

# FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

374 (LXIV) indeks 35810X Nr 3 maj/czerwiec 2021 CENA 30,00 zł (w tym 8% VAT)

Czy promieniowanie  
tylko szkodzi?

Czy turbulencje  
są niebezpieczne?

Tunele i metody  
doświadczalne  
w aerodynamice

Równania  
kwadratowe  
w zadaniach

ZDERZENIA  
ZYKŁE  
I NIEZWYKŁE

Stany skupienia

# CIAŁA STAŁE



Zywoty fizyków  
Izaak Newton



# Wakacyjna obniżka cen!



ROCZNIK 2020

**75% taniej**

ROCZNIKI STARSZE

**80% taniej**

(oferta ważna do wyczerpania zapasów)

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

eprasa.pl 95a838c450

## Drodzy Czytelnicy!

**Z**wielką przyjemnością oddajemy Państwu kolejny numer „Fizyki w Szkole”. Jest to z całą pewnością numer wakacyjny, więc na samym wstępie składam Państwu życzenia udanego wypoczynku. Mamy nadzieję, że mimo natłoku rozrywek znajdzie Państwo czas na lekturę naszego czasopisma.

Co mogą Państwo znaleźć na jego łamach? Na samym początku artykuł Wioletty Moniki Dynkowskiej pod tytułem „Czy promieniowanie tylko szkodzi?”, poświęcony zagadnieniu wpływu małych dawek na organizm człowieka. Autorka prezentuje w nim mało znany fakt, że ekspozycja na umiarkowane dawki promieniowania niejako hartuje ludzki układ odpornościowy, co ma pozytywny wpływ na zdolności organizmu do zwalczania chorób nowotworowych.

Następnie znajdą Państwo artykuł Grzegorza Karwasza poświęcony ciałom stałym. Wiek dwudziesty w fizyce często bywa nazywany erą ciał stałego. Ma to związek z rozwojem techniki mikroprocesorowej, choć nie tylko. W XX wieku opracowano całą gamę nowych materiałów oraz ulepszono technologię otrzymywania starych. Jak wyglądają nowoczesne materiały w skali atomowej? Tego dowiedzą się Państwo z wspomnianego artykułu.

Kolejny artykuł Marty Waclawczyk poświęcony jest turbulencjom. Czy wiedzą Państwo, że turbulencjami zajmował się już Leonardo da Vinci? Oczywiście nie zajmował się on turbulencjami w samolotach, lecz innymi. Turbulencje są bowiem wszechobecne, można je obserwować wszędzie tam, gdzie występuje przepływ jakiegokolwiek substancji. Są one jednak dość trudne do kontrolowania i nieodłącznie wiążą się z zagadnieniami chaosu deterministycznego. Można je jednak modelować i badać przy użyciu średniej klasy domowego PC.

Omówiłem tylko trzy pierwsze artykuły, a w naszym czasopiśmie jest ich znacznie więcej.

Kończąc tradycyjnie życzę udanej lektury.

W imieniu redakcji

**Zbigniew Wiśniewski**



### 4 Czy promieniowanie tylko szkodzi? | Wioletta Monika Dynkowska

Nie jest tajemnicą, że największą obawę w ludziach budzi to, co niewidzialne. Tak właśnie jest z promieniowaniem...

## Fizyka wczoraj, dziś, jutro

### 8 Cztery i pół stanów skupienia. Cz. IV. Ciała stałe | Grzegorz Karwasz

„Ciała stałe mają określoną objętość i określony kształt. Dzielą się na sprężyste, plastyczne i kruche. I na – krystaliczne i amorficzne.” Tyle pamiętam ze szkoły. I przez czterdzieści lat w różnych laboratoriach naukowych skrupulatnie to sprawdzałem. Mniej więcej się zgadza.



### 14 Egzotyczny stan materii | Redakcja

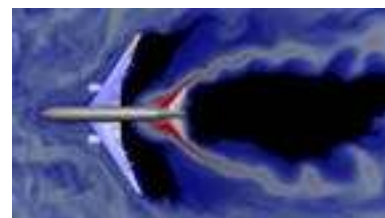
### 15 Czy turbulencje są niebezpieczne?

| Marta Waclawczyk

### 18 Metody doświadczalne w aerodynamice

| Andrzej Wasiaś

Zaprojektowanie współczesnego samolotu wymaga dokładnych i długotrwałych badań tunelowych.



### 22 110-lecie odkrycia nadprzewodnictwa

| Kazimierz Mikulski

## Z naszych lekcji

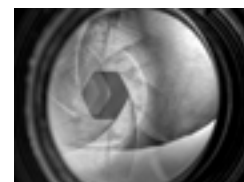
### 30 Zderzenia zwykłe i niezwykle | Stanisław Bednarek

### 35 Żyoty fizyków – Isaac Newton (1742/43-1727) | Tadeusz Wibig

### 38 Kwadratowe równania w zadaniach z fizyki | Czesław Surowiec

### 41 O głębi ostrości i czytaniu bez okularów | Waldemar Reńda

### 43 Rekonstrukcja formuły Einsteina opisującej zjawisko fotoelektryczne. Propozycja dydaktyczna | Andrzej Sokołowski



## Astronomia dla każdego

### 46 Kompendium astronomiczne. Cz. 3. | Piotr Gronkowski, Maciej Wesolowski



**FIZYKA**  
w Szkole z Astronomią

NUMER 3 MAJ/CZERWIEC 2021  
374 (LXIII) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 30,00 zł  
(w tym 8% VAT)

**Komitet redakcyjny** Krystyna Jabłońska-Ławniczak, Jerzy Kreiner, Andrzej Majhofer (Przewodniczący Komitetu), Zygmunt Mazur, Andrzej Szymacha, Mirosław Trociuk  
**Redakcja** Zbigniew Wiśniewski (redaktor prowadzący – fizykc@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-2020/, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244 **Reklama** Jędrzej Chodakowski, jchodakowski1953@gmail.com **Skład i łamanie** ScanSystem.pl Ewa Szetayńska **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.

# Czy promieniowanie tylko szkodzi?

Nie jest tajemnicą, że największą obawę w ludziach budzi to, co niewidzialne. Tak właśnie jest z promieniowaniem, które to zjawisko fascynuje ludzkość od dziesiątków lat. Dokładniej od momentu, gdy małżonkowie Curie wspólnie z Henri Becquerellem stwierdzili istnienie nieopisanej dotąd siły – no bo jak wiedzieć, że coś istnieje, skoro tego nie widać?... – i następnie opisali zjawisko promieniotwórczości, w roku 1903 otrzymując za całokształt prac Nagrodę Nobla.

Wioletta Monika Dynkowska

Od tamtego czasu starano się wykorzystać niesamowite właściwości promieniowania w różnych dziedzinach życia. Stosujemy go w diagnostyce medycznej, w tym stomatologicznej, w leczeniu wielu schorzeń, głównie nowotworowych. W tym aspekcie życia zastosowanie promieniowania jonizującego przyniosło ludzkości wiele korzyści. Promieniowanie rentgenowskie stosowane jest przy prześwietlaniu bagażu na przejściach granicznych, lotniskach, itp. Z promieniowania jonizującego korzysta energetyka, przemysł, badania naukowe i szereg innych obszarów działalności człowieka, których nie sposób wymienić jednym tchem.

Wydawać by się mogło, że postęp naukowy i rozwój technologiczny spowodował, że o promieniowaniu wiemy już naprawdę dużo i bez zbędnych obaw powinniśmy je zaakceptować jako stały element naszego życia. Pomimo tego, promieniowanie jonizujące nadal fascynuje – ale i w równym stopniu przeraża, jak wszystko, czego nie można dotknąć, zobaczyć, poczuć. Wiemy, że jest – ale go nie widzimy.

## Moda na promieniotwórczość

A przecież swego czasu ludzie zachłysłeni się promieniotwórczością i korzystali z jej dobrodziejstw w ogromnym stopniu. To trudne do uwierzenia, ale niedługo po odkryciu radu i ogłoszeniu – wydawać by się mogło – jego dobroczynnego działania, pito wodę destylowaną z dodatkiem jonów tego pierwiastka –  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{228}\text{Ra}$  (jako pierwiastek należący do metali alkalicznych nie występuje w stanie wolnym, jedynie w postaci jonów dwudodatnich), tzw. „Eliksir Baileya”; groty i sztolnie stały się jednymi z najbardziej atrakcyjnych miejsc pobytu jako „radowe inhalatornie”.

W latach dwudziestych ubiegłego stulecia niejako „na czasie” było noszenie zegarków ze świecą tarczą; do malowania tarcz stosowano farby zawierające izotop radu. Dopiero po wielu latach opisano zjawisko „szczęki radowej”; specyficzną postać nowotworu kości szczęk i żuchwy, charakteryzującą się podobieństwem kości do gąbki; nietrudno wywnioskować, że w tak osłabionej szczęce nie mogły pozostać zęby. Ten problem zdrowotny dotyczył kobiet pracujących przy malowaniu tarcz zegarków; aby wykonać cieniutkie linie pracownice często formowały ustami końcówkę pędzelka.

Dziś taka sytuacja z punktu widzenia ochrony radiologicznej wydaje się nam nieprawdopodobna, każdy szanujący się inspektor ochrony radiologicznej przekazałby swoje uwagi do odpowiedniej instytucji, a ta nałożyłaby wysokie mandaty i zamknęła zakład.

Promieniowanie rentgenowskie stosowano przy produkcji butów, dziś zapewne powiedzielibyśmy – spersonalizowanych! W sklepie obuwniczym, który zarazem był pracownią szewską, potencjalny nabywca buta mierzył wybrany model obuwia, następnie aparatem rentgenowskim wykonywano zdjęcie w celu obejrzenia, w jakim stopniu bucik dopasowany jest do stopy kupującego, by finalnie po niewielkich poprawkach nabywca butów był niezmiernie szczęśliwy, że ma wreszcie buciki idealnie pasujące do jego sylwetki. Oczywiście zadowolenie klienta przekładało się na popularność zakładu, niestety niekoniernie na zdrowie pracujących tam szewców.

### Strach po Hiroszynie

W 1945 roku po niszczycielskich atakach na Hiroszimę (6.08) i Nagasaki (9.08) słowo „promieniowanie” zaczęło wzbudzać powszechną grozę, dodatkowo potęgowaną wypadkami jądrowymi: Windscale (Wlk.Brytania) 7.12.1957 r.; Kysztym (ZSRR, ob. Rosja) zima 1957/1958; Three Miles Island (USA) 28 marca 1979 r.; Czarnobyl (ZSRR, ob. Ukraina) 26.04.1986 r.; Goiânia (Brazylia) 13.08.1987 r.; Fukushima (Japonia) 11.03.2011 r. oraz próbami nuklearnymi. Tereny: Wyspy Marshalla: Atol Bikini, czerwiec-lipiec 1946, luty-maj 1954; Atol Eniwetok, kwiecień-maj 1948, kwiecień-maj 1951, październik-listopad 1952; Stany Zjednoczone: poligony Nevada Test Site; Związek Radziecki: poligon Semipalatyńsk. Skutki tej swoistej fobii społeczeństwo odczuwa do dziś, niestety wciąż brak jest na dużą skalę rzetelnej edukacji w zakresie promieniowania jonizującego a braki teży wiedzy są cynicznie wykorzystywane przez osoby szukające wątpliwej jakości poklasku poprzez wysyłanie nieprawdziwych wiadomości (tzw. „fejków”, „fake-newsów”) mających za zadanie wzbudzenie powszechnego strachu.

A jak to jest w rzeczywistości? Od 1959 roku w ochronie radiologicznej obligatoryjnie przyjmuje się zasadę, że skutki napromienienia organizmu i wynikające z tego konsekwencje zdrowotne w stosunku do wartości dawki promieniowania mają charakter liniowy. Wynika to z założenia, że każdy akt jonizacji powoduje zwiększenie prawdopodobieństwa, że komórka zdrowa przekształci się w komórkę nowotworową.

Ogromne znaczenie ma jakość promieniowania (alfa, beta, neutronowe czy gamma), wysokość dawki promieniowania oraz czas ekspozycji organizmu na promieniowanie. Z najgroźniejszą sytuacją mamy do czynienia, gdy na organizm działa w krótkim czasie wysoka dawka (> 1Sv) promieniowania, a dodatkowo ulegnie on skażeniu wewnętrznemu. Skutki takiego narażenia mogą być opłakane, gdyż uszkodzenia organizmu rozpoczynają się na poziomie komórkowym (Fizyka w Szkole, 1/2021).

Bez wątplenia wysokie dawki promieniowania są bardzo niebezpieczne dla organizmów żywych, niechlubnym przykładem jest wybuch IV reaktora w Czarnobylskiej

Elektrowni Jądrowej, w wyniku którego śmierć poniosło wielu pracowników elektrowni a także strażaków walczących z pożarem i innych osób, pracujących nad zapewnieniem bezpieczeństwa ludności przebywającej w promieniu kilkudziesięciu kilometrów od miejsca wypadku.

### Mała dawka, mały problem?

O ile znane są skutki oddziaływania dużych dawek promieniowania jonizującego na żywą komórkę, to nadal brak jest jednoznacznej oceny oddziaływania niskich dawek. Przez niskie dawki rozumiemy dawki z zakresu od 5 mSv do około 100–200 mSv dla promieniowania rentgenowskiego i gamma (granice nie są ściśle określone). Temat istnienia zjawiska hormezy radiacyjnej od wielu lat jest przedmiotem żarliwych dyskusji. Zjawisko hormezy polega na korzystnym działaniu na organizm czynnika występującego w przyrodzie, zaaplikowanego w niewielkich dawkach, a który w większych dawkach jest szkodliwy dla organizmu. W kontekście tego zjawiska nawiązuje się do słynnego dogmatu Paracelsusa, w którym działanie toksycznej substancji determinowane jest jej dawką. Jednakże, czy – podobnie jak w przypadku substancji chemicznych – można mówić o dobroczynnym działaniu niewielkich dawek promieniowania na organizmy?

