 1,852 km/h.

A przy okazji: w jednym skądinąd wartościowym podręczniku fizyki do realizacji programu rozszerzonego w liceum autorzy wprowadzają pojęcie szybkości. Owszem, można powiedzieć, że prędkość ruchu jest miarą szybkości przemieszczania się ciała, ale po co wprowadzać to pojęcie jako nową wielkość fizyczną? Podobnie jest z pojęciem średniej prędkości wektorowej. Oba te pojęcia pojawiły się w dydaktyce szkolnej, gdy zaczęto się wzorować na literaturze anglosaskiej.² Natomiast w polskich podręcznikach – np. profesora A. Januszajtisa pojęć tych nie ma. Jest tylko definicja prędkości jako pochodna wektora położenia po czasie: $\mathbf{v} = d\mathbf{r}/dt$.

Zadania

Niestety w podręcznikach ani też w znanych mi zbiorach zadań nie ma wielu ciekawych i dydaktycznie wartościowych zadań.³ Zamiast tego, uczeń musi wykonywać zadania, które go zupełnie nie interesują – np. obliczyć średnią wartość prędkości przy jeździe z miasta A do miasta B. Natomiast nie potrafi obliczyć drogi hamowania pojazdu przy danej prędkości i danym współczynniku tarcia ślizgowego, od czego może zależeć niejedno życie.

Zatrzymam się na chwilę na tym problemie. Otóż obliczenia wykazują, że owa droga nie zależy od masy pojazdu. Co zapewne zdziwi nie tylko uczniów. Oto prosty dowód: Korzystając ze związku energii kinetycznej i wykonanej pracy przez siły tarcia, otrzymamy: $\frac{1}{2} m \cdot v^2 = f \cdot m \cdot g \cdot s$. Stąd: $s = v^2 / 2 \cdot f \cdot g$

Jak widać, droga hamowania jest wprost proporcjonalna do kwadratu prędkości (o czym niestety często kierowcy i piesi zapominają) oraz od współczynnika tarcia ślizgowego.⁴ Natomiast nie zależy od masy pojazdu.

² Wynika to stąd, że w języku angielskim praktycznie nie funkcjonuje nazwa *velocity*, czyli owa prędkość, ale jedynie *speed*, czyli szybkość.

³ Zob.: W. Reńda, *O rozwiązywaniu zadań z fizyki słów kilka*, „Fizyka w Szkole” 5/2017.

⁴ ABS pozwala na wykorzystanie tarcia statycznego, które jest nieco większe od ślizgowego.

Dlaczego jednak trudniej zatrzymać autobus niż samochód osobowy. Obliczmy zatem parametry tego ruchu oraz działające w tym układzie siły dla dwóch prędkości: $v_1 = 54 \text{ km/h}$ oraz $v_2 = 72 \text{ km/h}$, czyli 15 m/s i 20 m/s przy optymalnej wartości współczynnika $f = 0,4$ (zwykle jest on niestety mniejszy!).

Oto owe drogi hamowania:⁵ $s_1 \approx 30 \text{ m}$, $s_2 \approx 50 \text{ m}$.

Opóźnienie⁶ ruchu też nie zależy od masy samochodu, a jedynie od współczynnika tarcia, bo: $a = F/m = f \cdot m \cdot g/m = f \cdot g$

W tym przypadku $a = 0,4 \text{ g}$, a zatem na każde ciało działa siła bezwładności niemal równa połowie jego ciężaru, co w przypadku autobusu może być niebezpieczne dla pasażerów. Owe siły przenoszą się również na układ hamulcowy i zawieszenie pojazdu, co może spowodować uszkodzenie tych elementów. Rozwiązanie takiego zadania stwarza równocześnie okazję do poruszenia problemów związanych z bezpieczeństwem komunikacyjnym. Wszak **nauczanie powinno być nauczaniem wychowującym**.

Coś o elektryczności

Jeden z uczniów zapytał mnie kiedyś, czy kulomb to duża jednostka czy mała? Pytanie niby proste, ale odpowiedź już taka nie jest, bo ładunek jednego kulomba przepływa przez żaróweczkę w latarce kieszonkowej zaledwie w 5 sekund, ale jeżeli dwie kule metalowe o średnicy np. po 10 cm naładowalibyśmy ładunkami po 1 C każda, to z odległości 1m oddziaływałyby wzajemnie siłą 9 miliardów niutonów!

Zawsze też zaskakuje uczniów informacja, że elektrony tworzące prąd elektryczny w przewodniku przemieszczają się wzdłuż przewodnika z prędkością mniejszą niż 1 mm/s .⁷ Pytają więc, dlaczego żarówka świeci natychmiast po naciśnięciu kontaktu. Dziwią się też, że w przypadku prądu przemiennego prąd elektryczny nie płynie z elektrowni.

Uczniowie pytają również, co to jest napięcie, bo podręczniki nie wyjaśniają tego dostatecznie dobrze.⁸ Dodam: dobrze, że pytają, bo to znaczy, że interesują się przedmiotem i nie boją się pytać. Przy okazji taka uwaga: jeżeli czegoś nie wiesz, to nie udawaj przed uczniem, że wiesz, ale powiedz: Zastanowię się nad tym i odpowiem ci na następnej lekcji.

Kiedyś uczeń zapytał mnie, skąd się bierze elektryczność w atmosferze i jak powstaje burza? Zaskoczył mnie tym pytaniem, więc sięgnąłem do literatury. Oto odpowiedź. Promieniowanie ultrafioletowe wywołuje jonizację

cząstek pyłu i niektórych gazów w powietrzu.⁹ Jak wiemy, w górnej warstwie atmosfery znajduje się jonosfera, czyli warstwa zjonizowanych atomów gazu oraz swobodnych elektronów. Ładunek jonosfery indukuje na powierzchni Ziemi ładunek o przeciwnym znaku. Między nią a jonosferą tworzy się więc pole elektryczne podobne jak między okładkami kondensatora. W wyniku działania tego pola następuje segregacja jonów. Część jonów wędruje ku ziemi, a część ku chmurom, w których się one gromadzą. Powoduje to powstanie dodatkowego pola elektrycznego.¹⁰ Jeżeli natężenie tego pola przekroczy wartość krytyczną, to następuje przeskok iskry elektrycznej. Natomiast procesy w komórce burzowej są dość skomplikowane. Dlatego zainteresowanych tym problemem odsyłam do „Wykładów Feynmana z fizyki”.

Coś z elektromagnetyzmu

Podręczniki proponują różne sposoby ustalania zwrotu linii pola magnetycznego wokół przewodnika i zwojnicy, przez które płynie prąd elektryczny czy też kierunku prądu indukcyjnego wytworzonego w zwojnicy. W pierwszym przypadku jest wygodna reguła śruby prawoskrętnej, a w drugim przypadku reguła Lentza, którą nazywam regułą przekory, co jest doskonale zapamiętywane i z powodzeniem stosowane przez uczniów.

Dlaczego o tym wszystkim piszę? Otóż warunkiem powodzenia dydaktycznego jest to, by nauczyciel fizyki dobrze znał i do głębi rozumiał treści nauczania oraz miał szeroką wiedzę interdyscyplinarną. Ponadto powinien nieustannie doskonalić swój warsztat pracy, śledzić postępy zarówno dokonujące się w fizyce, jej dydaktyce,¹¹ jak i w naukach pokrewnych, by być przygotowany do udzielenia uczniom miarodajnych odpowiedzi na ich pytania oraz obiektywnego ich skomentowania.¹²

I jeszcze jedno: każda nauka posługuje się charakterystycznym dla niej językiem, stosując pojęcia typowe dla niej lub do niej zaadoptowane. Uczeń powinien w miarę możliwości opanować ów język. Takim językiem jest oczywiście matematyka, ale jest ona także narzędziem do rozwiązywania i analizowania problemów fizycznych. Dobrze więc będzie, jeżeli nauczyciel fizyki zapozna się z realizowanym przez uczniów programem matematyki i będzie tę matematykę **umiejętnie** stosował. A z tym też bywają problemy, bo np. w podręcznikach fizyki pojawiają się jakieś trójkąciki ułatwiające ponoć przekształcanie wzorów. Ale nie tylko to. Otóż, kiedyś uczeń pierwszej klasy liceum ze zdziwieniem skonstatował, że matematyka-

⁵ Nie uwzględniam czasu reakcji kierowcy i urządzenia hamulcowego, który może sięgać 1s.