Wiek Ziemi szacowany jest na około 4,54 mld lat. Skorupa ziemska zawiera w swoim składzie pierwiastki promieniotwórcze, między innymi izotopy uranu – głównie  $^{238}\text{U}$  z bardzo niewielką domieszką  $^{235}\text{U}$  i śladami  $^{234}\text{U}$  – jako złoża uraninitu, karnotyty, blendy uranowej. Innymi pierwiastkami promieniotwórczymi obecnymi w skorupie ziemskiej podczas początkowej fazy jej istnienia były neptun  $^{237}\text{Np}$  i  $^{239}\text{Pu}$ , produkty rozpadu promieniotwórczego izotopów uranu.

Obecnie znanych jest około 30 radionuklidów, których czas połowicznego rozpadu oszacowano na dłuższy, niż wynosi wiek Ziemi. Mówiąc ogólnie, izotopy te są „starsze niż świat”. Obecność pierwiastków promieniotwórczych w skorupie ziemskiej, a także w atmosferze ziemskiej, gdzie część radionuklidów powstała na skutek oddziaływania promieniowania kosmicznego z substancjami tworzącymi



Hiroszima – Park Pokoju. Foto – Dreamstime

atmosferę ziemską powoduje, iż cały czas mamy do czynienia z istnieniem promieniowania tła. W związku z tym występuje trwałe narażenie organizmów żywych na niewielkie dawki promieniowania. Wydawać by się mogło, że taki stan rzeczy wywoła szybkie wyginięcie życia na Ziemi, gdyż wskutek działającego promieniowania jonizującego rozwój żywych komórek może zostać zaburzony i tym samym nie będzie możliwości dalszego podziału komórkowego ani rozwoju tkanek i w efekcie organizmów.

Naturalnym więc wydaje się, że w wyniku ewolucji komórki organizmów żywych wytworzyły mechanizmy naprawcze, dzięki czemu uszkodzenia komórek wynikające z działania promieniowania jonizującego są automatycznie naprawiane i nie dochodzi do powstawania nowotworów. Rzeczywiście, uszkodzenia żywej komórki są likwidowane przez systemy naprawcze, ponieważ promieniowanie jonizujące wywołuje powstanie w komórce reaktywnych form tlenu (RFT), przed którymi organizmy żywe potrafią się bronić, mając ku temu swoje „narzędzia”, w postaci enzymów takich jak peroksydazy (POX), dysmutaza ponadtlenkowa (SOD), katalaza (CAT).

Dotychczas prowadzone badania nad wpływem niskich dawek promieniowania jonizującego dowodzą, że istnieje zależność pomiędzy zmniejszonym tłem promieniowania a tempem namnażania się pantofelków, tempem wzrostu organizmów roślin (rzodkiewka) czy zwierząt (szczur). Ponadto zaobserwowano nieznaczne wydłużenie długości życia (myszy) oraz przyspieszenie kiełkowania nasion w sytuacji zwiększonego tła radiacyjnego. Wyniki tych badań dowodzą, że promieniowanie jonizujące jest istotnym czynnikiem dla wzrostu i rozwoju żywych organizmów. Co więcej, po analizie raportów powstałych po wypadkach jądrowych stwierdzono, że nie ma konkretnych przesłanek, jakoby w wyniku niewielkich dawek promieniowania istotnie zwiększyła się zapadalność na nowotwory.

## Hormeza radiacyjna i autofagia

Przez wiele lat stawiano pytanie, jakimi zasadami miałyby rządzić się hormeza radiacyjna. W wyniku badań wyodrębniono trzy główne mechanizmy: pobudzenie podziałów komórkowych, zjawisko autofagii i odpowiedź radioadaptacyjna. We wszystkich trzech przypadkach szczególną rolę odgrywają RFT.

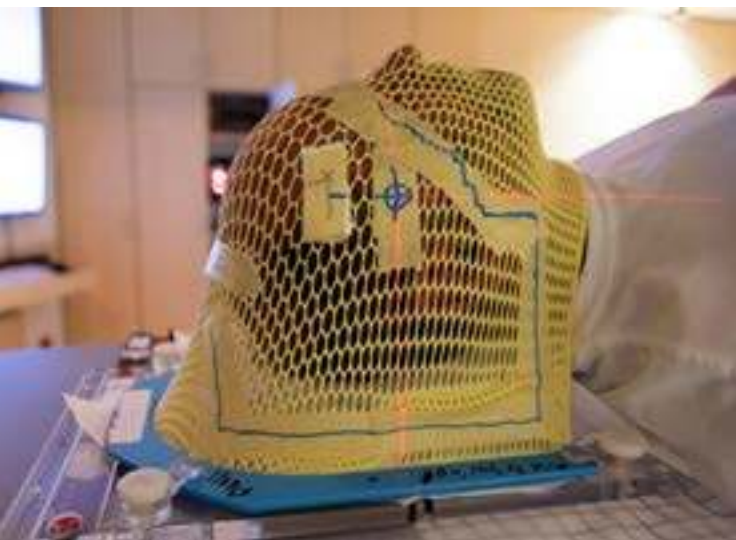
Pobudzenie podziałów komórkowych jest odpowiedzią na działanie RFT i skutkuje namnażaniem się komórek. Przyczynę upatruje się w wyższej niż normalna zawartości wolnych rodników, których poziom stabilizuje się po dokonaniu podziału komórkowego. Taki stan trwa dość krótko, bo raptem do trzech cykli podziałów. Jednakże w tym aspekcie kontrowersje wywołuje fakt, że nadmierny, niekontrolowany podział komórek to typowy objaw powstawania nowotworu.

Autofagia z kolei jest procesem adaptacji komórki do różnych warunków stresowych (niedobór składników odżywczych, uszkodzenia oksydacyjne, błędy translacyjne i strukturalne białek). Zjawisko to obecne jest tam, gdzie zachodzi konieczność usunięcia uszkodzonych organeli komórkowych i polega na otoczeniu makrocząsteczek, pęcherzyków endosomowych lub organeli błoną z wytworzeniem pęcherzyka (autofagosomu), który następnie ulega fuzji z lizosomem, tworząc autolizosom. Tam następuje degradacja zawartości do składników niskocząsteczkowych, które mogą być przez komórkę wykorzystane do syntezy potrzebnych makrocząsteczek. Pozornie proste, jednak w rzeczywistości proces ten jest niezwykle złożony.

Badania wykazały, że autofagia może być indukowana przez RFT a hamowana przez antyoksydanty – związki zdolne do usuwania RFT, np. glutation, tioredoksyna czy wspomniane już wcześniej SOD i CAT. Indukcja tego procesu może zostać zainicjowana przez działanie promieniowania jonizującego, przez co uznany on został jako mechanizm popromiennych efektów hormetycznych.



Eksplozja nuklearna przeprowadzona przez wojsko USA na atolu Bikini w Mikronezji 25 lipca 1946 r. Foto – Wikimedia Commons



Maska używana w radioterapii komórek rakowych w mózgu. Foto – Dreamstime

Odpowiedź radioadaptacyjną obserwuje się wówczas, gdy początkowo komórki poddane są bardzo niskim dawkom promieniowania jonizującego, a następnie narażone są na wysoką dawkę. W efekcie w komórkach wstępnie naświetlonych stwierdza się mniej uszkodzeń genetycznych niż w komórkach, które nie były wcześniej ekspozycje na promieniowanie jonizujące. Efekt ten przypisuje się indukcji mechanizmów naprawczych przez ekspozycję na niskie dawki.

Badania ostatnich lat wskazują na występowanie tzw. „efektu widza” („bystand effect”). Polega on na tym, że nie tylko DNA komórki napromienionej jest głównym czynnikiem narażonym na działanie wolnych rodników, ale również istnieje oddziaływanie pomiędzy komórkami poddanymi promieniowaniu jonizującemu, a tymi, które napromienione nie były. Zaobserwowano, że zmiany pod wpływem promieniowania jonizującego zachodziły nie tylko w komórkach napromienionych, ale również w tych nie poddanych działaniu promieniowania jonizującego.

Wy tłumaczeniem tego zjawiska jest sygnaling komórkowy, czyli wyzwolenie komórkowego systemu komunikacyjnego w celu regulacji mechanizmów adaptacyjnych i obronnych komórek. W komórkach, które nie były napromienione bezpośrednio stwierdzono wzrost poziomu niektórych białek naprawczych (endonukleazy AP), natomiast w komórkach napromieniowanych bezpośrednio ilość tych białek była niezmienną. Wcześniej odnotowano za to spadek poziomu czynnika TP53 w komórkach oraz wzrost wewnątrzkomórkowych RFT. Czynniki TP53 pełni rolę wyzwalacza systemu naprawczego w komórce lub induktora apoptozy, w zależności od stopnia uszkodzeń komórki. Badania wykazały również, że adaptacyjna, niska dawka promieniowania, dostarczona kilka godzin wcześniej, zniwelowała mniej więcej połowę efektu widza.

### Efekt Yonezawy

Ostatnie doniesienia wskazują na istnienie efektu dawki poprzedzającej, znanego również jako efekt Yonezawy. Jest to obraz adaptacji na niskie, zawarte w przedziale 0,05–0,5 Gy dawki promieniowania rentgenowskiego.

Stwierdzono, że potraktowanie myszy niskimi dawkami promieniowania rentgenowskiego skutkowało nabytą odpornością na wyższe dawki promieniowania. Efekt odpornościowy utrzymywał się do 2,5 miesiąca po ekspozycji zwierzątka na niskie dawki i zależał od wielkości dawki wcześniejszego napromienienia.

Wielkość tła promieniowania jonizującego w Polsce wynosi około 2,4 mSv rocznie, dodatkowo wskutek narażenia na promieniowanie jonizujące ze sztucznych źródeł (m.in. wskutek diagnostyki medycznej) przeciętny mieszkaniec Polski w ciągu roku otrzymuje dawkę promieniowania około 3,6 mSv. W porównaniu z mieszkańcami miejscowości Ramsar (Iran), Guarapari (Brazylia) czy Lodeve (Francja) jest to naprawdę niewiele. Przykładowo – w Iranie średnią roczną dawkę promieniowania szacuje się na 260 mSv, czyli ponad 100-krotnie wyższą niż wynosi tło promieniowania w Polsce. A mimo to nie stwierdzono tam zwiększonej częstości występowania chorób nowotworowych. Czyżby więc sympatycy teorii hormezy radiacyjnej mieli rację? Tymczasem zasada bezprogowej liniowej zależności prawdopodobieństwa zapadalności na nowotwory od wielkości dawki promieniowania jonizującego skutkuje generowaniem ogromnych kosztów na ochronę przed promieniowaniem, nawet jeśli w praktyce dotyczy to bardzo niewielkich dawek. Kto więc ma rację?

Teoria hormezy radiacyjnej wciąż wzbudza wiele kontrowersji, pomimo iż jak dotychczas nie ma niepodważalnych dowodów na szkodliwe działanie niskich dawek promieniowania. Więcej tu pytań, niż odpowiedzi, a dowody naukowe nie dają jednoznacznego obrazu świadczącego o tym, że niewielkie dawki promieniowania nie są szkodliwe.

Dr Wioletta Monika Dynkowska

Zakład Biochemii i Fizjologii Roślin Instytut Hodowli i Aklimatyzacji Roślin – PIB w Radzikowie

### LITERATURA:

- [1] Calabrese EJ. 2013. Hormetic mechanisms. *Critical Reviews in Toxicology*, 43(7):580-606. <https://doi.org/10.3109/10408444.2013.808172>.
- [2] Dobrzyński L, Fornalski KW, Reszczyńska J. 2016. Ryzyko zdrowotne związane z niskimi dawkami promieniowania jonizującego. *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna*, 1:13-16.
- [3] Fornalski KW, Dobrzyński L, Janiak MK. 2011. Stochastyczny model odpowiedzi komórek na promieniowanie. *Postępy Techniki Jądrowej*, 54(3):23-37.
- [4] Inhaber, H. 2000. Are we paying too much to reduce radiological risk? *Transactions of the American Nuclear Society*, 46:269-270. <https://doi.org/10.3320/1.2766157>.
- [5] Jaworowski Z. 1997. Dobroczynne promieniowanie. *Wiedza i Życie*, 3:20-29.
- [6] Jolly D, Meyer J. 2009. A brief review of radiation hormesis. *Australasian Physical & Engineering Sciences in Medicine*, 32(4):180-7. <https://doi.org/10.1007/BF03179237>.
- [7] Kraska A, Bilski B. 2012. Narażenie pracowników ochrony zdrowia na promieniowanie jonizujące a teoria hormezy radiacyjnej. *Medycyna Pracy*, 63(3):371-376.
- [8] Marín A, Martín M, Liñán O, Alvarenga F, López M, Fernández L, Büchser D, Cerezo L. 2015. Bystander effects and radiotherapy. *Reports of Practical Oncology & Radiotherapy*, 20(1):12-21. <https://doi.org/10.1016/j.rpor.2014.08.004>.
- [9] Sanders CL. 2017. Radiobiology and Radiation Hormesis. *New Evidence and its Implications for Medicine and Society*. Springer, Cham (1<sup>st</sup> ed.) <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56372-5>.
- [10] Scherz-Shouval R, Elazar Z. 2011. Regulation of autophagy by ROS: physiology and pathology. *Trends in Biochemical Sciences*, 36(1):30-38. <https://doi.org/10.1016/j.tibs.2010.07.007>.
- [11] Sommer S. 2015. Ryzyko niskich dawek promieniowania a ochrona radiologiczna. *Bezpieczeństwo Jądrowe i Ochrona Radiologiczna*, 4:33-38.
- [12] Szumiel I. 2012. Hormezya popromienna: autofagia i inne mechanizmy komórkowe. *Postępy Techniki Jądrowej*, 55(1):7-15.
- [13] Yonezawa M. 2006. Induction of radio-resistance by low dose X-irradiation. *Yakugaku Zasshi*, 126(10):833-40. Japanese. <https://doi.org/10.1248/yakushi.126.833>.
- [14] Zdrojewicz Z, Szlagor A, Wielogórska M, Nowakowska D, Nowakowski J. 2016. Wpływ promieniowania jonizującego na organizm człowieka. *Family Medicine & Primary Care Review*, 18(2):174-179. <https://doi.org/10.5114/fpcpr/43945>.

## Cztery i pół stanów skupienia. Cz. IV

# Ciała stałe

„Ciała stałe mają określoną objętość i określony kształt. Dzielią się na sprężyste, plastyczne i kruche. I na – krystaliczne i amorficzne.” Tyle pamiętam ze szkoły. I przez czterdzieści lat w różnych laboratoriach naukowych skrupulatnie to sprawdzałem. Mniej więcej się zgadza. Ale tylko mniej więcej. Artykuł ten, prawie, prawie kończy serię o stanach skupienia.

Grzegorz Karwasz

### Struktura krystaliczna

Najważniejsza cecha ciał stałych, w odróżnieniu od cieczy, to ich struktura krystaliczna, zwana też strukturą uporządkowania dalekiego zasięgu. Innymi słowy, struktura powtarzalności elementarnej, matematycznej komórki. Dlaczego matematycznej? Bo z tzw. oglądem fizycznym tzw. klasy krystalograficzne niewiele mają wspólnego. O tym za chwilę.

Najważniejsze do podkreślenia jest, że struktura krystaliczna dotyczy wszystkich, no – prawie wszystkich ciał stałych, metale włączając. Ale dla metali tę strukturę najtrudniej zobaczyć „gołym okiem”, bo są to mikro-kryształy. Można, oczywiście, wyhodować makro-kryształy metali, ale jest to procedura kosztowna. Dla krzemu – znakomicie opanowana. Wałki o średnicy 20 cm i więcej hoduje się tzw. metodą Czochralskiego.

Anegdota mówi, że w swym laboratorium w Berlinie przysnął on kiedyś za biurkiem i włożył stalówkę pióra nie do kałamarza, ale do roztopionej cyny. Wyciągnął się długi wąż, ale miał na tyle intuicji fizycznej, by włożyć ten wąż pod wiązkę promie-

niowania Röntgena – był to piękny mono-kryształ. 95% światowego krzemu jest wytwarzane metodą Czochralskiego. I z tego powodu jego nazwisko jest w literaturze naukowej częściej wymieniane niż Kopernika.

Kowalność metali wynika właśnie z ich struktury mikro-krystalicznej. Bardzo czyste żelazo w moich szkolnych czasach nazywało się „armco”, od nazwy firmy, która je (nadal) produkuje. Jest ono prawie tak plastyczne jak czysta miedź (o definicjach plastyczności dalej).

Wracając do kryształów metali – makroskopowe monokryształy Zn są widoczne na ocynkowanych stalowych barierkach, blachach, listwach (ryc. 1c). Wiele ciał jest klasyfikowanych jako „bezpостaciowe” a szkło nazywane jest przezchłodzoną cieczą. Jest to prawda tylko częściowo. W szkle też można doszukać się pewnego uporządkowania długo-zasięgowego, jak w kryształach.

Najlepiej różnicę między kryształem kwarcu  $\text{SiO}_2$  i kwarcowym szkłem pokazują rysunki z Wikipedii (ryc. 2a i 2b). W szkle regularna sieć  $\text{SiO}_2$  jest jakby rozdęta. To dodane jony, np. sodu i potasu rozdymają tę sieć. Dla technologa – obniżają temperaturę topnienia: z 1670 °C dla

kwarcu do nawet poniżej 1000°C dla szkła z domieszką  $\text{Na}_2\text{O}$  i  $\text{CaO}$ . Ile tej domieszki? Rzymianie robili to nieco na „oko”. Zresztą z Egiptu sprzed trzech i pół tysiąca lat pochodzą pierwsze szklane wyroby: popiół z ogniska ułatwiał topienie się piasku.

Co odróżnia ciała amorficzne od krystalicznych to brak ścisłej granicy temperatury między cieczą a ciałem stałym. Wykres zmian temperatury topniejącego lodu jest absolutnie niezmienny – zatrzymuje się na 0°C, dopóki cały lód nie stopi się. Natomiast szkła (i polimery, i miód) zaczynają „mięknąć” w temperaturach znacznie niższych niż zadeklarowana temperatura topnienia. Przyczyna wynika jasno z porównaniu dwóch struktur na rys. 2: wiązania (czyli siły oddziaływania) w strukturze amorficznej nie są wszędzie identyczne i struktura staje się plastyczna (pół-ciekła) zanim wszystkie z wiązań międzycząsteczkowych ulegną rozerwowaniu.

Tu dochodzimy do zasadniczego rozgraniczenia między stanem stałym a cieczą: w ciele stałym powstają wiązania między pojedynczymi cząsteczkami a nie tylko wewnątrz cząsteczek. O ile gazowym (czy ciekłym)  $\text{SiO}_2$  atomy tlenu są związane z atomem krzemu przez cztery uwspólnio-

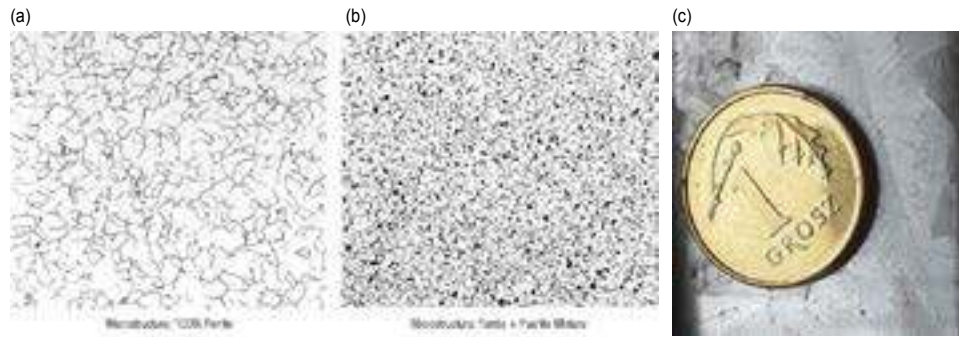
ne elektrony (wiązanie podwójne, jak mówią chemicy), to w ciele stałym każdy atom (a raczej jon) krzemu jest związany z czterema jonami tlenu. W kwarcu jest to w miarę jednoznaczne, ale nie jest to jedyna forma (minerał), jaki  $\text{SiO}_2$  może tworzyć. Wrócimy do tej kwestii po omówieniu „odmian alotropowych” węgla.

### Najtwardszy i najmiększy

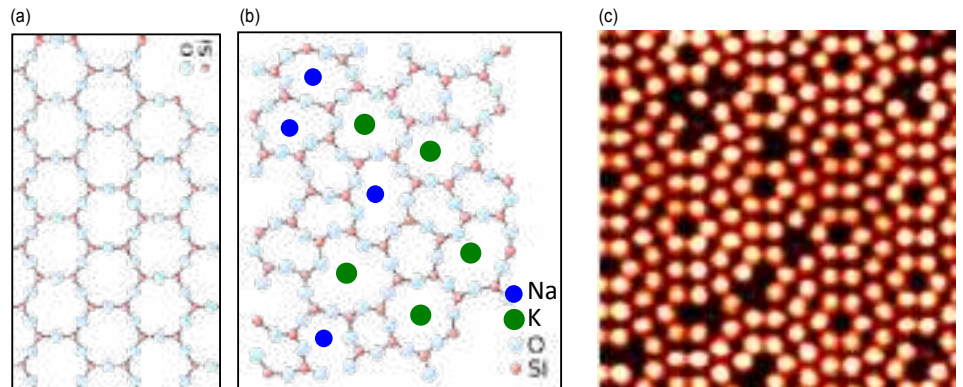
Węgiel jest pierwiastkiem nadzwyczajnym, nie tylko w chemii organicznej. Również w mineralogii, jego dwie odmiany – grafit i diament są na przeciwstawnych biegunach skali twardości, w tzw. skali Mohsa 1 i 10, odpowiednio. Jak twardy jest diament, pokazuje absolutna skala twardości – jest on trzykrotnie twardszy niż korund ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), używany w papierze ściernym. zob. rys. 3.

Jak to się dzieje, że te same atomy C tworzą raz sieć krystaliczną niezwykle zwartą, a raz wręcz smarującą (grafit jest używany jako smar w wysokiej klasy łożyskach)? Wynika to z dylematu, jaki mają atomy C, aby w miarę „demokratycznie” rozmieścić 4 elektrony (z drugiej powłoki) na 4 orbitalach, z których ten najdoskonalszy, sferyczny, 2s powinien być wypełniony, tzn. mieścić dwa elektrony. Jeśli pozostałe dwa elektrony miałyby trafić na jeden z trzech (prostopadłych wzajemnie) orbitali 2p, to na który? Szukalibyśmy intuicyjnie jakiejś zasady ekwipartycji energii, jak to było w przypadku cząsteczek (np. dwuatomowych) w gazach. Przypominamy tzw. regułę Hunda, która mówi, że podstawowy stan elektronowy atomu to taki w ramach dostępnych orbitali, który maksymalizuje całkowity spin. Innymi słowy, każdy elektron na oddzielnym orbitalu i wszystkie spiny w tym samym kierunku.

Natura rozwiązała „węglowy” dylemat proponując dwie opcje. Albo dwa elektrony 2s i dwa 2p, czyli konfiguracja  $1s^2 2s^2 2p^2$  (tzw. hybrydyzacja  $sp^2$ ) albo po jednym elektronie na wszystkich 4 orbitalach drugiej powłoki, czyli  $1s^2 2s^1 2p^3$  (hybrydyzacja  $sp^3$ ). Pierwszy przypadek pozwala na stworzenie struktury płaskiej, można by się spodziewać coś w rodzaju kratki. Ale elektrony są



Ryc. 1. (a, b) Mikrografia żelaza armco i stali (po chemicznym wytrawieniu, dla uwidocznienia granic ziaren). W armco widoczna tylko jedna faza: ferryt, czyli żelazo z zawartością węgla poniżej 0,001% (w 0°C). W stali są widoczne mniejsze ziarna perlitu, czyli struktury mieszanej Fe i  $\text{Fe}_3\text{C}$ . Ramka obrazków to 1 mm. Courtesy of AK Steel International. (c) Rynnowa, żelazna blacha pokryta cynkiem – widoczne makro-kryształy cynku. Foto: GK.



Rys. 2. (a) Struktura kwarcu  $\text{SiO}_2$  (uproszczona, w rzeczywistości jest ona 3D). (b) Dodanie np.  $\text{Na}_2\text{O}$  powoduje rozłączenie sieci: jony O są wbudowane w sieć, jony  $\text{Na}^+$  – nie. (c) Obraz z mikroskopu sił atomowych (AFM) powierzchni monokrystalicznego krzemu. Źródło: Wikipedia, Omicron



Rys. 3. Bardzo użyteczna, względna skala twardości Mohsa: materiał twardszy zostawia rysę na materiale miększym: twarda stal rysuje szkło a piasek (kwarc) rysuje stal. Paznokiec ma twardość ok. 2,5, czyli można nim zarysować gipsową ścianę, miedź ma 3,5, szkło 5,5, pilnik do paznokci ok. 6,5. (AllAboutGemstones.com, dostęp 2012)

trzy – więc grafit to struktura płaskich sześciokątów: wewnątrz sześciokątów wiązanie jest kowalencyjne, a między sześciokątami, bardzo słabe, polaryzacyjne, zwane też van der Waalsa.

Nawiasem mówiąc, identycznie są zbudowane polimery – w pojedynczych łańcuchach wiązania są kowalencyjne, a między łańcuchami nimi tylko w niektórych miejscach

chemiczne. Mówimy o sieciowaniu się łańcuchów. Takie sieciowanie zachodzi często w miarę starzenia się polimeru – traci on na elastyczności i zaczyna pękać.

Hybrydyzacja  $sp^3$  daje cztery identyczne orbitale, czyli strukturę piramid, zob. ryc. 4. Ale tymi piramidami trzeba zappełnić przestrzeń 3D, więc wynikiem są sześciiany, z piramidkami „poutykany, jak się da”.

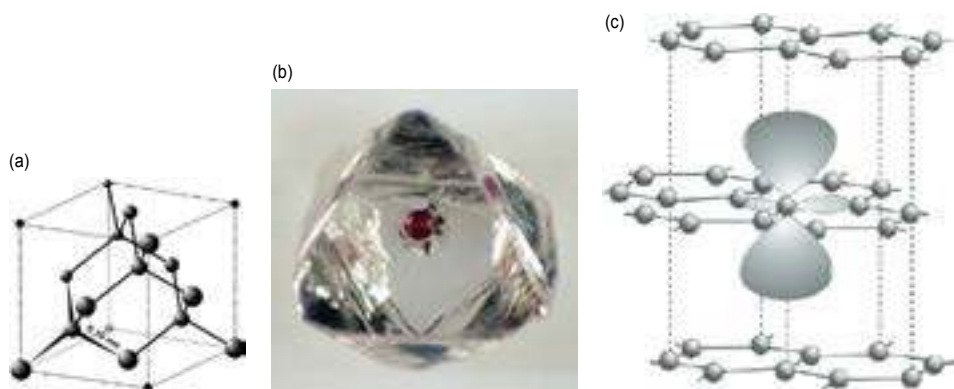
Naukowo taki układ krystalograficzny nazywamy „regularny, ściennie centrowany” (wyjaśnienie za chwilę).

### Kryształ soli

Uczono nas w szkole, że sól kuchenna, NaCl krystalizuje w układzie regularnym, w postaci pięknych sześciątów, zob. gigantyczne kryształy z Wieliczki w Muzeum Nauki w Wiedniu, ryc. 5. Ale wiedząc już, że jednocześnie musi zostać zachowana struktura cząsteczki, dokładny schemat się nieco komplikuje. I tak, między językiem mineralogii, chemii, fizyki i matematyki piętrzą się licznie „schody trudności dydaktycznych”. Kryształ soli NaCl mimo że najprostszy z możliwych (nawet diament jest bardziej skomplikowany), jest przykładem tych trudności.