⁶ Nie jest ono przyspieszeniem ujemnym!

⁷ Prędkość chaotycznego ruchu elektronów w przewodniku jest znacznie większa i zależy od temperatury tego przewodnika. Dodam, że nie można definiować prądu elektrycznego jako **uporządkowanego ruchu elektronów w przewodniku**.

⁸ Zob.: R. Reńda, *Napięcie – trudne pojęcie*, „Fizyka w Szkole”, 2/2017.

⁹ Owo promieniowanie jest szczególnie intensywne w lecie i w strefie równikowej.

¹⁰ Latem średni gradient potencjału nad powierzchnią Ziemi wynosi ok. 1000 V/m, ale w czasie burzy może sięgać kilkudziesięciu tysięcy V/m, a różnica potencjałów między Ziemią i chmurą może dochodzić do 100 mln woltów.

¹¹ Ciągłe jeszcze pojawia się nazwa rozszerzalność cieplna ciał, a współczesna dydaktyka mówi o rozszerzalności temperaturowej, co jest zgodne z istotą owego zjawiska.

¹² Trudno jednak wymagać od nauczycieli uczących fizyki w szkole podstawowej, jeżeli nie uczą jej fizycy.

ka, jaką używam na lekcji fizyki, jest taka sama, jaką ona zna z lekcji matematyki. Zdziwiająca konstatacja!¹³

Pojęcia

Napisałem, że fizyka posługuje się pewnymi pojęciami¹⁴ zaczerpniętymi z języka potocznego. Takimi pojęciami są droga ruchu, gęstość substancji, ciężar,¹⁵ napięcie elektryczne, ciśnienie itp. itd. Uczeń powinien rozumieć, na czym polega różnica znaczeń tych pojęć używanych w życiu codziennym i w fizyce. Pewną klasą owych pojęć są **wielkości fizyczne**. Niestety, w żadnym podręczniku nie spotkałem sensownej definicji wielkości fizycznej. A przecież jest to po prostu każda **mierzalna** cecha ciała, zjawiska lub procesu fizycznego. Jeżeli uczeń zrozumie tę definicję, to nie zapyta: A co to jest ta siła? Ja jej nie widzę!¹⁶

Często posługujemy się pojęciem punktu materialnego. I znów uczeń ma problem i pyta: A co to takiego? Otóż punktem materialnym nazywamy punkt geometryczny posiadający nieskończenie małą masę¹⁷ lub całe ciało, jeżeli jego rozmiary nie mają wpływu na przebieg i opis zjawiska. Np. dla obserwatora z Ziemi planeta może być traktowana jako punkt materialny. Posługujemy się też pojęciem środka masy lub środka ciężkości, ale na ogół nie wiemy, gdzie on leży i jaki to ma wpływ na równowagę ciał, bo o tym nie ma już w programie.

W *Podstawie* jest zalecenie, by zmierzyć wartość siły ciężkości przy użyciu dynamometru, ale już nie ma nic o prawie Hooke’a. Dodam, że obecnie stosowane wagi elektroniczne działają na zasadzie, o której nie możemy mówić na poziomie szkoły podstawowej a nawet średniej. Zatem stosowanie tego typu urządzeń jest dydaktycznie wątpliwe.

Jednostki

Podstawowymi pojęciami fizycznymi są **jednostki**. Jednostka to część danej wielkości fizycznej przyjętej jako podstawa jej miary. Natomiast **miara** wielkości fizycznej to liczba mianowana, a więc wyrażona w odpowiednich dla tej wielkości jednostkach.¹⁸ I tu uwaga: młodzież posługuje się jednostkami, ale czy potrafi je jako tako zdefiniować? Na pewno uczeń powinien poznać genezę definicji podstawowych jednostek SI takich jak metr, kilogram czy sekunda. Natomiast współczesne definicje tych jednostek są zbyt trudne, by o nich mówić nawet na poziomie szkoły średniej.



Foto – Dreamstime

A inne jednostki i ich wielkości? Oczywiście obowiązuje SI, ale czy on jest wygodny w użyciu? Nie zawsze. Niech przykładem będzie jednostka gęstości. W SI to kg/m^3 . Natomiast wyznaczając gęstość¹⁹ (dawniej masa właściwa) bryłki aluminium, otrzymujemy wynik w g/cm^3 . Czy to źle? Nie. I wcale nie przeliczałbym tego na jednostkę SI, bo ta otrzymana z obliczeń jest bardziej praktyczna i bliższa wyobraźni ucznia. Odwrotnie jest z paskalem. To bardzo mała jednostka.²⁰ Dlatego korzysta się zwykle z hektopaskali, choć fizyka nie zaleca stosowania tego typu wielokrotności. Nie ma powrotu do atmosfery technicznej, choć na wielu zbiornikach można spotkać wartość ciśnienia gazu czy cieczy wyrażoną właśnie w tych jednostkach. Mało kto wie, że nadal używane są milimetry słupa rtęci, bo właśnie w tych jednostkach mierzy się i podaje wartość **nadciśnienia** tętniczego krwi.²¹

A spróbujmy zdefiniować moduł Younga, stosując jednostki SI. Dla stali to wartość rzędu $2 \cdot 10^{11}$ Pa. Natomiast dawniej było to $20\,000 \text{ kg/mm}^2$. Nie piszę tego, by proponować powrót do układu technicznego jednostek, ale omawiając z uczniami sens fizyczny tej wielkości, łatwiej będzie wyobrazić sobie działanie siły na drut stalowy o przekroju 1 mm^2 niż na blok stali o przekroju 1 m^2 . I choć owa siła jest wielokrotnie większa niż siła rwąca dla stali ($\sigma_r \approx 800 \text{ N/mm}^2$), to jednak te wartości są bliższe wyobraźni uczniów.

¹³ Niestety, brak korelacji programów fizyki i matematyki zmusza nauczycieli fizyki realizujących obecne programy nauczania do wprowadzania pojęcia funkcji, kreślenia wykresów owych funkcji a nawet wprowadzania funkcji trygonometrycznych zanim to zrobią matematycy. Horror!

¹⁴ Pojęcie (filoz.) to nazwa ogólna dotycząca wspólnej cechy pewnej klasy przedmiotów czy zjawisk.

¹⁵ Z tym pojęciem są duże problemy. Zob.: W. Reńda, *Ciężar czy siła ciężkości*, „Fizyka w Szkole”, 2/2014.

¹⁶ Jest to wielkość, która służy do opisu pewnej klasy zjawisk fizycznych. Dodam, że nie należy pisać (i mówić) *siła wypadkowa*, ale *wypadkowa sił*, bo nie jest ona dodatkową siłą działającą na dane ciało, a – *niestety* – tak bywa traktowana. W związku z tym powinna ona być inaczej rysowana – np. linią przerywaną lub innym kolorem.

¹⁷ Ale nie zerową, bo i punkt geometryczny nie ma zerowej długości. Z punktów o zerowej długości nie mógłby powstać odcinek, a z zerowych mas powstać ciało. Podobnie jest z momentem na osi czasu. To też nieskończenie mały, ale niezerowy przedział czasu.

¹⁸ Są pewne wielkości nie mające jednostki jak np. współczynnik tarcia, ale jest ich niewiele.

¹⁹ W języku potocznym ma zupełnie inne znaczenie. Dawniej był *ciężar właściwy*. Jest też *ciepło właściwe*. Uważam, że te nazwy są bardziej „właściwe”.

²⁰ Odpowiada ciśnieniu, jakie wywiera warstwa wody o grubości zaledwie $0,1 \text{ mm}$.

²¹ Zwracam uwagę na fakt, że jest to **nadciśnienie**, a nie **ciśnienie krwi**, bo **ciśnienie krwi** jest sumą ciśnienia atmosferycznego i owego nadciśnienia. Podobnie jest np. z ciśnieniem powietrza w oponach. Podawana jest wartość jego nadciśnienia. Dodam dla porządku: $1 \text{ mmHg} = 133,32 \text{ Pa}$.

I na koniec jednostki częstotliwości drgań i obrotów. Tablice informują, że w obu przypadkach jest to herc. Ale czy ktoś widział, by np. na pralkach podawano częstotliwość obrotów w hercach? Wszędzie są obroty/min. Oczywiście zapisujemy to jako 1/s, ale czytamy: obrót na sekundę. Tu uczniowie powinni wiedzieć, że wymiar 1/s dotyczy zarówno jednostki częstotliwości jak i prędkości kątowej, czyli radian na sekundę, co jednak jest dużą różnicą i ma znaczenie dla ustalania ostatecznej jednostki obliczanej wielkości.

Definicje

Język fizyki wymaga również dość precyzyjnych definicji wybranych pojęć. Niekoniecznie owe definicje powinien znać uczeń, ale nauczyciel musi je znać i rozumieć ich sens oraz właściwie je stosować. Niech takim przykładem będzie definicja środka ciężkości czy też środka masy. Błędem jest np. przykładanie wszystkich sił działających na ciało w owym punkcie.

Błędnie jest też interpretowane pojęcie siły sprężystości. Zarówno w *Podstawie*, jak i podręcznikach – nawet w tych uznanych za bardzo dobre – owa siła utożsamiana jest z siłą reakcji, o której mowa w III zasadzie dynamiki. A przecież siły sprężystości są siłami **wewnętrznymi** odpowiedzialnymi za kształt ciał stałych. Natomiast siły, o których mowa w tej zasadzie to siły **zewnętrzne** wzajemnego nacisku/parcia. Są to zatem siły reakcji. I tak jest we wszystkich podręcznikach mechaniki. Dodam, że siłami reakcji są również siły wyporu czy oporu dynamicznego, a także siły tarcia.²²

I na koniec: Nauka musi być użyteczna. W przeciwnym razie przestaje być potrzebna i ciekawa. Fizyka powinna przede wszystkim odpowiadać na pytania: „Co, jak i dlaczego?”²³ Może wówczas zainteresujemy uczniów naszym przedmiotem i zaczną go lubić. Wówczas też łatwiej będzie nam uczyć fizyki. Dodam, że i nauczyciel powinien nie tylko znać, ale i **lubić** swój przedmiot. Wówczas osiągnie lepsze rezultaty swej pracy.

A jak je osiągnąć? Otóż nie wszystko zależy od nauczyciela.

Dlaczego uczniowie nie lubią fizyki?

Nie lubią, bo jest w niej mnóstwo definicji, wzorów i pojęć do zapamiętania, i że trzeba rozwiązywać wiele mało interesujących ich zdaniem zadań. Oto przykład: fizyka w kl. VI była lubiana, a w kl. VII już nie. Dlaczego? Dlatego, że w kl. VI omawiano zjawiska im bliskie i wy-

konywano wiele prostych doświadczeń. Natomiast spadek sympatii do fizyki w kl. VII spowodowany był źle uczoną kinematyką.²⁴ Niestety od tego czasu niewiele się w tym przypadku zmieniło, a nawet jest coraz gorzej.

Fizyka realizowana w szkole podstawowej jak i w licealnym programie podstawowym jest przeteoretyzowana i z każdą kolejną podstawą programową coraz dalsza od tego, z czym mamy do czynienia w życiu codziennym.²⁵ Dodam, że ten tzw. program podstawowy realizowany w liceum niewiele różni się od tego rozszerzonego.²⁶ Czy koniecznie wszyscy muszą umieć wszystko? Nawet to, co zupełnie nie będzie im w życiu potrzebne?

Jeżeli więc chcemy, by fizyka stała się atrakcyjnym i **użytecznym** przedmiotem,²⁷ należy odchudzić programy dla szkół podstawowych, a także program podstawowy dla szkół ponadgimnazjalnych. Należy też dokonać przeglądu treści programowych pod kątem ich użyteczności.²⁸

Czytający ten tekst mogą powiedzieć: no tak, autor chce odchudzenia programów, a twierdzi, że brak w nich wielu treści. Oba postulaty można pogodzić, rezygnując z tematów przeteoretyzowanych oraz wykonywania zbędnych zadań na rzecz doświadczalnych form nauczania. Z tym, że nie można ograniczyć się wyłącznie do oglądania filmików.²⁹ Owszem, pewne filmy oraz komputerowe animacje zjawisk i procesów fizycznych są dydaktycznie korzystne, ale nie mogą zastępować doświadczeń i pokazów, które nauczyciel powinien wykonać na lekcji fizyki. Nie należy też wymagać zapamiętania tego, co i tak za kilka miesięcy czy za rok ulegnie zapomnieniu, ale **kształtować umiejętność aktywnej obserwacji zjawisk i ich interpretacji, a nie rozwiązywać trudne, nieciekawe i dalekie od realiów zadania.**

Moje dydaktyczne credo, to:

1. Przedstawiać treści nauczania jak najprościej, ale w pełni poprawnie merytorycznie i zgodnie z metodologią przedmiotu.
2. Zaciekawiać przedmiotem.
3. Wykonywać jak najwięcej doświadczeń i pokazów.

Należy zatem uczyć fizyki nieco inaczej i nie tak, jak to się obecnie robi, bo fizyka to swoista *never ending story* – niekończąca się opowieść o otaczającej nas rzeczywistości przyrodniczo-technicznej, w której przecież uczestniczymy.

Waldemar Reńda,
Olkusz, kwiecień 2023 r.

²² Przy okazji zwracam uwagę na to, że uczeń na ogół nie wie, gdzie należy przyłożyć wektor siły wyporu, a od jego położenia (nad środkiem ciężkości ciała) zależy stabilność jednostek pływających.

²³ Zob.: WYDANIE SPECJALNE czasopisma „Fizyka w Szkole” pod tym samym tytułem.

²⁴ Paul G. Hewitt w swej książce *Fizyka wokół nas pisze w przedmowie mniej więcej tak*: „Jeśli chcesz znacznie zredukować liczbę słuchaczy, to na pierwszych zajęciach napisz na tablicy równania ruchu i powiedz, że przez najbliższe miesiące będziemy je analizować.” Dodam, że w tej skądinąd ciekawie napisanej książce jest wiele nieprecyzyjnych sformułowań i nie należy ich kopiować.

²⁵ Dotyczy to wszystkich przedmiotów przyrodniczych. W dodatku systematycznie maleje liczba godzin przeznaczonych na realizację programów z tych przedmiotów. W efekcie w **społeczeństwie rośnie swoisty analfabetyzm w zakresie wiedzy przyrodniczej.**

²⁶ Dodam, że realizowanie obecnego programu fizyki w profilach humanistycznych jest pozbawione jakiegokolwiek dydaktycznego sensu.

²⁷ Gdy widzę w upalnym i słonecznym dniu młodzież ubraną w czarne T-shirty, to podejrzewam, że była źle uczona fizyki.

²⁸ W przypadku szkół zawodowych należałoby dostosować program fizyki do specyfiki danej szkoły.

²⁹ Film, jeżeli jest dydaktycznie wartościowy, może uzupełnić treść lekcji, ale nie może jej zastąpić. Podobnie jest z podręcznikiem.

Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba

– część IV

Foto – Dreamstime

W czwartej części rozważań związanych z mechaniką nieba zostały przedstawione przykładowe zadania wraz z ich rozwiązaniami, które opierają się na równaniach przedstawionych w poprzednich naszych artykułach. W tym miejscu zachęcamy Naszych czytelników do podjęcia samodzielnej próby rozwiązania postawionych problemów. W przypadku napotkania trudności zachęcamy do przeanalizowania przykładowego rozwiązania.

Marcin Wesołowski

Zadanie 1. Oblicz na jaką maksymalną odległość od Słońca może oddalić się kometa Halley’a. W obliczeniach przyjmij, że okres orbitalny wynosi $T = 76$ lat, a najmniejsza odległość, na jaką zbliża się ona do Słońca wynosi $R_{\min} = 0.9 \cdot 10^8$ km. W rozważaniach uwzględnij, że promień orbity Ziemi wynosi $R_0 = 1.5 \cdot 10^8$ km.