Krytalografia wymaga zdefiniowania elementarnej komórki tzn. takiej, że cała makroskopowa struktura kryształu może być złożona z dodawania tej najprostszej komórki. I tak, na rysunku 6a widać, że nie może być to jedynie sześciąt o krawędzi Na-Cl, ale musi to być krawędź Na-Cl-Na. A wówczas, w komórce elementarnej jony Cl<sup>-</sup> położone są nie tylko w wierzchołkach sześciąt, ale i na każdej ze ścian, w jej „połowie” (tj. na skrzyżowaniu przekątnych).

A jony Na<sup>+</sup>? Gdzie się da upchnąć, czyli w połowie krawędzi. Krytalo-eksperci powiedzieliby „w lukach oktaedrow (ośmiościanów) układu regularnego ściennie centrowanego” (uff!). No, to możemy wrócić do



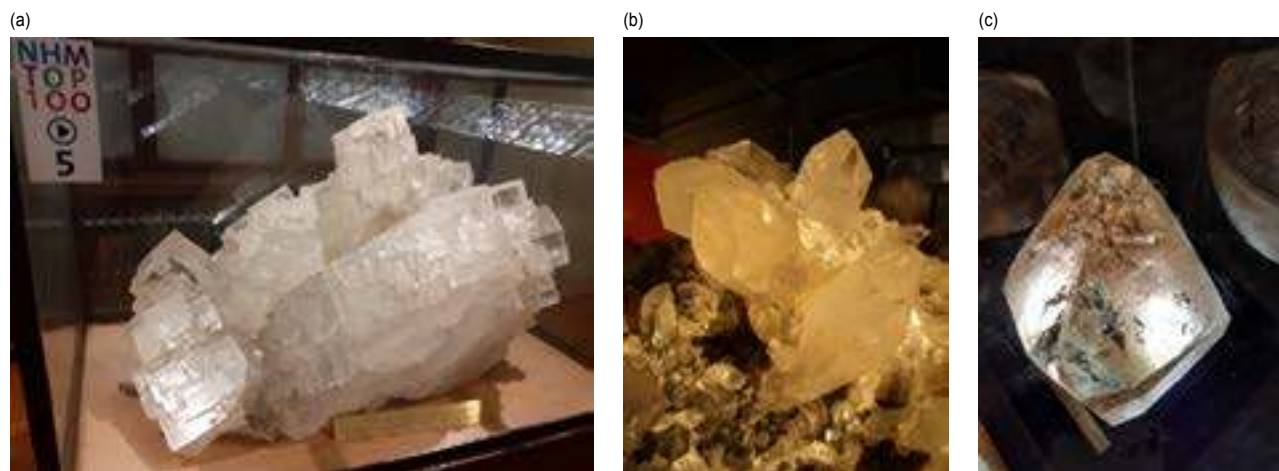
diamentu. Układ krystalograficzny diamentu to regularny, ściennie centrowany, z dodatkowymi atomami węgla w lukach tetraedrow (czworościanów), rys. 4a.

Prosty wzór chemiczny NaCl, a przede wszystkim brak wiązań kierunkowych (energię wiązania kryształu Na<sup>+</sup>Cl<sup>-</sup> bez trudu można wyliczyć z prawa Coulomba, o ile znamy odległość między jonami) przekłada się na prostą klasę krystalograficzną. W kwarcu powstaje cała sieć wiązań „kwalencyjnych” – geometria kryształu zostaje zdominowana przez kierunkowość tych wiązań. To co na ryc. 2a wygląda prosto, to w rzeczywistości sieć czworościanów wzajemnie stykających się wierzchołkami (zob. rys. 8). Klasa symetrii jest niższa niż dla układu regularnego. A już z zewnętrznej formy kryształu (rys. 6b) jest prawie niemożliwe wywnioskowanie, że wzór chemiczny jest tak prosty.

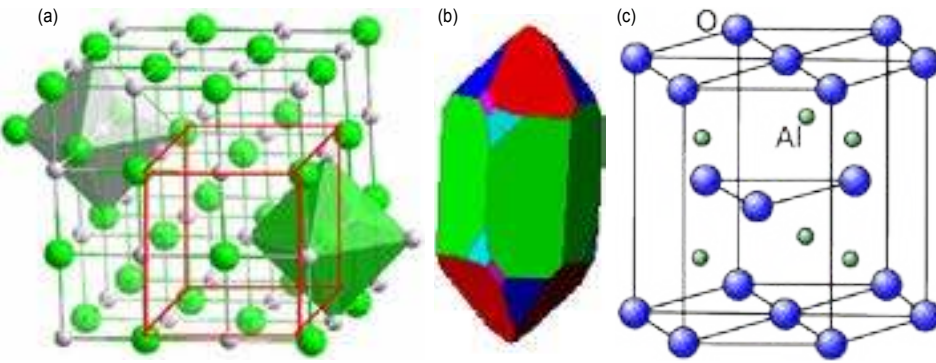
### Piasek i glina

Piasek bierze się z rozdrobnienia białych ziaren kwarcu w granicie – polnych kamieniach. W tym samym granicie są różowe ziarna, tzw. ortoklazu, o składzie chemicznym podobnym do kwarcu (są tam dodatkowo tlenki aluminium i innych metali, odpowiednio chemicznie związane). Z rozdrobnienia ortoklazu powstaje glina – chłonna wodę, plastyczna i śliska, jeśli znajdzie się na ścieżce.

Jak to się dzieje, że podobne substancje mają tak różne własności? Otóż schemat krystalizacji z rys. 2a jest bardzo uproszczony (już to jest jasne z geometrii kryształu kwarcu). W rzeczywistości, elementarne piramidki (SiO<sub>4</sub>), z których jest zbudowany kwarc, mogą być ułożone na różne sposoby (zob. rys. 8): i) luźnie w otoczeniu innych jonów – tak zbudowane są kryształy granatów. półszlachetnych kamieni; ii) w płaszczyznach, jak na rys. 2a – taką strukturę



Rys. 5. Sól kamienna (z Wieliczki) – regularny (tj. sześcienny) układ krystalograficzny; tu kryształy „wyrastają” jeden z drugiego. (b) Kwarc – komórka elementarna to sześciąt „wyciągnięty” za przeciwległe wierzchołki (trygonalny, czyli romboedryczny) ale struktura zewnętrzna jest zupełnie inna; (c) komórka elementarna kryształu topazu to prostokąt o trzech różnych krawędziach (po polsku „rombowy”, po angielsku orthorhombic), ale ten kryształ przypomina ośmiościan. Muzeum Przyrody w Wiedniu i Toronto, foto: Maria Karwasz.



Rys. 6. Ułożenie jonów  $\text{Cl}^-$  (zielone) i  $\text{Na}^+$  w kryształce  $\text{NaCl}$ . Komórka elementarna zaznaczona na czerwono: jony  $\text{Cl}^-$  znajdują się w wierzchołkach i dodatkowo na środku każdej ściany a jony  $\text{Na}^+$  w pustych miejscach (ośmiościennej lukach między innymi jonami). (b) Prosty wzór chemiczny kwarcu  $\text{SiO}_2$  i teoretycznie prosty kształt komórki elementarnej (romboedr) dają skomplikowaną geometrię kryształu (zob. też foto 5b). (c) W korundzie ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) wiązania między atomami są bardziej kowalentne, niż jonowe a jony  $\text{Al}^{3+}$  zajmują miejsca w lukach między jonami  $\text{O}^{2-}$  – kryształ jest gęsto upakowany i bardzo twardy. Źródło: <http://webmineral.com>

ma glina i mika, łupiąca się w bardzo cienkie, przezroczyste listki, używana kiedyś jako izolacja termiczna w żelazkach; iii) w strukturę przestrzennie związaną, tak zbudowany jest kwarc. Ot! i stąd skomplikowana geometria kryształów kwarcu z ryc. 5b i 6b.

Niska symetria kryształów kalcytu i kwarcu (i kierunkowe ułożenie się pojedynczych cząsteczek) odzwierciedla się w anizotropii (tj. kierunkowości) ich własności fizycznych. Prędkość rozchodzenia się światła w kalcycie, w określonym kierunku zależy od polaryzacji tego światła: inna jest, jeśli pole elektryczne ma drgać wzdłuż płaszczyzn grup  $(\text{CO}_3)^{2-}$ , zob. rys. 7b, a inaczej jeśli prostopadle do tych płaszczyzn (albo coś w tym rodzaju – dokładne wyjaśnienie nie jest dydaktycznie ważne).

Anizotropowy jest również kwarc. Jeśli próbujemy zginać piramidkę  $(\text{SiO}_4)^{2-}$  naciskając na jeden wierzchołek, to na ściankach bocz-

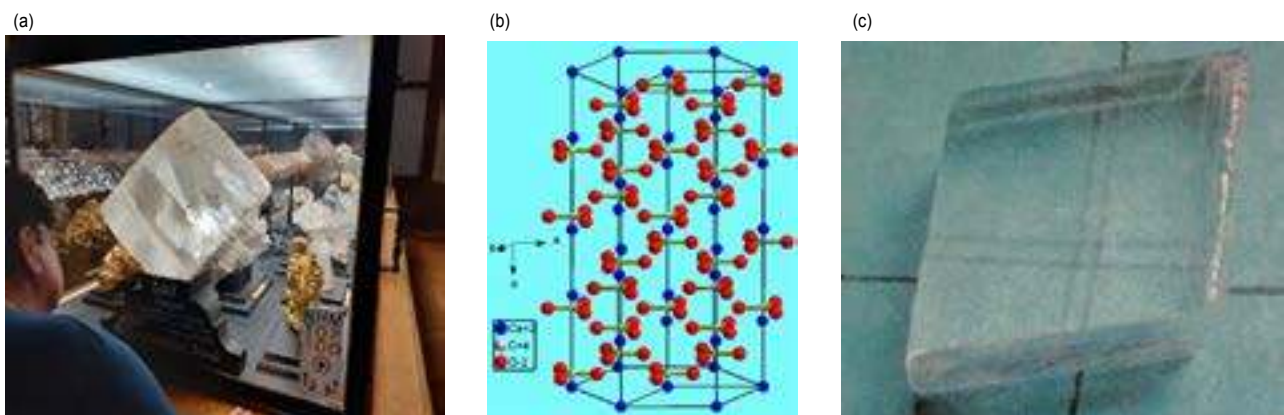
nych pojawi się ładunek dodatni (albo ujemny – znów jest to informacja dydaktycznie redundantna). Ten efekt, piezoelektryczny, odkrył Pierre Curie. Służy do wytwarzania iskry w ręcznym zapalaczu do gazu. Ale efekt można odwrócić: jeśli do odpowiedniego kierunku krystalograficznego przyłożymy napięcie, to kwarc minimalnie się odkształci. A jak przyłożymy napięcie zmienne – zacznie drgać w rytm tego napięcia.

Oczywiście, o ile rezonansowa częstość własna tych mechanicznych drgań będzie odpowiadała częstości napięcia zmiennego: wymyśliliśmy stabilizator drgań elektrycznych. Odpowiednio mały kryształek – odpowiednio wysoka częstotliwość. Eureka! Możemy budować niewidoczne gołym okiem zegary sterujące przebiegiem sygnałów w tranzystorowych odbiornikach radiowych, laptopach, telefonach komórkowych. Merci, Monsieur Curie!

## Cyna lutownicza, żeliwo i stal

Świadomość złożonej struktury atomowej ciał stałych pozwoliła nam na (dydaktyczne) odkrycie wielu własności materii. Wróćmy jeszcze raz do rys. 2b. Zrozumieliśmy, dlaczego szkło krzemianowo-sodowe ma niższą temperaturę topnienia niż czysta krzemionka; atomy (czy raczej jony) sody „rozpychają” sieć  $\text{SiO}_2$ , przez co niektóre wiązania stają się słabsze. Innymi słowy, podejrzewamy, że mieszaniny różnych atomów, np. metali, topią się w niższych temperaturach niż czyste metale. Mówimy o „stopach” (ang. *alloys*). To z nich się wzięła cywilizacja techniczna – najpierw epoki brązu, później żelaza, teraz krzemu i arsenku galu ( $\text{GaAs}$ , zamiennika krzemu w układach elektronicznych wysokiej częstotliwości jak odbiorniki fal w telefonach komórkowych).

Cyna lutownicza jest najlepszym przykładem stopu o niskiej temperaturze topnienia: czysta cyna topi się w  $230^\circ\text{C}$ , czysty ołów w  $325^\circ\text{C}$  a mieszanina o odpowiednim składzie (wagowo 62%  $\text{Sn}$ , 38%  $\text{Pb}$ ) w  $182^\circ\text{C}$ . Stop o składzie takim, że topi się w najniższej temperaturze, nazywamy *eutektyką*. Najlepiej przedstawić te zależności na tzw. wykresie fazowym, rys. 9a. Na osi poziomej zaznaczamy względną zawartość (wagową) ołowiu – od czystej cyny (0%) do czystego ołowiu (100%), na osi pionowej – temperaturę. Na wykresie fazowym  $\text{Sn-Pb}$  wyróżnić można cztery obszary: w niskich temperaturach stop jest



Rys. 7. (a) Kalcyt,  $\text{CaCO}_3$  (a) należy do tej samej klasy krystalograficznej (trygonalnej) co kwarc, mimo że zewnętrznie wygląda inaczej (Muzeum Przyrodnicze Wiedeń). (b) W odróżnieniu od diamentu, poszczególne cząsteczki nie są związane kowalentnie, więc kryształ jest stosunkowo łatwo ścieralny (klasa Mohsa 3) i łupliwy (wiązania są ukierunkowane). (c) Niska symetria kryształu jest powodem zewnętrznej anizotropii jego własności optycznych – odpowiednio ułożony daje zjawisko dwójnośności światła: światło o różnych kierunkach polaryzacji propaguje z różnymi prędkościami, co daje różne współczynniki załamania (foto GK).



Ryc. 8. Prawda naukowa o kwarcu jest bardziej skomplikowana niż na rysunku z wikipedii (ryc. 2a): to mika, czyli plagioklaz (środkowa linia na rysunku) ma strukturę płaską, a kwarc to przestrzenny układ „piramidek” (SiO<sub>2</sub>). Z wykładów GK.

zestalony (linia pozioma), w wysokich – płynny (obszar ponad krzywymi). Dwa zakreskowane pola to obszar współistnienia fazy ciekłej i stałej: coś w rodzaju kry w morzu. Ale w porównaniu za zamrażaniem wody, wykres 9a jest bardziej skomplikowany i niesie sporo informacji.

Aby stwierdzić, co znajduje się w tyglu ze stopem o składzie 65% ołowiu w temperaturze 210°C (czarny punkt na wykresie), kreślimy strzałki poziome do przecięcia się z punktami wykresu. Odczyt na osi OX mówi nam, że w tyglu jest mniej więcej połowa (świadczy o tym długość strzałek poziomych, a w zasadzie odwrotność ich długości) stopionego metalu o składzie 48% Pb plus zestalone kryształki ołowiu z 18% domieszką cyny. Po zestaleniu się całego stopu (obniżamy położenie punktu na wykresie) kryształki ołowiu z domieszką cyny będą rozmieszczone w matrycy o składzie eutektycznym. Rozumiemy teraz rysunek nr 1b: tak zestaliły się dwa różne stopy żelaza z węglem. Ale wykres fazowy żelazo-węgiel, ryc. 9b, to prawdziwy postrach dla studentów inżynierii materiałowej: trzeba go znać na pamięć!

Oczywiste z wykresu 9b jest, że czyste żelazo topi się w 1538°C a punkt eutektyczny odpowiada temperaturze 1154°C (przy zawartości węgla 4,4%). I to jest wielki wy-

nalazek naszych przodków: nawet pra-Słowianie w prymitywnych dy-markach, np. w Świętokrzyskim, wytwarzali tego rodzaju eutektyczne pół-fabrykaty żelaza, eksportowali je do Rzymu, a tam przekuwano to na broń.

Na wykresie 9b ferryt, czyli faza  $\alpha$ -Fe, tj. struktura z rys. 1a, znajduje się przy lewej pionowej osi. Cementyt, z rys. 1b, związek między-metaliczny (o ile węgiel można nazwać metalem) – Fe<sub>3</sub>C, zajmuje on obszar przy prawej pionowej osi. Ale najciekawszy na tym wykresie jest obszar jakby rombu, „austenitu”. Jest to druga, obok  $\alpha$ -Fe faza żelaza, zwana  $\gamma$ -Fe. O ile  $\alpha$ -Fe krystalizuje w układzie regularnym przestrzennie centrowanym (8 atomów Fe we wierzchołkach sześciangu i 9-ty w centrum) to  $\gamma$ -Fe to układ regularny ściennie centrowany (8 atomów w wierzchołkach plus 6 na środku każdej ze ścian). Austenit może więc przyjąć do swej sieci krystalicznej atom węgla (środek sześciangu jest pusty). Nie powstaje związek chemiczny, ale atomy węgla zostają „rozpuszczone” w kryształach austenitu.

I tu kolejny łut szczęścia Hetytów, którzy nauczyli się jako pierwsi wytwarzać żelazo, prawie 5 tysięcy lat temu. Szybkie chłodzenie, lub domieszki innych metali (Mn, Co, Ni) stabilizują austenit aż to niskich temperatur: to już nie miękkie żelazo ani kruche żeliwo (w którym są

mikro-kryształy grafitu) ale prawdziwa stal. A bardzo szybkie chłodzenie, tzw. hartowanie „zamraża” węgiel w austenicie: powstaje tetragonalna (tzn. prostopadłościenna) faza *martensytu* – stal jest i twarda, i giętka, jak w szabli damasceńskiej (nieco upraszając). Oczywiście, nawet dziś nie do końca rozumiemy, na czym te przemiany polegają, ale kowale praktykują „alchemię” żelaza od tysiącleci i z doświadczenia, i z intuicji.

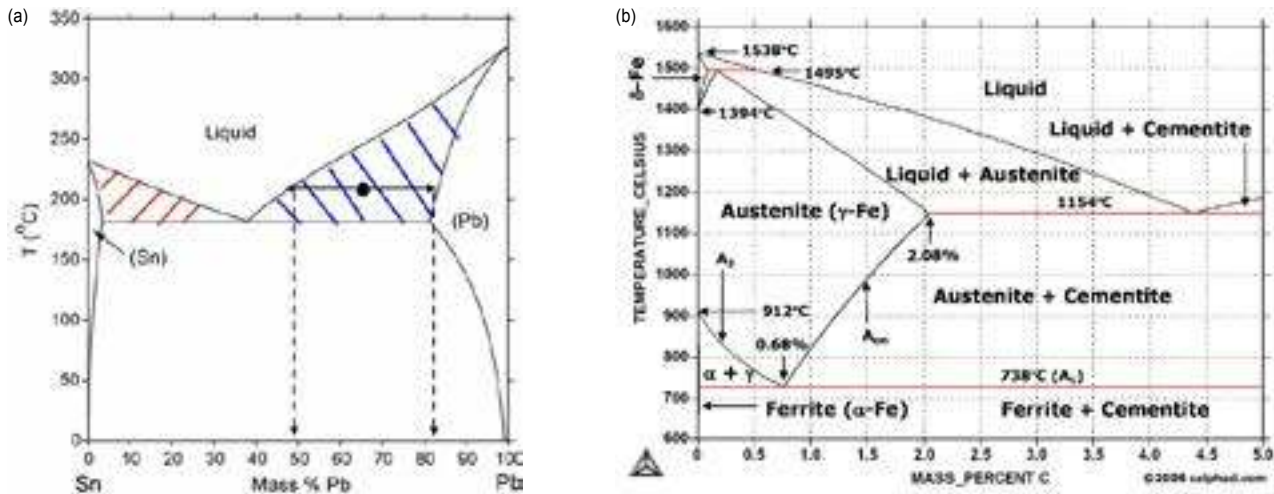
Wykresy fazowe jak na rys. 9 są dowodem, że atomy cyny i ołowiu nie są wzajemnie zamienne w sieci krystalicznej. Wzajemnie zamienne (tzn. mieszające się we wszystkich proporcjach i nie wykazujące punktu eutektycznego są np. srebro i złoto (stąd wynikł problem złotnika, rozwiązany przez Archimedes) lub miedź i nikiel – dlatego te dwa metale są mieszane w różnych proporcjach do wyrobu monet a najlepszym przykładem są 2 i 5 zł.

### Krucze, sprężyste, plastyczne

Wiedząc już, że to nie tylko skład chemiczny, ale również sposób wytwarzania (np. krystalizacja diamentu pod wysokim ciśnieniem), obróbka termiczna (jak hartowanie i „odpuszczanie”) i historia materiału (starzenie się polimerów, narastanie nano-defektów w samolotowym skrzydle) stanowią o własnościach materiałów, możemy wrócić do klasyfikacji własności mechanicznych. Zaliczamy do nich np. wspomnianą twardość, którą badamy przez zarysowanie lub wgniatanie diamentowego ostrza, kruchość (którą mierzymy uderzając standardowym młotkiem), odporność na zerwanie, zakres wydłużenia sprężystego itd.

Prawo Hooke’a i moduł Younga są w podręcznikach szkolnych, więc nie będziemy ich przypominać. Zwrócimy jedynie uwagę na „dziwne” zachowanie się niektórych krzywych zależności wydłużenia od naprężenia, rys. 10. Uwaga! osie tych wykresów są, zwyczajowo, „przewrócone” – obrazują zależność naprężenia (oś OY), czyli przyczyny, od wydłużenia (oś OX), czyli skutku.

Jak to pokazuje rys.10, zależności wydłużenia od naprężenia, nawet w klasie metali są bardzo różne: zeli-



Ryc. 9. Wykresy współistnienia faz (ciekłej, stałej, mieszanej) w cynie lutowniczej i stali/żeliwie. (a) Górny obszar to ciecz, obszary kreskowane to współistnienie cieczy i krystalizującego stopu. Stop o składzie wagowo 38% Pb i 62 % cyny ma najniższą możliwą temperaturę topnienia (i krzepnięcia). Atomowo jest to skład Sn/Pb 1:1 (b). Wykres fazowy żelazo-węgiel to postrach studentów (i całe bogactwo metalurgii żelaza). Stalami nazywamy stopy do 2,1% (wagowo) węgla, żeliwami – stopy o większej (do około 4,5%) zawartości węgla. Stale są sprężyste, żeliwa – kruche. „Rombowy” obszar to inna, wysokotemperaturowa faza żelaza, charakterystyczna dla stali wysokiej jakości.

wo jest kruche, twarda stal – sprężysta w dużym zakresie naprężeń, a stal miękka (nisko-węglowa) wykazuje charakterystyczne „płynięcie” po przekroczeniu granicy odkształcenia sprężystego: wydłuża się, mimo, że przyłożone naprężenie się nie zmienia („zygzakowata część” wykresu). Mechanizmy nie do końca są jeszcze zrozumiałe – jest to przesuwanie się ziaren, ich deformacja, propagowanie defektów? Jeżeli chcemy złamać stalowy, miękki drut a nie mamy kombinerek, zginamy go i prostujemy wiele razy w jednym miejscu. Zginanie powoduje powstanie defektów w sieci krystalicznej a te utrudniają przesuwanie się ziaren kryształów, moduł sprężystości rośnie aż w końcu materiał pęka.

Podobnie trudna do odkształcenia jest stal o dużej zawartości węgla, ale znosi znacznie większe obciążenia niż żeliwo. Stal o małej zawartości węgla wykazuje cechę „płynięcia” (plastyczności) po przekroczeniu granicy odkształcenia sprężystego: próbka się wydłuża, mimo że naprężenie nie rośnie.

Aluminium jest sprężyste tylko dla małych naprężeń. Miedź (wyżarzona) nie wykazuje widocznej granicy sprężystości. Uwaga: na wielu wykresach, tak w Internecie jak w podręcznikach, końcowe fragmenty krzywych są zakłamane: pokazują, że wydłużenie rośnie przy malejącym obciążeniu. Tak! ale próbki uległy już przewężeniu, tak że naprężenie (stosunek siły do przekroju próbki)

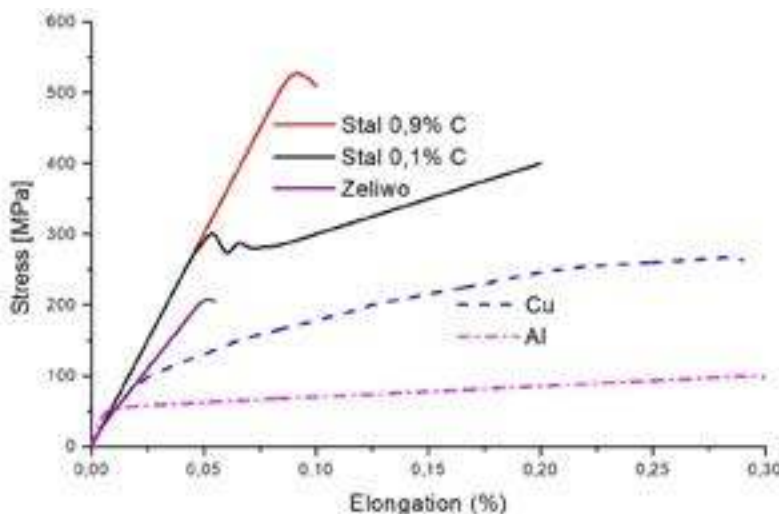
nie maleje, ale nadal nieco rośnie. Kompilacja autora z różnych źródeł, w tym: Adam Lisica i in. Laboratorium Materiałoznawstwa (2009).

### Uwagi końcowe

Bezpostaciową, tj. mocno nieuporządkowaną strukturę można nadać również metalom (przez bardzo szybkie chłodzenie) i półprzewodnikom (krzem amorficzny w panelach foto-woltaicznych jest tańszy niż mono-krystaliczny, niestety wydajność kwantowa takich paneli jest niższa niż paneli z mono-krystalicznego krzemu).

W ciele stałym mówimy raz „atomy krzemu związane z atomami tlenu” a raz „jony  $O^+$  są wbudowane w sieć, jony  $Na^+$  – nie.” Ta niekonsekwencja wynika z niemożności klasyfikacji typów wiązań, jak o tym pisaliśmy w artykule o cieczach.

Wzajemne „rozpychanie się” atomów jest też powodem, że woda morska (zawierająca jony  $Na^+$  i  $Cl^-$ ) zamraża w niższej temperaturze niż woda słodka. Ale problem możemy odwrócić: posypanie zaśniewionego chodnika solą powoduje topnienie śniegu. A raczej to ciepło chodnika topi mieszaninę quasi-eutektyczną nawet w temperaturze poniżej  $0^{\circ}C$ . Ale uwaga, punkt eutektyczny mieszaniny  $NaCl-H_2O$  to aż 27%  $NaCl$ . I nawet jeśli temperatura krzepnięcia takiej eutektyki wynosi  $-21^{\circ}C$ , opłaca się najpierw chodnik dokładnie odśnieżyć, aby nie sypać kwintali soli, a śnieg i tak nie stopnieje.



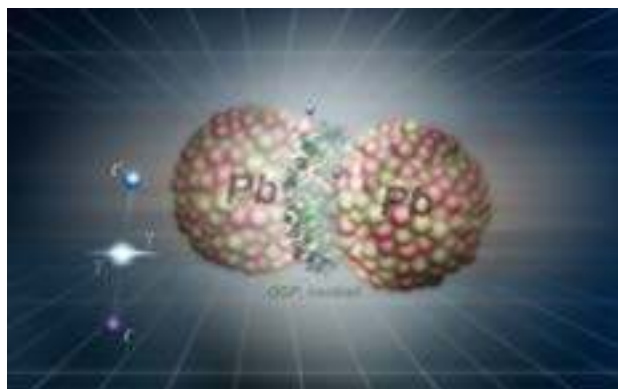
Rys. 10. Przykładowa zależność względnego wydłużenia (elongation) od przyłożonej siły (stress, w MPa). Uwaga na „odwrócone” osie: wydłużenie, czyli skutek, jest na osi OX. Maksymalne dopuszczalne obciążenie drutu miedzianego jest nieco mniejsze niż drutu stalowego o małej zawartości węgla (żeliwo Armc0). Żeliwo nie jest odporne na odkształcenia: wydłuża się niewiele po czym pęka.