Rozwiązanie:

W tym miejscu wykorzystajmy zależność, którą opisuje III prawo Keplera. Zależność tę możemy zapisać jako:

$$\frac{T_0^2}{R_0^3} = \text{const} = \frac{T^2}{a^3}, \quad (1.1)$$

gdzie T_0 jest okresem obiegu Ziemi wokół Słońca ($T_0 = 1$ rok). Przekształćmy równanie (1.1) w taki sposób, aby można było na jego podstawie wyznaczyć pół wielką a czyli dłuższą oś orbity eliptycznej. Dodajmy, że na dłuższej osi orbity eliptycznej znajdują się jej dwa ogniska. Wówczas z równania (1.1) otrzymujemy:

$$a = R_0 \sqrt[3]{\frac{T^2}{T_0^2}}. \quad (1.2)$$

Na podstawie rys. 1. łatwo możemy zauważyć, że słuszna jest następująca zależność:

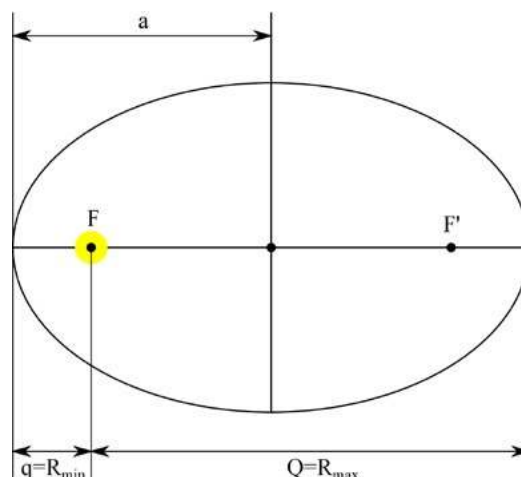
$$R_{\min} + R_{\max} = 2a. \quad (1.3)$$

Przekształćmy teraz równanie (1.3) w taki sposób, aby można było obliczyć odległość maksymalną:

$$R_{\max} = 2a - R_{\min}. \quad (1.4)$$

Zauważmy, że w równaniu (1.4) występuje pół wielka a , którą wyznaczyliśmy poprzez równanie (1.2). Podstawmy więc równanie (1.2) do zależności (1.4), wówczas otrzymamy:

$$R_{\max} = 2R_0 \sqrt[3]{\left(\frac{T}{T_0}\right)^2} - R_{\min}. \quad (1.5)$$



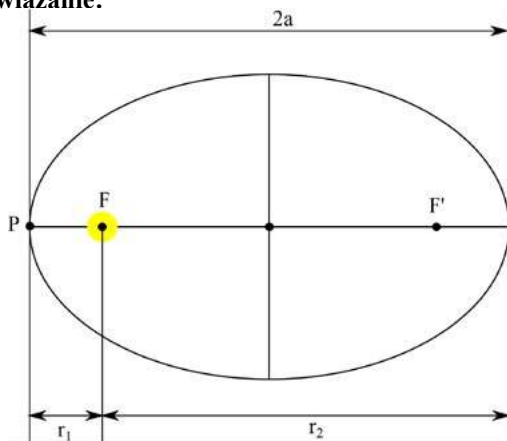
Rys. 1. Przykładowa orbita eliptyczna dla komety okresowej. Na rysunku poszczególne symbole oznaczają: q – perihelium, Q – aphelium, F, F' – ogniska, a – pół wielka. Zauważmy, że dla omawianej sytuacji spełnione jest I prawo Keplera.

Podstawiając podane w treści zadania wartości liczbowe otrzymujemy, że $R_{\max} \approx 5.3 \cdot 10^9$ km.

Odpowiedź. Maksymalna odległość na jaką może oddalić się kometa Halley'a od Słońca wynosi w przybliżeniu $5.3 \cdot 10^9$ km.

Zadanie 2. Planeta o masie m krąży wokół Słońca po orbicie eliptycznej, przy czym największa jej odległość od Słońca wynosi r_2 , a najmniejsza r_1 . Znaleźć moment pędu tej planety względem Słońca.

Rozwiązanie:



Rys. 2. Przykładowa orbita eliptyczna dla planety P. Na rysunku poszczególne symbole oznaczają: F, F' – ogniska, r_1 to najmniejsza odległość planety od Słońca, a r_2 to największa odległość planety od Słońca, które położone jest w jednym z ognisk (F) orbity eliptycznej.

Na podstawie rozważań przedstawionych w drugiej części artykułu pt. „Wybrane zagadnienie z mechaniki nieba cz. II” (w szczególności podrozdział „Dowód dla energii”), możemy zapisać, że:

$$E = -\frac{GM_s m}{2a}, \quad (2.1)$$

gdzie: M_s oznacza masę Słońca, a jest półosią wielką orbity eliptycznej. Na podstawie rozważań przedstawionych w zadaniu 1 oraz wykorzystując rys. 2 możemy zapisać, że:

$$r_1 + r_2 = 2a. \quad (2.2)$$

Wówczas równanie (2.1) możemy zapisać jako:

$$E = -\frac{GM_s m}{r_1 + r_2}. \quad (2.3)$$

Aby wyznaczyć moment pędu planety względem Słońca ponownie odwołajmy się do artykułów teoretycznych dotyczących wybranych zagadnień z mechaniki nieba cz. I i II, gdzie udowodnione zostało, że moment pędu jest wielkością stałą ($K = \text{const}$). Wówczas na podstawie tych rozważań możemy zapisać, że:

$$K = mv_1 r_1 = \text{const}. \quad (2.4)$$

W równaniu (2.4) parametrem, który musimy jeszcze wyznaczyć jest prędkość planety. Dlatego też wykorzystamy do tego celu zasadę zachowania energii mechanicznej, którą możemy wyrazić jako:

$$-\frac{GM_s m}{r_1 + r_2} = \frac{mv_1^2}{2} - \frac{GM_s m}{r_1}. \quad (2.5)$$

Wykonując proste przekształcenia algebraiczne łatwo można pokazać, że:

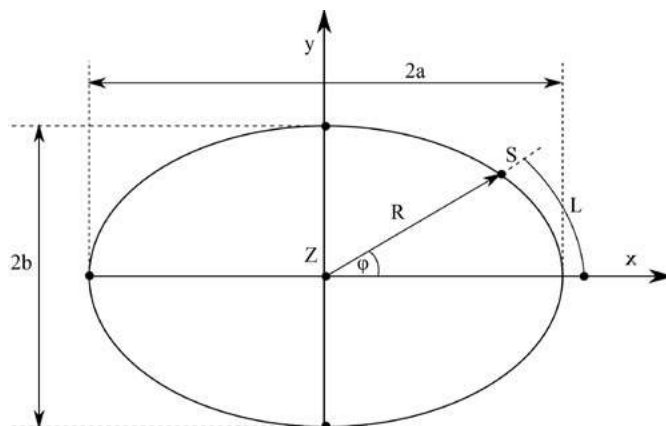
$$v_1 = \sqrt{2GM_s \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1 + r_2} \right)} = \sqrt{2GM_s \left(\frac{r_2}{r_1(r_1 + r_2)} \right)}. \quad (2.6)$$

Podstawmy teraz równanie (2.6) do równania (2.4) wówczas otrzymujemy poszukiwaną zależność na moment pędu K planety względem Słońca:

$$K = m \cdot \sqrt{2GM_s \left(\frac{r_2}{r_1(r_1 + r_2)} \right)}. \quad (2.7)$$

Odpowiedź: Poszukiwana zależność na moment pędu planety względem Słońca dana jest równaniem (2.7).

Zadanie 3. Sztuczny satelita porusza się po eliptycznej orbicie keplerowskiej. Udowodnić, że średnia wartość odległości, rozumianej jako funkcja długości orbity jest równa dużej półosi elipsy a .



Rys. 3. Orbita eliptyczna dla ruchu satelity.