To jedna z tzw. „kompetencji społecznych”, których ten artykuł dostarcza.

Przemiany fazowe, nawet rozpuszczanie soli w wodzie, nie mówiąc o modelowaniu termodynamiki stopów, są ciągle przedmiotem badań. Stopy tytanowe są używane w bio-protezach, stopy o dużej zawartości niklu w silnikach odrzutowych, stopy Al-Cu z dodatkiem Si, Li, Mg i Mn w stawkach kosmicznych itd. Każdy „skok technologiczny” wymaga nowych materiałów. Brak odpowiedniej stali jest główną przeszkodą w konstrukcji przemysłowego reaktora termojądrowego, zob. nasz artykuł o plazmie (FwSz 1/2019).

### Czego się dowiedzieliśmy?

1. Świadomie pozostawiliśmy „ziemię”, czyli ciało stałe na koniec serii o stanach skupienia.
2. Własności ciał stałych znacznie odbiegają od własności cieczy, a powodem jest struktura krystaliczna. Ciała amorficzne swoim nie-uporządkowaniem przypominają ciecze.
3. To struktura krystalograficzna o niskiej symetrii jest powodem dwójłomności światła w kalcycie ( $\text{CaCO}_3$ ) i efektu piezoelektrycznego w kwarcu ( $\text{SiO}_2$ ).
4. Hetytom (Chińczykom?) dwa i pół tysiąca lat p.n.e. udało się wynaleźć stop żelaza z węglem, jeden z najprostszych do uzyskania, a jeden z najbardziej skomplikowanych do analizy fazowej (złoto z miedzią miesza się we wszystkich proporcjach i nie wykazuje żadnych specjalnych stechiometrii ani faz).
5. I tak „żelazny” drut jest zrobiony ze stali, czyli stopu żelaza i węgla z zawartością max. 2% wagowo C a „żelazne” kaloryfery z żeliwa, o większej (lecz mniejszej niż 4%) zawartości węgla. Żeliwo łatwo się odlewa w piaskowych formach, ale jest kruche.
6. Fakt, że mieszaniny łatwiej się topią wykorzystujemy np. w „cynie” lutowniczej, która jest mieszaniną Sn i Pb.
7. Ale układ faz Fe-C jest śmiesznie prosty, w porównaniu z wykresem fazowym Cu-Sn (odsyłamy do samodzielnych poszukiwań w Internecie). I o ile w starożytności brązem posługiwały się wszystkie (euro-azjatyckie) cywilizacje, dziś pozostało w Europie kilka tylko rodzin ludwisarzy.
8. W Egipcie (lub w Mezopotamii) odkryto, że piasek z domieszką popiołu (tlenków sodu i potasu) łatwiej się topi. Merit (1400 lat p.n.e), żona Kha, egipskiego dostojnika w szklanych buteleczkach trzymała swoje perfumy. Zapach, podobno, zachował się do dziś.
9. Ciała stałe dzielą się na sprężyste, plastyczne i kruche. W rzeczywistości, wszystkie ciała stałe mają tę własność, tylko w innych zakresach naprężeń.
10. A inżynieria materiałowa jeszcze przez kilka stuleci będzie dostarczać ludzkości bardzo potrzebnych wynalazków. Warto się jej uczyć!



W trakcie bliskich centralnych zderzeń jąder ołowiu w LHC dochodzi do powstania plazmy kwarkowo-gluonowej i koktajlu wielu wkładów z innymi cząstkami. Jednocześnie zderzają się chmury fotonów otaczających jądra, co skutkuje kreacjami par lepton-antylepton w obrębie plazmy i koktajlu oraz w przestrzeni wokół jąder.

## Egzotyczny stan materii

Gdy rozpędzone niemal do prędkości światła jony ołowiu lub złota wpadną na siebie w czeluściach akceleratorów, na ułamki sekund tworzy się plazma kwarkowo-gluonowa, a nawet jej „koktajl” doprawiony innymi cząstkami. Zdaniem naukowców z Instytut Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie dane eksperymentalne wskazują, że na arenie wydarzeń są obecni jeszcze inni aktorzy: fotony. Ich zderzenia prowadzą do emisji pozornie nadmiarowych cząstek, których obecności nie potrafiono wyjaśnić.

Plazma kwarkowo-gluonowa to bezsprzecznie najbardziej egzotyczny ze znanych nam stanów materii. W akceleratorze LHC w CERN pod Genewą tworzy się ona podczas centralnych zderzeń dwóch nadlatujących z naprzeciwka jonów ołowiu, poruszających się z prędkościami bardzo bliskimi prędkości światła.

Niestety, opis teoretyczny przebiegu wydarzeń z udziałem plazmy oraz jej koktajlu nie w pełni odpowiada danym zebranych w eksperymentach. W artykule opublikowanym na łamach czasopisma „Physics Letters B” grupa naukowców z IFJ PAN wyjaśniła przyczynę zaobserwowanych rozbieżności.

Dane zebrane w trakcie zderzeń jąder ołowiu w akceleratorze LHC, a także podczas zderzeń jąder złota w akceleratorze RHIC w Brookhaven National Laboratory koło Nowego Jorku, zaczynają się zgadzać z teorią, gdy w opisie zachodzących procesów uwzględnimy zderzenia między fotonami otaczającymi oba oddziałujące ze sobą jony.

„Z pewnym przymrużeniem oka można powiedzieć, że przy odpowiednio wielkich energiach masywne jony zderzają się nie tylko swoimi protonami i neutronami, ale nawet swoimi chmurami fotonów” – mówi dr Mariola Kłusek-Gawenda z IFJ PAN cytowana w prasowym komunikacie i od razu precyzuje: „Przy opisie kolizji jonów w LHC już wcześniej uwzględnialiśmy zderzenia między fotonami. Dotyczyły one jednak tylko zderzeń ultraperyferyjnych, w których jony nie trafiają w siebie, lecz mijają się niezmiennie, oddziałując wyłącznie własnymi polami elektromagnetycznymi. Nikt nie przypuszczał, że zderzenia fotonów mogą odgrywać jakąkolwiek rolę w brutalnych interakcjach, gdzie protony i neutrony dosłownie zlewają się w kwarkowo-gluonową zupę”.

Na podstawie – <https://press.ifj.edu.pl/news/2021/04/29/>

# Czy turbulencje są niebezpieczne?

Marta Wacławczyk

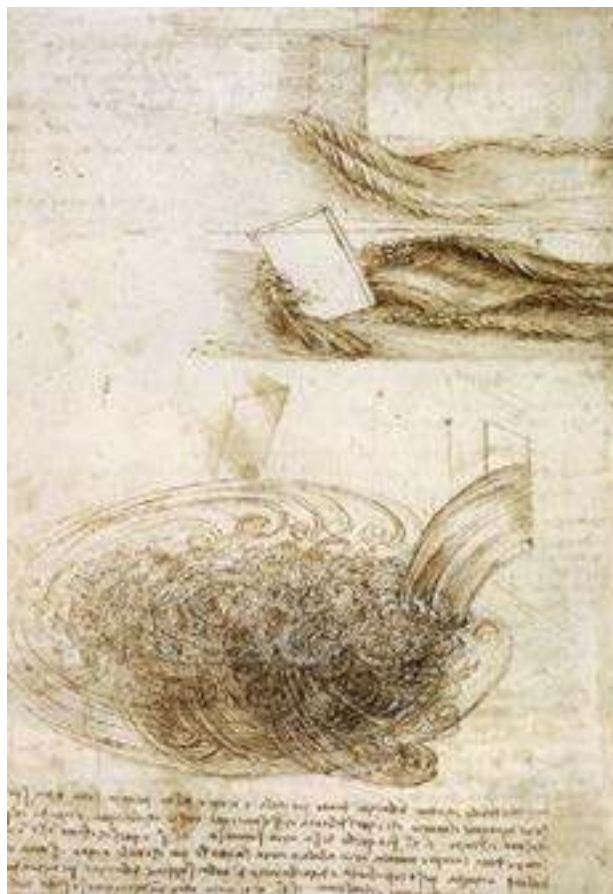
Zapewne niektórym z czytelników zdarzyło się już (lub zdarzy) lecieć samolotem. Są osoby, które uwielbiają takie podróże, inni przeciwnie, czują się nieswojo. Podczas lotu może zdarzyć się dość nieprzyjemna sytuacja. To wtedy, kiedy pilot mówi, że samolot wlatuje w obszar turbulencji i prosi o zapięcie pasów. Pasażerowie mogą wówczas odczuwać nieprzyjemne wstrząsy. Pytanie jednak czy jest się czego bać? Czy taka sytuacja jest niebezpieczna oraz czym właściwie są turbulencje? Najpierw spróbujemy odpowiedzieć na to drugie pytanie.

Turbulencją zajmował się już włoski renesansowy malarz i uczony Leonardo da Vinci. Próbował on zrozumieć badane zjawisko fizyczne poprzez obserwację jego szczegółów i ich odwzorowywanie. Kiedy przeanalizujemy jego szkice „O naturze wody” (Rys 1) zauważymy, że turbulencja jest pewnym rodzajem przepływu, który charakteryzuje się burzliwością. Turbulencja nie jest więc związana jedynie z lotami samolotowymi.

## Co to jest turbulencja?

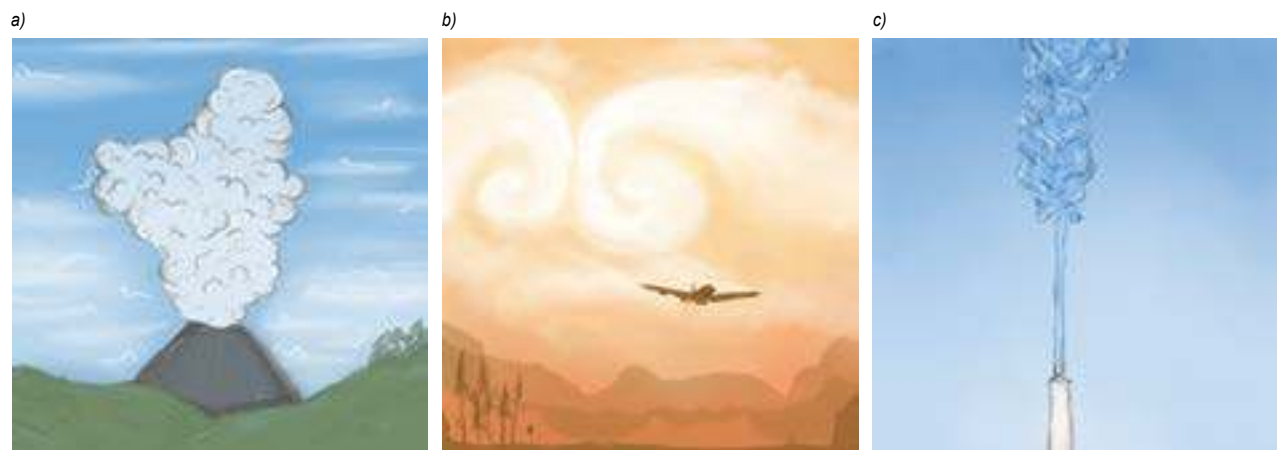
Turbulencja to nieregularny, burzliwy ruch płynu (czyli np. powietrza lub wody). Ruch turbulentny zaobserwować możemy na różnych skalach. Występuje ona np. w atmosferze, w chmurach, generuje ją poruszający się pojazd lub samolot. Turbulentny jest między innymi ślad (kilwater) za płynącym statkiem, turbulencja generowana jest również pod wpływem sił wyporu np. w ogrzonym powietrzu w pobliżu palącej się świeczki (Rys. 2).

Turbulencję można zdefiniować poprzez pewien zespół jej cech. Pierwszą jest nieuporządkowanie, chaotyczność i wrażliwość na zaburzenia. Inną cechą jest losowa zmienność w czasie i przestrzeni wszystkich parametrów opisujących przepływ. Można to zaobserwować na obrazie i animacji<sup>[2]</sup> przedstawiającej turbulencje na granicy dwóch strug płynu o różnej prędkości. Początkowo regularna struktura wirowa deformuje się i po pewnym czasie obraz staje się chaotyczny.



Rys. 1. Leonardo da Vinci, „Notatki o naturze wody”. Domena publiczna, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=59577>

Poza tym cechą turbulencji jest występowanie szerokiego zakresu wirów o różnych kształtach i rozmiarach, które oddziałują ze sobą w skomplikowany sposób. Inną cechą jest intensyfikacja procesów transportu, co znaczy, że zjawiska takie jak mieszanie zachodzą bardzo szybko. Aby się o tym przekonać warto przeprowadzić proste doświadczenie (patrz Rys. 4). Do talerza waliśmy mleko oraz kolorowe barwniki. Za mieszadło posłużyła elektryczna szczoteczka do zębów. Po pewnym czasie dało się



Rys. 2. Przepływy turbulენტne a) w atmosferze, b) za samolotem (widoczny jest zrywający się wir wierzchołkowy), c) w pobliżu płonącej świecy. Autor: Zofia Wacławczyk

zidentyfikować tworzące się struktury wirowe. Zwiększały one szybkość mieszania się kolorów, tak, że po dość krótkim czasie otrzymaliśmy płyn o jednolitej barwie.

Bardzo znanym eksperymentem dotyczącym turbulencji było doświadczenie wykonane przez Osborna Reynoldsa (1842-1912). Badał on przepływ wody, do której wprowadzał barwnik, w rurze. Przy pewnych, niskich prędkościach przepływu wody, struga barwnika pozostawała regularna. Taki regularny przepływ nazywamy przepływem laminarnym. Przy zwiększaniu prędkości przepływu wody, w pewnym momencie struga zaczynała zmieniać swój kształt (turbulizować się). Barwnik bardzo szybko mieszał się z wodą. Do opisu wyników eksperymentów O. Reynolds użył pewnej bezwymiarowej liczby dziś nazywanej liczbą Reynoldsa. Jest to iloczyn średnicy rury  $d$ , prędkości przepływu w osi rury  $U$ , podzielony przez wartość lepkości płynu  $\nu$ .

$$Re = UL / \nu$$

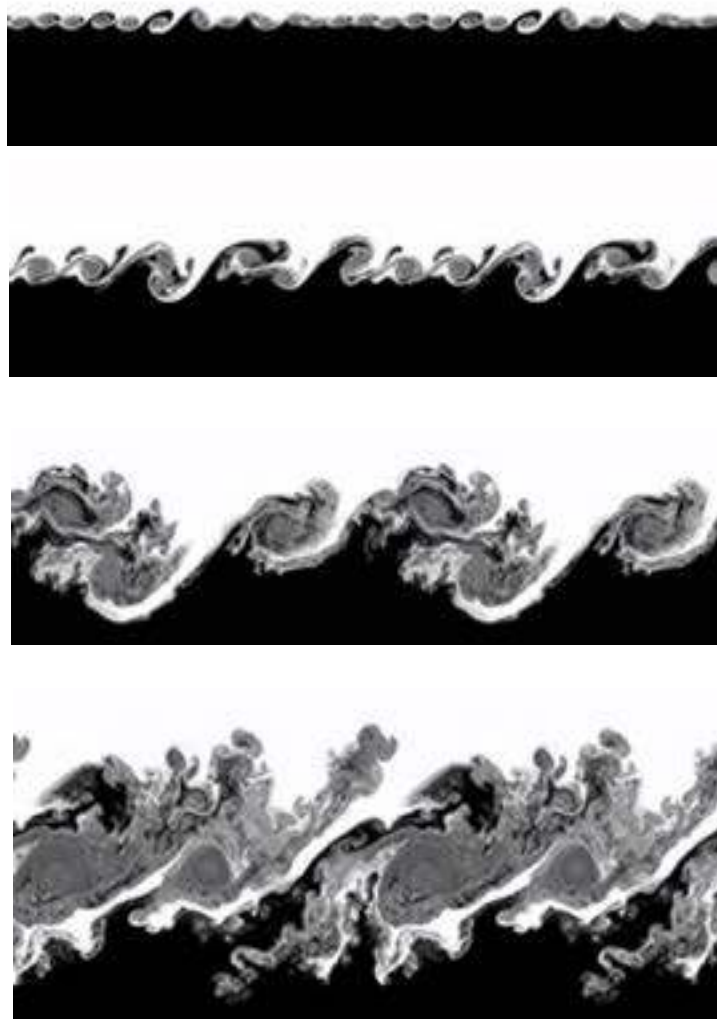
Okazało się, że charakter przepływu zależy od wartości tej liczby. Jeżeli  $Re < 2300$  obserwowano przepływ laminarny, przy  $2300 < Re < 4000$  przepływ był przejściowy (czasem laminarny, a czasem turbulentny), w końcu w przypadku  $Re > 4000$  występował przepływ turbulentny. Trzeba tu zauważyć, że im większa średnica rury oraz im większa prędkość, tym większa jest liczba Reynoldsa. Z lepkością z kolei jest odwrotnie, im jest ona większa, tym mniejsza jest liczba Reynoldsa. Dlatego przepływy bardzo lepkich płynów, takich jak np. miód, rzadko są turbulentne. Jak widać istnieją tu dwa przeciwstawne mechanizmy, jeden związany z bezwładnością, drugi z lepkością. Jeśli większa jest bezwładność, przepływ turbulizuje się, gdy z kolei przeważą mechanizmy związane z lepkością, przepływ będzie laminarny.

Opisem przepływów turbulentnych zajmowali się między innymi dwaj sławni uczeni Lewis Fry Richardson (1881-1953) oraz Andrey Nikolaevich Kolmogorow (1903-1987). Zaproponowali oni pojęcie kaskady wirów. Lewis Richardson napisał nawet na ten temat krótki wiersz, w którym pisał, jak duże wiry „karmią” mniejsze, te z kolei jeszcze mniejsze i tak dalej, aż do lepkości:

*„Big whirls have little whirls,  
That feed on their velocity  
And little whirls have lesser whirls  
And so on to viscosity  
(in the molecular sense)”.*

Znaczy to, że w turbulencji występuje zjawisko przekazywania energii kinetycznej (energii ruchu) od dużych do coraz mniejszych struktur wirowych, aż w końcu na najmniejszych wirach energia kinetyczna zamieniona zostaje, pod wpływem lepkości w energię ciepłą.

Naukowcy i inżynierowie chcą przewidywać jak będzie wyglądał przepływ turbulentny (np. opływ wokół budynku) za pomocą równań i praw fizycznych. Równania te można rozwiązywać za pomocą odpowiednich programów komputerowych numerycznej mechaniki płynów. W tym celu przestrzeń obliczeniową pokrywa się siatką



Rys. 3. Wybrane sekwencje animacji przedstawiającej niestabilność Kelvina-Helmholza ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kelvin-Helmholtz\\_Instability.ogg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kelvin-Helmholtz_Instability.ogg)) KHI.gif: Bdubb12 derivative work: – raeky (talk | edits), domena publiczna, Wikimedia Commons



Rys 4. Mieszanie barwników na talerzu (fot. własna)

(czyli dyskretyzuje się), a wyniki rozwiązania równań ruchu płynu otrzymuje się w każdym węzle (lub w każdym centrum) oczka siatki. Pozwala to na przykład przewidzieć, w przybliżeniu, jaki będzie współczynnik oporu danego modelu samochodu bez konieczności wykonywania kosztownych doświadczeń w tunelu aerodynamicznym.



Rys. 5. Autor: Zofia Waclawczyk

Ponieważ symulacje numeryczne całego zakresu struktur wirowych i oddziaływań między nimi są w tej chwili niemożliwe, ze względu na brak dostępnych mocy obliczeniowych, uczeni i inżynierowie polegać muszą na pewnych modelach (przybliżeniach) i narzędziach statystyki. Wiele współczesnych prac badawczych poświęconych jest również zagadnieniom teorii turbulencji. Prawdopodobnie jednak znalezienie jednego, uniwersalnego wzoru opisującego zależności między parametrami przepływów turbulentnych nie jest możliwe, ponieważ przepływy takie są bardzo skomplikowane.

### Jak powstaje turbulencja?

Wywołać ją mogą istniejące w przepływie różnice (czyli gradienty) prędkości. Występują one w przypadku przepływu w rurze, gdzie prędkość na ścianie wynosi zero, a jej wartość w osi rury jest największa. Ta zmiana prędkości, jeśli będzie odpowiednio duża, spowoduje powstanie turbulencji. Innym przykładem jest wspomniana już niestabilność Kelvina-Helmholza, gdzie dwie, równoległe strugi płynu poruszają się z różnymi prędkościami. W miejscu ich zetknięcia powstają turbulencje wirowe. Turbulencja powstaje również w obecności sił wyporu, czyli w obecności różnic gęstości. Ogrzewanie wody np. w garnku powoduje powstanie ruchów termicznych, cieplejsza woda w pobliżu dna ma mniejszą gęstość, zaczyna więc unosić się do góry, powodując powstanie ruchów wirowych.

Skąd biorą się turbulencje w atmosferze? Kiedy słońce ogrzewa powierzchnię ziemi, cieplejsze powietrze unosi się do góry tworząc turbulentną atmosferyczną warstwę graniczną. Dodatkowo, jeśli powietrze jest wilgotne i podczas unoszenia ulega schłodzeniu, wtedy na pewnej wysokości para wodna zaczyna się skraplać tworząc chmurę. Podczas skraplania wydziela się ciepło, co dodatkowo „turbulizuje” powietrze. Turbulencja jest bardzo silna w chmurach burzowych typu „cumulonimbus”. Poza tym zdarzają się potencjalnie niebezpieczne turbulencje czystego nieba (ang. Clear Air Turbulence - CAT). W przeciwieństwie do chmur, nie widać ich na radarach. Turbulencja czystego nieba może powstać np. w pobliżu chmur burzowych, blisko masywów górskich, ale najczęściej wywołują ją obecne w atmosferze tzw. prądy strumieniowe. Intensywna turbulencja występuje również w śladzie za lecącym samolotem (podobnie jak ma to miejsce w przypadku płynącego po wodzie statku).

Z punktu widzenia pasażerów samolotu turbulencje można stopniować. Turbulencje „lekkie” to takie, które



Rys. 6. Autor: Zofia Waclawczyk

powodują lekkie drgania samolotu. Przy turbulencjach „średnich” pasażerowie odczuwają duży dyskomfort i często zaczynają krzyczeć. „Silne” turbulencje mogą spowodować krótkotrwałą utratę sterowności samolotu. W końcu turbulencje „ekstremalne” to takie, przy których pilot traci kontrolę nad samolotem oraz które mogą prowadzić do zniszczenia elementów poszycia. Turbulencje „ekstremalne” występują jednak tylko w centralnej części najsilniejszych chmur burzowych. Piloci omijają takie chmury z daleka. Poza tym, nowoczesne samoloty mogą wytrzymać nawet ciężkie wstrząsy.

### Co robią piloci, aby poradzić sobie z turbulencjami?

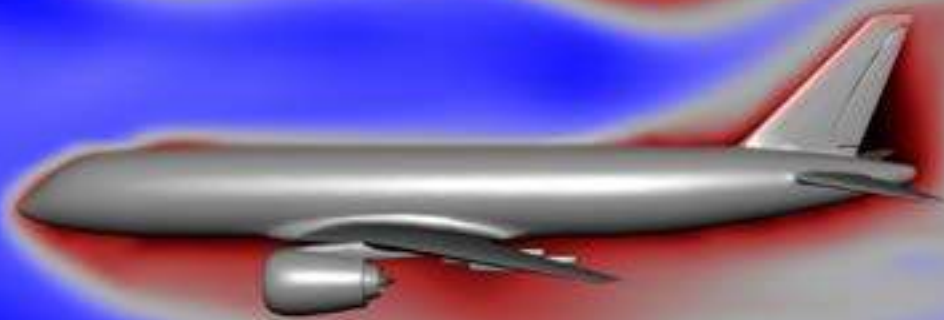
Przede wszystkim, jak już wspomniano, omijają widoczne na radarach chmury burzowe. Poza tym studiują mapę pogody i widzą gdzie występują prądy strumieniowe, czyli gdzie potencjalnie napotkać można turbulencje czystego nieba (CAT). Piloci informują się wzajemnie o miejscach wystąpienia CAT. Aby uniknąć turbulencji w śladzie za innym samolotem, maszyny latają, lądują i startują w dużej odległości od siebie. Jeśli mimo tego samolot wleci w obszar turbulencji, np. przelatując przez chmurę, włącza się sygnalizacja „zapiąć pasy”. Przy silniejszych wstrząsach pilot będzie starał się wylecieć z obszaru turbulencji, zmniejszyć ewentualnie prędkość do takiej, przy której turbulencje są mniej niebezpieczne dla samolotu oraz odpowiednio zmienić ustawienia autopilota, aby nie stracić kontroli nad samolotem.

Turbulencje w czasie lotu to najczęściej turbulencje „lekkie” lub „średnie”. Mimo, że powodują dyskomfort, nie są niebezpieczne dla samolotu. Często jednak zdarza się, że nieprzyjęci pasami pasażerowie i załoga doznają dotkliwych obrażeń i z tym właśnie wiąże się największe zagrożenie. Aby go uniknąć warto pozostawić pasy zapięte, najlepiej podczas całego lotu. Jeśli to możliwe, dobrze jest również kupić miejsca w centrum samolotu, blisko jego skrzydeł. Tam turbulencje będą mniej odczuwalne.

Marta Waclawczyk  
Wydział Fizyki UW

#### ŹRÓDŁA:

- [1] J. Pozorski „Zagadnienia turbulencji w mechanice płynów” Zeszyty naukowe IMP PAN
- [2] Animacja przedstawiająca niestabilność Kelvina-Helmholza ([https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kelvin-Helmholtz\\_Instability.ogg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Kelvin-Helmholtz_Instability.ogg)) KHI.gif: Bdubb12derivative work: -raeky (talk | edits), domena publiczna, Wikimedia Commons
- [3] Podcast: When is Turbulence DANGEROUS?! [https://www.youtube.com/watch?v=EuLURmITq\\_E&t=0s](https://www.youtube.com/watch?v=EuLURmITq_E&t=0s)



# Metody doświadczalne w aerodynamice

Foto – Adobe Stock

Do analizy własności aerodynamicznych i osiągnięć każdego statku powietrznego konieczna jest znajomość charakterystyki aerodynamicznej całego statku, jak również stosowanych w nich profili skrzydeł, usterzeń itd. Wartości współczynników potrzebnych do ustalenia tych charakterystyk zazwyczaj uzyskuje się za pomocą pomiarów przeprowadzonych w tunelach aerodynamicznych.

Andrzej Wasiak

## Tunele aerodynamiczne

Tunele aerodynamiczne są to urządzenia, w których strumień gazu opływającego badane ciało lub ich modele wytwarzany jest sztucznie.

Zaprojektowanie współczesnego samolotu wymaga dokładnych i długotrwałych badań tunelowych, przy czym rola tuneli aerodynamicznych jest ważna zarówno w pracach dotyczących dużych prędkości (np. badania naddźwiękowego samolotu pasażerskiego trwały 10 lat), jak i umiarkowanych prędkości.

W zakresie małych prędkości szczególnego znaczenia nabierają badania przejściowych faz lotu samolotu, kiedy wykorzystywana jest mechanizacja skrzydła. W lotach z prędkościami przydźwiękowymi duży nacisk kładzie się na badania przejścia laminarnej warstwy przyściennej w turbulentną, wpływem gładkości powierzchni oraz wzajemnego oddziaływania fali uderzeniowej w warstwy przyściennej.

W zakresie prędkości nad i hiperdźwiękowych ważne są badania nagrzewania aerodynamicznego i jego wpływu na konstrukcję. Konfrontowanie badań tunelowych z wynikami badań w locie wykazuje, że badania tunelowe zapewniają możliwość trafnego przewidywania i wystarczająco dokładnej ilościowej oceny interesujących zjawisk we wszystkich zakresach prędkości. Czas, koszty i bezpieczeń-

stwo badań są przy tym znacznie korzystniejsze w przypadku badań tunelowych niż w przypadku badań w locie.