Rozwiązanie:

Aby udowodnić postawiony w zadaniu problem wykorzystamy następującą zależność, że: $r = r(l)$. Wówczas średnia wartość długości będzie równa:

$$\langle r \rangle = \frac{\sum_{i=1}^n r(l) \Delta l}{L}. \quad (3.1)$$

Jeżeli sumowanie zostanie rozciągnięte na cały zakres to $n \rightarrow \infty$ wówczas równanie (3.1) możemy wyrazić poprzez następującą całkę:

$$\langle r \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L r(l) dl. \quad (3.2)$$

Na podstawie rozważań związanych z równaniem Keplera możemy zapisać, że:

$$r = a \cdot (1 - e \cdot \cos E). \quad (3.3)$$

W tym miejscu przypomnijmy, że zależność (3.3) została wyprowadzona w trzeciej części naszych rozważań

związanych z mechaniką nieba, wówczas równanie (3.2) będzie równe:

$$\langle r \rangle = \frac{1}{L} \int_0^L a(1 - e \cos E) dl. \quad (3.4)$$

Wyłączmy teraz stałe przed znak całki, co możemy zapisać jako:

$$\langle r \rangle = a - \frac{ae}{L} \int_0^L \cos E dl. \quad (3.5)$$

Zauważmy teraz, że została nam do obliczenia całka znajdująca się po prawej stronie równania (3.5). Ponownie w tym miejscu wykorzystajmy zależności z trzeciej części rozważań związanych z mechaniką nieba, niech:

$$x = a(\cos E - e), \quad y = a\sqrt{1 - e^2} \sin E. \quad (3.6)$$

Obliczmy teraz na podstawie równania (3.6) pochodne dx/dE i dy/dE :

$$dx = -a \sin E dE, \quad dy = b \cos E dE. \quad (3.7)$$

Następnie zauważmy że: $dl = \sqrt{dx^2 + dy^2}$, więc na podstawie równania (3.7) mamy:

$$dl = \sqrt{a^2 \sin^2 E + b^2 \cos^2 E} dE. \quad (3.8)$$

Wówczas nasza całka występująca w równaniu (3.5) będzie równa:

$$\begin{aligned} \int_0^L \cos E dl &= \int_0^{2\pi} \cos E \sqrt{a^2 \sin^2 E + b^2 \cos^2 E} dE \\ &= \int_0^{\pi} \cos E \sqrt{a^2 \sin^2 E + b^2 \cos^2 E} dE \\ &= \int_{\pi}^{2\pi} \cos E \sqrt{a^2 \sin^2 E + b^2 \cos^2 E} dE \end{aligned} \quad (3.9)$$

Zauważmy, że anomalię mimośrodową (E) możemy wyrazić jako: $E = \varepsilon + \pi$, wówczas:

$$\cos E = \cos(\varepsilon + \pi) = -\cos \varepsilon \quad dE = d\varepsilon. \quad (3.10)$$

Wobec tego prawa strona równania (3.9) przyjmuje następującą postać:

$$\begin{aligned} \int_{\pi}^{2\pi} \cos E \sqrt{a^2 \sin^2 E + b^2 \cos^2 E} dE \\ = - \int_0^{\pi} \cos \varepsilon \sqrt{a^2 \sin^2 \varepsilon + b^2 \cos^2 \varepsilon} d\varepsilon \\ = - \int_0^{\pi} \cos E \sqrt{a^2 \sin^2 E + b^2 \cos^2 E} dE. \end{aligned} \quad (3.11)$$

Odpowiedź: Po podstawieniu granic całkowania widać, że $\int_0^L \cos E dl = 0$, zatem na podstawie równania (3.5) możemy zapisać, że $\langle r \rangle = a$.

Zadanie 4. Sztuczny satelita porusza się po eliptycznej orbicie keplerowskiej. Udowodnić, że średnia wartość odległości $r(\varphi)$ w funkcji anomalii rzeczywistej jest równa małej półosi elipsy b .

Przeprowadzając bardzo podobne rozumowanie jakie zostało przedstawione w zadaniu 3 możemy zapisać, że:

$$\langle r \rangle = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} r(\phi) d\phi, \quad (4.1)$$

niech $r^2 \dot{\phi} = c$, gdzie $r = a(1 - e \cos E)$. Wówczas możemy zapisać, że:

$$rd\phi = \frac{c}{r} dt. \quad (4.2)$$

Obliczmy teraz czynnik dt wykorzystując do tego celu równanie Keplera:

$$nt = E - e \sin E, \quad (4.3)$$

co daje nam, że:

$$dt = \frac{(1 - e \cos E) dE}{n}. \quad (4.4)$$

Wykorzystując równania od (4.1) do (4.4) możemy zapisać, że:

$$rd\phi = \frac{c}{r} dt = \frac{c}{a(1 - e \cos E)} \cdot \frac{(1 - e \cos E) dE}{n}. \quad (4.5)$$

Po uproszczeniu otrzymujemy, że:

$$rd\phi = \frac{c}{r} dt = \frac{c}{a} \frac{dE}{n}. \quad (4.6)$$

Wówczas równanie (4.1) wynosi:

$$\begin{aligned} \langle r \rangle &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} r(\phi) d\phi = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \frac{c}{a n} dE = \frac{1}{2\pi} \frac{c}{a n} \int_0^{2\pi} dE \\ &= \frac{1}{2\pi} \frac{c}{a n} E \Big|_0^{2\pi} = \frac{c}{a n}. \end{aligned} \quad (4.7)$$

gdzie n oznacza średni ruch dzienny, który jest równy

$$n = \frac{\sqrt{G \cdot M}}{a^{3/2}},$$

a parametr c określa moment pędu:

$$c = K = \sqrt{G \cdot M \cdot a \cdot (1 - e^2)},$$

wówczas równanie (4.7) jest równe:

$$\langle r \rangle = a \sqrt{1 - e^2} = b. \quad (4.8)$$

Odpowiedź: Poszukiwana tożsamość dana jest równaniem (4.8).

Zadanie 5. Sztuczny satelita porusza się po eliptycznej orbicie keplerowskiej. Udowodnić, że średnia wartość odległości od przyciągającego centrum, rozumianej jako funkcja czasu, jest równa $\langle r \rangle = a \left(1 + \frac{e^2}{2} \right)$.

Rozwiązanie:

Ponownie w tym miejscu wykorzystajmy równanie (3.3), które dane jest jako:

$$r = a \cdot (1 - e \cdot \cos E). \quad (5.1)$$

Następnie z równania Keplera obliczymy czynnik dt poprzez jego zróżniczkowanie, co możemy zapisać jako:

$$nt = E - e \sin E, \quad dt = \frac{1}{n} (1 - e \cos E) dE. \quad (5.2)$$

Aby wykazać, że poszukiwana średnia wartość odległości zależy od czasu wykorzystamy następującą tożsamość:

$$\langle r \rangle = \frac{1}{T} \int_0^T r(t) dt. \quad (5.3)$$

Podstawmy teraz do równania (5.3) powyższe dwie zależności (5.1) i (5.2) wówczas mamy:

$$\langle r \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{2\pi} a (1 - e \cos E) \cdot \frac{1}{n} (1 - e \cos E) dE. \quad (5.4)$$

Wykorzystując proste wzory oraz podstawowe twierdzenia wynikające z analizy matematycznej a konkretniej z rachunku całkowego równanie (5.4) możemy przepisać do następującej postaci:

$$\begin{aligned} \langle r \rangle &= \frac{a}{nT} \int_0^{2\pi} (1 - 2e \cos E - e^2 \cos^2 E) dE \\ &= \frac{a}{nT} \left[E - 2e \sin E + \frac{e^2}{2} \left(E + \frac{1}{2} \sin 2E \right) \right]_0^{2\pi} \end{aligned} \quad (5.5)$$

Po uwzględnieniu granic całkowania oraz pamiętając o tym, że $\sin(2\pi) = 0$ równanie (5.5) upraszcza się do następującej postaci:

$$\begin{aligned} \langle r \rangle &= \frac{a}{nT} \left(2\pi + \frac{e^2}{2} 2\pi \right) = \frac{a}{\frac{2\pi}{T}} 2\pi \left(1 + \frac{e^2}{2} \right) \\ &= a \left(1 + \frac{e^2}{2} \right). \end{aligned} \quad (5.6)$$

Uwaga! W równaniu (5.5) wykorzystaliśmy następujący wzór wynikający z rachunku całkowego:

$$\int \cos^2 x dx = \int \frac{1 + \cos^2 x}{2} dx = \frac{1}{2} x + \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{2} \sin 2x + \text{const}.$$

Odpowiedź: Poszukiwana tożsamość dana jest równaniem (5.6).

Zadanie 6. Sztuczny satelita porusza się wokół Ziemi po orbicie kołowej o promieniu $R = 3R_Z$, ($R_Z = 6400$ km). Wskutek krótkotrwałego działania urządzenia hamującego, prędkość sztucznego satelity zmniejszyła się w taki sposób, że zaczął on poruszać się po orbicie eliptycznej, stycznej do powierzchni Ziemi. Po jakim czasie sztuczny satelita wyląduje.

Rozwiązanie:

Wykorzystując III prawo Keplera możemy zapisać, że:

$$\left(\frac{T_x}{T} \right)^2 = \left(\frac{a}{R} \right)^3, \quad (6.1)$$

Przekształćmy teraz równanie (6.1) w taki sposób, aby można było na jego podstawie wyznaczyć parametr T_x :

$$T_x = T \sqrt{\left(\frac{a}{R} \right)^3}. \quad (6.2)$$

Z treści zadania wynika również, że:

$$2a = R_Z + R = R_Z + 3R_Z = 4R_Z, \quad (6.3)$$

a stąd mamy:

$$a = 2R_Z. \quad (6.4)$$

Wykorzystując równania od (6.3) do (6.4) równanie (6.2) możemy przepisać do następującej postaci:

$$T_x = T \sqrt{\left(\frac{2R_Z}{3R_Z} \right)^3} = T \sqrt{\left(\frac{2}{3} \right)^3}. \quad (6.5)$$

Ponieważ sztuczny satelita porusza się wokół Ziemi po orbicie kołowej to działają na niego następujące siły: siła grawitacji oraz siła dośrodkowa będąca przyczyną ruchu ciała po okręgu. Porównajmy teraz ze sobą te dwie siły, wówczas otrzymujemy, że:

$$F_d = F_g, \quad (6.6)$$

gdzie:

$$F_d = m \cdot \frac{v^2}{R} = \left\{ \omega = \frac{v}{R} \Rightarrow v = \omega R \right\} = m \cdot \frac{\omega^2 R^2}{R} = m \omega^2 R.$$

Wówczas mamy:

$$m \omega^2 R = \frac{GMm}{R^2}. \quad (6.7)$$

Na podstawie równania (6.7) prędkość kąta jest równa:

$$\omega = \sqrt{\frac{GM}{R^3}}, \quad \frac{2\pi}{T} = \sqrt{\frac{GM}{(3R_Z)^3}}. \quad (6.8)$$

Z równania (6.8) możemy teraz obliczyć okres T , który jest równy:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{(3R_Z)^3}{gR_Z^2}} = 6\pi \sqrt{\frac{3R_Z}{g}}. \quad (6.9)$$

Wyznaczone równanie na okres T dane jako zależność (6.9) podstawiamy teraz do równania (6.5) wówczas otrzymujemy:

$$T_x = 6\pi \sqrt{\frac{3R_Z}{g}} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{3} \right)^3} = 4\pi \sqrt{\frac{2R_Z}{g}}. \quad (6.10)$$

Wykorzystując zależność (6.10) czas po jakim wyląduje satelita jest równy:

$$\tau = \frac{T}{2} \approx 2^h.$$

Odpowiedź: Czas po jakim satelita wyląduje wynosi około 2 godziny.

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



Napęd statków kosmicznych, czyli pęd i energia

Jest dość oczywiste, że by zmienić prędkość potrzebna jest siła. I to jest prawda niezależna od tego, gdzie się znajdujemy, a więc czy jesteśmy na Ziemi czy w przestrzeni kosmicznej.

Jerzy Kuczyński

Na początek warto zauważyć, że siłę można uzyskać na dwa sposoby. Jeden to zmiana energii a drugi to zmiana pędu. Konkretnie siłę uzyskujemy różniczkując pęd po czasie

$$\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$$

lub energię po przestrzeni. To ostatnie po trzech składowych przestrzeni, czyli

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= -\text{grad } E = -(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z) \cdot E \\ &= -(\partial E/\partial x, \partial E/\partial y, \partial E/\partial z)\end{aligned}$$

Jak by nie było w obu przypadkach uzyskujemy ten sam wektor siły. Historycznie problem, które z powyższych równań ma sens fizyczny był dyskutowany przez kilkadziesiąt lat a zakończył go w 1743 d'Alembert¹ wykazując ich równoważność.

Jak się jednak wydaje współcześnie fakt takiej równoważności nie jest zbyt powszechnie uświadamiany. Przede wszystkim ze względu na codzienne doświadczenie. Otóż

zarówno pęd jak i energia w zasadzie podlegają prawom zachowania, więc aby uzyskać siłę trzeba dostarczyć odpowiedniej ilości obu tych wielkości. Obu, bo oczywiście są ze sobą związane i nie da się zmienić jednej z nich nie dokonując odpowiedniej zmiany drugiej. Jednak jest drastyczna różnica w „dostępności” obu wielkości na Ziemi i w przestrzeni kosmicznej. Otóż na Ziemi, a ogólniej w kontakcie z masywnym ciałem, mamy bardzo dużą dostępność pędu.

Nieco upraszczając i trywializując problem, w kontakcie z masywnym ciałem nie obowiązuje prawo zachowania pędu. Widać to na co dzień, gdy przyglądamy się ruchowi drogowemu. Samochód stoi – pęd wynosi zero. Po chwili jest w stanie ruchu i pęd jest całkiem spory. Jak doskonale wiemy nie musimy się martwić skąd ten pęd się wziął. Warto jednak nad tym się zastanowić. Otóż wziął się z Ziemi mającej w stosunku do samochodu „nieskończoną” masę. Pęd to iloczyn masy i prędkości² więc jeżeli tir o masie 60 ton nabędzie prędkości 10 m/s, to Ziemia uzyska prędkość około 10^{-19} m/s, bo oczywiście

$$M_1 \cdot v_1 = -m_2 \cdot v_2, \quad (*)$$

¹ A. K. Wróblewski, „Historia fizyki”, PWN Warszawa 2006 s. 205.

² Gdyby ktoś chciał być bardzo precyzyjny to w przybliżeniu. Ale w tym przypadku oczywiście w pełni poprawnym. Można dodać, że promień protonu też jest w pewien sposób przybliżony – inny jest promień „elektryczny” a inny masowy – p. B. Duran i in., Nature t. 615 (2023) s. 813. Ten ostatni przykład pokazuje coś więcej – przybliżenie może być zarówno ilościowe jak i „ideologiczne”. W przypadku pędu to ostatnie ma duże znaczenie (p. formalizm kanoniczny) ale to już inna bajka.

a Ziemia ma masę około $6 \cdot 10^{24}$ kg czyli z grubsza za 3 godziny ruchu z tą prędkością Ziemia przesunie się o średnicę protonu³ (około 10^{-15} metra). Nie wchodząc w szczegóły można stwierdzić, że będąc w kontakcie z masywnym ciałem można od niego „pożyczać” niemal dowolne ilości pędu.

Dla energii analogiczną sytuację mamy w przypadku kontaktu z termostatem. Możemy z niego czerpać, formalnie dowolną ilość, energii cieplnej nie zmieniając jego stanu, co w zasadzie łamie prawo zachowania energii. Masywna planeta stanowi dla pędu odpowiednik termostatu dla energii cieplnej. Dlatego w praktyce, poza przypadkami krótkotrwałych zderzeń, na planecie prawo zachowania pędu nie działa a próba jego uwzględnienia prowadzi do mało rozsądnych rozważań nie mających żadnego praktycznego zastosowania.

Na planecie pozostaje jednak w mocy prawo zachowania energii, z którego realności zdają sobie sprawę wszyscy (prawie) mieszkańcy naszej planety. Dlatego w powszechnym przekonaniu do zmiany prędkości potrzebna jest jedynie odpowiednia energia i nic więcej. W praktyce stały kontakt z „termostatem pędowym” powoduje spore problemy dydaktyczne, bo bardzo trudno jest przekonać kogokolwiek, że pęd ma duże znaczenie i że warto o nim (czasem!) pamiętać.

Sytuacja drastycznie się zmienia, gdy zaczynamy rozważać problemy lotów kosmicznych. Tam oczywiście nic nie maskuje zachowania pędu. Niestety my ludzie myślimy dość schematycznie⁴ a przyzwyczajenie jest naszą drugą naturą. Dlatego często przenosimy bezmyślnie codzienne doświadczenie na inne sytuacje. Nie inaczej jest z problemem pędu, energii i silników sond kosmicznych. Na Ziemi pojazd by się poruszać musi pobierać energię i w zasadzie nic innego mu do tego nie jest potrzebne. W przestrzeni kosmicznej na zmiany prędkości potrzebujemy dostarczenia odpowiedniej ilości energii i pędu i to co na Ziemi nazywamy silnikiem nie wystarcza. Silnik statku kosmicznego musi dostarczać zarówno energii jak i pędu. I w zasadzie o tym wiemy, bo zawsze podkreśla się, że silnik statku kosmicznego jest silnikiem raketowym.

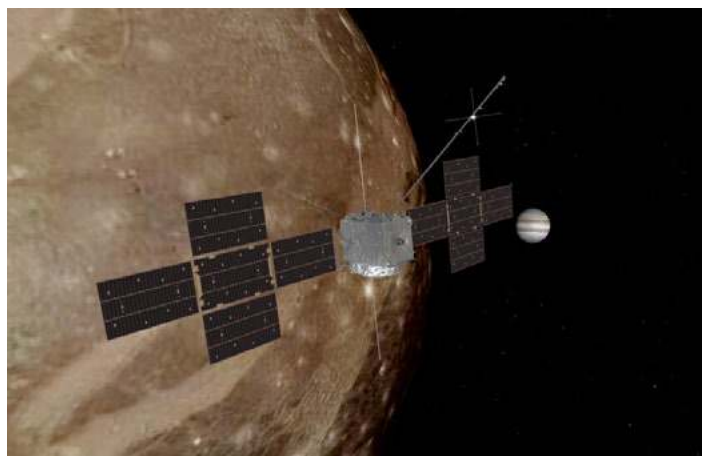
Niestety nasze codzienne doświadczenie nie wskazuje na znaczenie pędu i z „przyzwyczajenia” myślimy o dostarczaniu sondzie kosmicznej energii. I dzieje się tak nawet w dość porządnym tekście popularyzującym problem lotów kosmicznych⁵. W rzeczywistości w warunkach lotów kosmicznych panuje spora obfitość energii. W praktyce panele słoneczne dostarczają niemal dowolną ilość energii. Oczywiście w przypadku sond latających

w miarę blisko Słońca, powiedzmy do pasa głównego planetoid. Tu warto przytoczyć wartość stałej słonecznej w okolicach Ziemi. To przeszło 1360 W/m^2 . Więc nawet przy 10% sprawności kilka metrów kwadratowych baterii słonecznych dostarcza kilkaset watów mocy.

Wprawdzie lecąc na krańce Układu Słonecznego na taką moc nie ma co liczyć. W pobliżu Jowisza stała słoneczna to już tylko kilkadziesiąt watów na metr kwadratowy, ale ze względu na brak grawitacji panele mogą być spore. Np. sonda JUICE lecąca do Jowisza⁶ ma panele słoneczne o powierzchni 85 m^2 . Pada na nie w pobliżu Jowisza ponad 4 kW energii słonecznej więc biorąc pod uwagę sprawność sonda będzie dysponowała stałą mocą kilkuset watów.

Jeżeli dodać, że w przypadku sond lecących na krańce Układu Słonecznego zamontowanie „siłowni jądrowej” nie stanowi problemu to widać, że energii na sondach kosmicznych nie brakuje. Po prostu bierze się pewną ilość materiału promieniotwórczego (najczęściej jakiś związek zawierający pluton 238 o półokresie rozpadu 88 lat; czyli z punktu widzenia lotu w zakresie Układu Słonecznego to stałe źródło energii) i ciepło wynikające z rozpadu jąder generuje prąd elektryczny. Nie jest tego może za wiele, ale gdyby była potrzebna siłownia o mocy kilku czy nawet kilkudziesięciu kilowatów to nie stanowiłoby to wielkiego problemu technicznego. Czyli realnie dostępne są to moce zbliżone do mocy niewielkiego samochodu. Porównajmy to z siłami rzeczywiście generowanymi przez silniki sond kosmicznych.

Jak pisze autor cytowanej pracy⁵ to ... kilka niutonów. I taka siła przy dłuższym działaniu wystarczyłaby na dostarczenie do krańców Układu Słonecznego w ciągu kilku lat. Niewiele więcej niż niuton na tonę sondy oznacza wzrost



³ Bardziej realistycznie przesunie się dużo dalej, ale znacznie mniejsza część planety, co zostanie skompensowane ruchem innych samochodów w innych kierunkach (w tym i tego samego tira, który zakręcając i hamując też wniesie przyczynek do kompensacji „pożyczki” pędu od naszej planety. W sumie może problem i ciekawy, ale w tej chwili niezbyt istotny i sumarycznie można powiedzieć, że pożyczka pędu zostanie na dłuższą metę „splacona” nie powodując żadnych skutków.

⁴ Tu trudno mi tu nie zacytować mojego najwybitniejszego nauczyciela licealnego (biologa, profesora Jana Szopy – zakończył karierę zawodową jako rektor jednej krakowskich uczelni) – ludzie należą do gatunku „homo sapiens” co niektórzy tłumaczą „człowiek myślący” ale w rzeczywistości należałoby to raczej tłumaczyć jako „człowiek sapiący”.

⁵ Przykładem służy tekst P. Berga „Co zmieni napęd jądrowy w raketach”, Polityka 17/23 (19.04, 23) s. 64. W tekście dyskutuje się problemy energii dla pojazdów kosmicznych nie zauważając, że na sondach kosmicznych panuje niemal nieograniczona obfitość źródeł energii.

⁶ D. Castelvelli, Nature t. 616 (2023), s. 420.



Foto – esa.int/ESA

prędkości około sto metrów na sekundę w ciągu doby a rok stałego działania ponad 30 km/s. Przy takich przyspieszeniach latamy do wszystkich obiektów Układu Słonecznego bez zawracania sobie głowy „asystami grawitacyjnymi” i żadna misja nie trwa powyżej dziesięciolecia, chyba, że czas badań po dotarciu na miejsce będzie długi. Niestety jednak tak duże siły są dostępne bardzo krótko – o rocznej pracy z generacją siły jednego niutona możemy jedynie pomarzyć.

Bardziej obiecująco wygląda perspektywa lotów kosmicznych, gdyby dysponować jakimś kawałkiem autostrady. Np. gdyby na Księżycu mieć szynę, na której można by sondę przyspieszać, to szyna o długości około 1000 kilometrów i przyspieszenie rzędu $30 - 40 \text{ m/s}^2$ wystarczy do uzyskania prędkości wystarczającej do opuszczenia Układu Słonecznego. To ostatnie pod warunkiem wykorzystania prędkości Ziemi i Księżyca.

W przypadku „autostrady na Księżycu” oczywiście mamy dowolną ilość pędu – szyna pozwala na odebranie naszemu satelicie jego potrzebną ilość. Wydatek energetyczny, aby to osiągnąć odpowiada kilkunastu litrom paliwa na kilogram masy sondy. Wystarczy przyspieszyć sondę do takiej prędkości by w pobliżu docelowego ciała prędkość była na tyle niewielka by konwencjonalny silnik rakietowy umożliwił manewrowanie sondą w układzie tego ciała. Tak więc, gdy mamy do dyspozycji odpowiednią ilość pędu loty kosmiczne wydają się bardzo łatwe i względnie tanie.

Teraz więc spróbujemy ocenić koszty zdobycia pędu w przestrzeni kosmicznej. W najprostszym modelu wystarczy oszacować pojedynczy impuls silnika (układu) zachowującego pęd i energię. Powiedzmy sonda o masie m_1 wyrzuca „paliwo” o masie m_2 z prędkością v_2 . Oczywiście zachodzi równanie (*) w którym nieznaną wielkością jest prędkość uzyskana przez sondę v_1 .

Wyliczając tę prędkość możemy wyliczyć stosunek energii kinetycznych zyskanej przez sondę i uniesionej przez paliwo.

$$E_1/E_2 = m_1/m_2$$

A więc energie uzyskane przez rozważane ciała są w odwrotnym stosunku do ich mas. Inaczej mówiąc sonda o masie tony wyrzucająca w celu uzyskania odrzutu kilogramową masę paliwa, dzieli się z tym paliwem energią kinetyczną tak, że paliwo unosi jej tysiąc razy więcej niż uzyskuje sonda. W praktyce masa materii odrzutowej jest dużo mniejsza niż promil masy sondy i z energetycznego punktu widzenia napęd rakietowy jest skrajnie nieefektywny. Albo jeszcze inaczej – energia nie ma żadnego znaczenia przy napędzie sond kosmicznych.

Tym co decyduje o możliwościach manewrowania jest wyłącznie masa materii odrzutowej (przeznaczona do uzyskania odrzutu). Jeżeli nią dysponujemy to możemy manewrować. Gdy masa się kończy żadna ilość energii nie jest w stanie zmienić prędkości sondy⁷. Dodajmy niezależnie czy chodzi o zmianę wartości czy tylko kierunku tej prędkości. Brak masy odrzutowej powoduje próby uzyskania tej masy w trakcie lotu. Jednak praktycznie jest to niemożliwe – pomysł pobierania materii międzyplanetarnej jest nie do zrealizowania. Po prostu tej materii jest niewiele a na dodatek ma względem sondy sporą prędkość i pobranie jej wiąże się z dużymi stratami pędu.

W praktyce jedyną materią dostępną w przestrzeni międzyplanetarnej jest promieniowanie słoneczne. Jak już wspomniano jest go dużo, ale ma minimalny pęd. Warto zauważyć, pęd światła (promieniowania elektromagnetycznego) jest opisany wzorem

$$p = E/c$$

To bardzo niewielka wartość. Np. strumień światła niosący moc jednego kilowata na metr kwadratowy dostarcza siły około $3 \cdot 10^{-6} \text{ N/m}^2$. A więc by uzyskać niuton siły potrzeba powierzchni trzydziestu hektarów! Do kilometra kwadratowego to samo światło dostarczyłoby gigawat mocy! Wprawdzie siłę można podwoić przez odbicie tego światła, ale to dalej tylko dwa niutony.

Podsumowując powyższe rozważania zauważamy, że doświadczenia ziemskie są często dosyć nietypowe. Wprawdzie fizyka, taka jaką znamy ze szkoły, to fizyka „w sytuacji ogólnej” czyli takiej jaka panuje w przestrzeni kosmicznej, ale ludzka intuicja z zasady tworzy się na doświadczeniu codziennym. Powoduje to, często nieświadome, przenoszenie codziennych doświadczeń na sytuację, gdy rzeczywistość ma nieco inne własności. Tak właśnie jest z problemem energii i pędu w przestrzeni kosmicznej. I to może nie jest zbyt dziwne. Gorzej, że takie nieuprawnione „przenoszenie intuicji” dotyczy popularyzatorów i popularyzacji nauki. A to jak widać zdarza się dość często.

Jerzy Kuczyński
Akademia Śląska

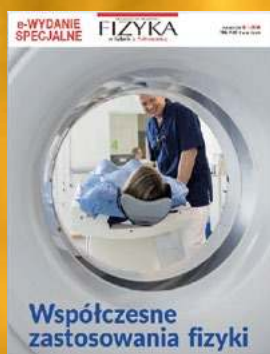
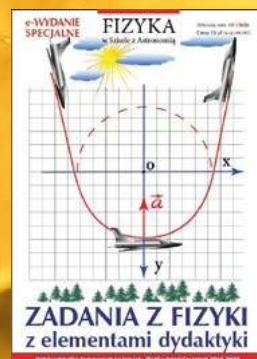
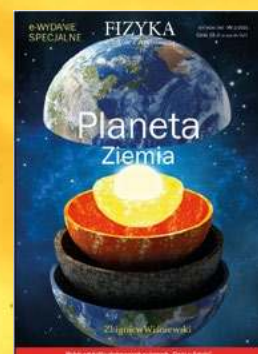
⁷ Warto zauważyć, że ciekawym sposobem przyspieszania sondy byłoby „ostrzeliwanie” jej naładowanymi cząstkami, tak by cząstki te wpadały w pole elektryczne związane z sondą tak ukształtowane by odbijać te cząstki w wybranym kierunku. W ten sposób można by uzyskać siłę działającą w dość dowolnym kierunku. Oczywiście źródłem tych cząstek mógłby być akcelerator umieszczony np. na Księżycu, a więc nie mający problemów z brakiem pędu.

Cyfrowe wydania specjalne

Fizyki w Szkole

Tylko w wersji PDF!

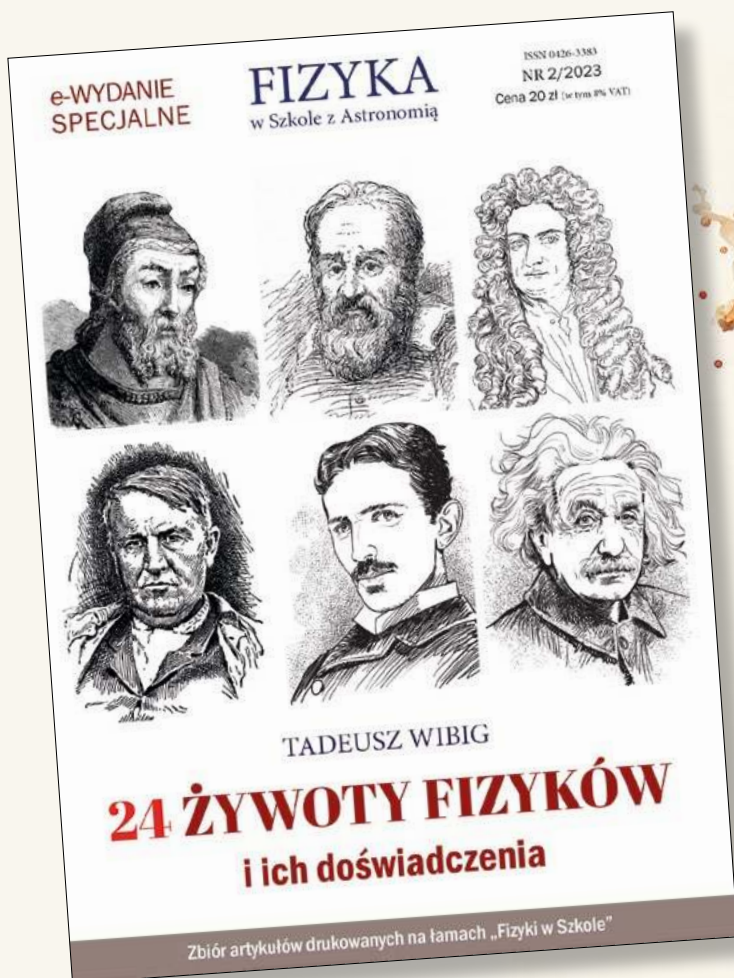
Już od 10 zł!
Wysyłamy na adres
mailowy!



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

eprasa.pl 2ffc4f32b7

Wielcy fizycy i ich doświadczenia



- ✓ **Od Archimedesesa po Einsteina**
- ✓ **Najważniejsze odkrycia**
- ✓ **24 wybitnych postaci**

**Cena
20 zł**
(w tym 8% VAT)



**WYDANIE SPECJALNE FIZYKI W SZKOLE
W WERSJI ELEKTRONICZNEJ – PLIK PDF**

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

eprasa.pl 2ffc4f32b7