W związku z tym zakres badań tunelowych coraz bardziej rozszerza się i – oprócz tematyki tradycyjnej – obejmuje coraz nowe zagadnienia, na przykład nagrzewanie aerodynamiczne, stateczności i sterowność w przejściowych fazach lotu (co w aerodynamice małych prędkości stanowi jeden z najtrudniejszych problemów), zrzuty ładunków z samolotów, własności spadochronów itp.

Współczesne tunele aerodynamiczne odznaczają się dużą różnorodnością układów konstrukcyjnych, wymiarów, sposobów zasilania itp. Spotyka się więc tunele o obiegu otwartym lub zamkniętym, o działaniu ciągłym lub krótkotrwałym, o otwartej lub zamkniętej przestrzeni pomiarowej, zwykle lub ciśnieniowe, tzn. zapewniające możliwość zmiany ciśnienia wewnętrznego w granicach od bliskiej zera do 5–10 atm, o silnie zróżnicowanych mocach, o różnych wymiarach – o długości od kilku do 200 m itd. Czynnikiem roboczym może być powietrze lub inny gaz o korzystniejszych własnościach fizycznych. W celu imitacji warunków panujących na dużych wysokościach (ważne w badaniach statków kosmicznych i silników) reguluje się temperaturę i gęstość czynnika roboczego.

Najbardziej miarodajnym kryterium klasyfikacji tunele jest maksymalna prędkość przepływu gazu, jaką można w nim uzyskać. Czynnikiem ten ma bowiem największy wpływ na wszystkie pozostałe własności konstrukcyjne

i użytkowe tunelu. Z tego powodu rozróżnia się sześć odmian tuneli aerodynamicznych w zależności od liczby Macha ( $Ma$ ), czyli stosunku prędkości płynu do prędkości dźwięku w płynie.

1. Tunele małych prędkości, w których prędkość przepływu gazu jest mniejsza od  $0,5 Ma$ .
2. Tunele poddźwiękowe ( $0,5 < Ma < 0,8$ ).
3. Tunele przydźwiękowe ( $0,8 < Ma < 1,5$ ).
4. Tunele naddźwiękowe ( $1,5 < Ma < 5$ ).
5. Tunele hiperdźwiękowe ( $5 < Ma < 14$ ).
6. Tunele ultradźwiękowe ( $Ma > 14$ ).

Dla poszczególnych odmian tuneli charakterystyczny jest sposób uzyskiwania jednorodności strumienia gazu, tzn. możliwie małej turbulencji i stałego ciśnienia statycznego na całej długości przestrzeni pomiarowej. W tunelach o prędkościach małych i poddźwiękowych jednorodność strumienia zapewnia stosowanie kolektora o odpowiednio dobranych kształtach i proporcjach geometrycznych, umieszczonych przed przestrzenią pomiarową. Powierzchnia jego przekroju jest od 4 do 30 razy większa od powierzchni części poziomej, a długość 1–2-krotnie większa od jego średnicy.

Zmniejszenie turbulencji uzyskuje się za pomocą jednej lub dwóch siatek prostujących. Przejście z kolektora do przestrzeni pomiarowej stanowi dysza, zapewniająca stopniowy wzrost prędkości przepływu. Stosunek szerokości do wysokości przestrzeni pomiarowej zazwyczaj nie przekracza 1,5.

Zwiększanie prędkości przepływu w zakresie  $Ma=0,8-1$  odbywa się przez zwiększanie stosunku ciśnień w kolektorze i przestrzeni pomiarowej (Rys. 1). (Np. liczbę  $Ma=1$  uzyskuje się, jeżeli stosunek ten wynosi 1,91). Przy prędkościach naddźwiękowych regulacja liczby  $Ma$  uzyskuje się przez zmianę lub regulację kształtów dyszy.

Przez długi czas największe trudności napotymano w uzyskiwaniu wiarygodnych wyników pomiarów tunelowych w zakresie prędkości przydźwiękowych. W tunelach o sztywnych ścianach prędkość przepływu osiąga prędkość dźwięku w przekroju maksymalnej powierzchni czołowej badanego ciała i elementów jego zawieszenia. Następnie przepływ staje się naddźwiękowy i w pewnym przekroju ponownie i gwałtownie przechodzi w poddźwiękowy, przy czym tworzy się prostopadła fala uderzeniowa.

Po powstaniu tej fali zwiększenie mocy zespołu napędowego nie pociąga za sobą wzrostu prędkości przepły-

wu, gdyż nadmiar mocy zostaje wówczas pochłonięty na fali i zwiększa się tylko ciśnienie i temperatura za nią. Zjawisko to nosi nazwę aerodynamicznego zablokowania tunelu. Gdy prędkość przepływu odpowiada liczbie  $Ma > 1$ , powstające w tunelu fale uderzeniowe rozprzestrzeniają się ku tylnej przestrzeni pomiarowej.

Sprężarki dużych tuneli przydźwiękowych wymagają zespołów napędowych o znacznych mocach rzędu 100 000 KM, a powietrze za sprężarką powinno być chłodzone. W tunelach przydźwiękowych sprawę napędu rozwiązuje się przez zastosowanie kilku silników turboodrzutowych. Przy odpowiedniej zabudowie potrafią one wytworzyć w przestrzeni pomiarowej prędkość ponaddźwiękową.

W tunelach naddźwiękowych konieczne jest dostosowanie kształtu dyszy i przestrzeni pomiarowej. Ciekawe rozwiązanie tego zagadnienia zastosowano w jednym z tuneli angielskich. Metalowe sprężyste ścianki dyszy mogą się znacznie odkształcać i przybierają odpowiedni obrys pod wpływem nacisku zewnętrznych obejm (Rys. 2), których siła nacisku i przemieszczenia są programowane za pomocą odpowiedniego systemu regulacji.

Czynnikiem ograniczającym zwiększanie prędkości w tunelach naddźwiękowych o działaniu ciągłym jest ogromny pobór mocy przez wielostopniowe sprężarki.

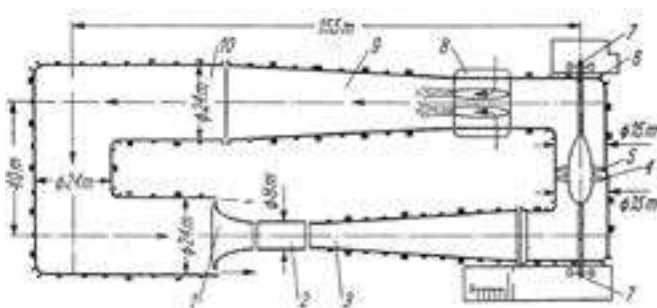
Do badań w zakresie prędkości hiper i ultradźwiękowych bywają używane tzw. tunele uderzeniowe. Budowa tunelu uderzeniowego jest stosunkowo prosta. W schematycznym ujęciu tunel taki składa się z długiej rury, w której pod wpływem uwolnienia znacznej ilości ciepła przemieszcza się fala uderzeniowa, stanowiąca odpowiednik strumienia.

W tunelach tych przepływ jest uzyskiwany przez nagrzanie krótkotrwałym łukiem elektrycznym, powstającym w wyniku rozładowania baterii kondensatorów. Natężenie prądu w impulsie może wynosić 1 mln A, a moc 20 mln kW.

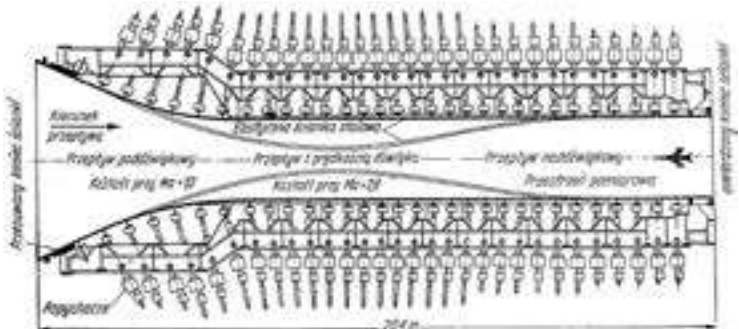
## Pomiary aerodynamiczne

Wszystkim doświadczalnym badaniom własności aerodynamicznych ciał stałych opływanych przez gaz muszą towarzyszyć pomiary różnych parametrów. Do pomiarów potrzebne są odpowiednie przyrządy. Pomiaru sił i momentów aerodynamicznych wykonuje się za pomocą wagi aerodynamicznej (Rys. 3).

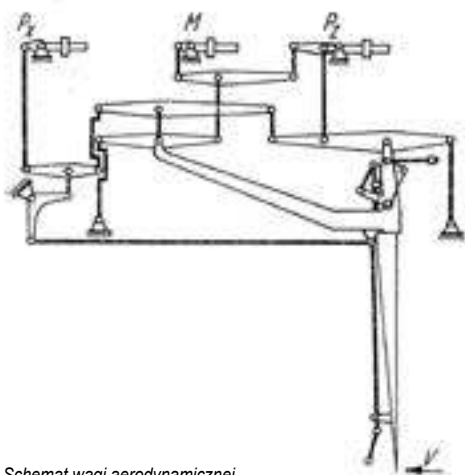
Dzięki pomiarom tych wielkości na przykład na modelu skrzydła, ustawionego pod różnymi kątami natarcia,



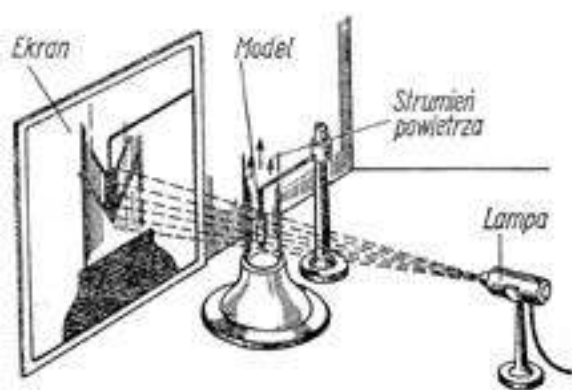
Rys. 1. Schemat przydźwiękowego tunelu aerodynamicznego ( $Ma=0,95$ ) z zamkniętą przestrzenią pomiarową.



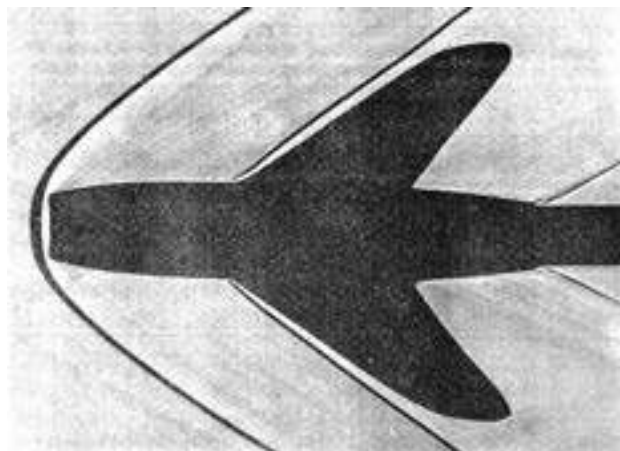
Rys. 2. Schemat regulowanej dyszy tunelu naddźwiękowego dla  $Ma=0,8-2,8$ .



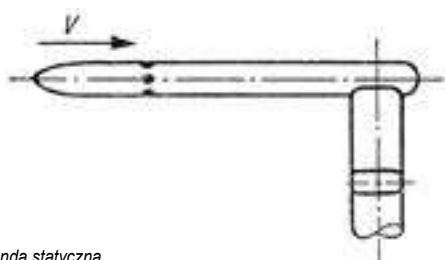
Rys. 3. Schemat wagi aerodynamicznej.



Rys. 4. Schemat wizualizacji przepływu w strumieniu naddźwiękowym metodą smugową.



Rys. 5. Powstanie fal uderzeniowych podczas naddźwiękowego opływu modelu samolotu.



Rys. 6. Sonda statyczna.

uzyskuje się dane zależności współczynnika siły nośnej i współczynnika oporu od kąta natarcia. Pomijamy tu opis technik przeprowadzania takich pomiarów, gdyż są to czynności złożone, którym poświęcone są oddzielne publikacje.

### Wizualizacja przepływu

W tunelach aerodynamicznych nie zawsze za cel stawia się uzyskanie wyników ilościowych. Interesujące są również badania o charakterze jakościowym, na podstawie których otrzymuje się obraz opływu badanego ciała. Przez stosowanie różnych metod wizualizacji przepływu, tzn. metod, które czynią strumień widzialnym umożliwia się fotografowanie lub filmowanie obrazu opływu. W ten sposób można ustalić usterki w opływie różnych ciał i wprowadzić odpowiednie korekty ich kształtu.

Posługując się tą metodą wizualizacji można wprowadzić odpowiednie poprawki do projektu aerodynamicznego samolotu i sprawdzić następstwa tych modyfikacji. Dzięki wizualizacji przepływu w licznych przypadkach uzyskuje się również dane ilościowe. Z tego względu metody te odgrywają ważną rolę we współczesnej aerodynamice doświadczalnej.

Jednym z najprostszych urządzeń służącym do wizualizacji przepływu jest tzw. tunel dymny. Wizualizację osiąga się w ten sposób, że z szeregu wąskich otworów wpływają równoległe strużki dymu opływające badany model.

Innym sposobem wizualizacji przepływu, stosowana w przepływach naddźwiękowych, jest metoda smugowa za pomocą promieni świetlnych. Umożliwia ona nawet obserwację fal uderzeniowych, powstających na opływającym modelu (Rys. 4.).

### Pomiar ciśnień i prędkości

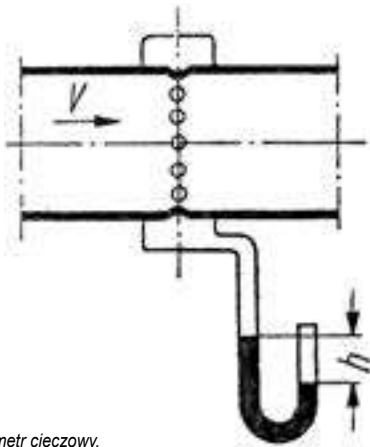
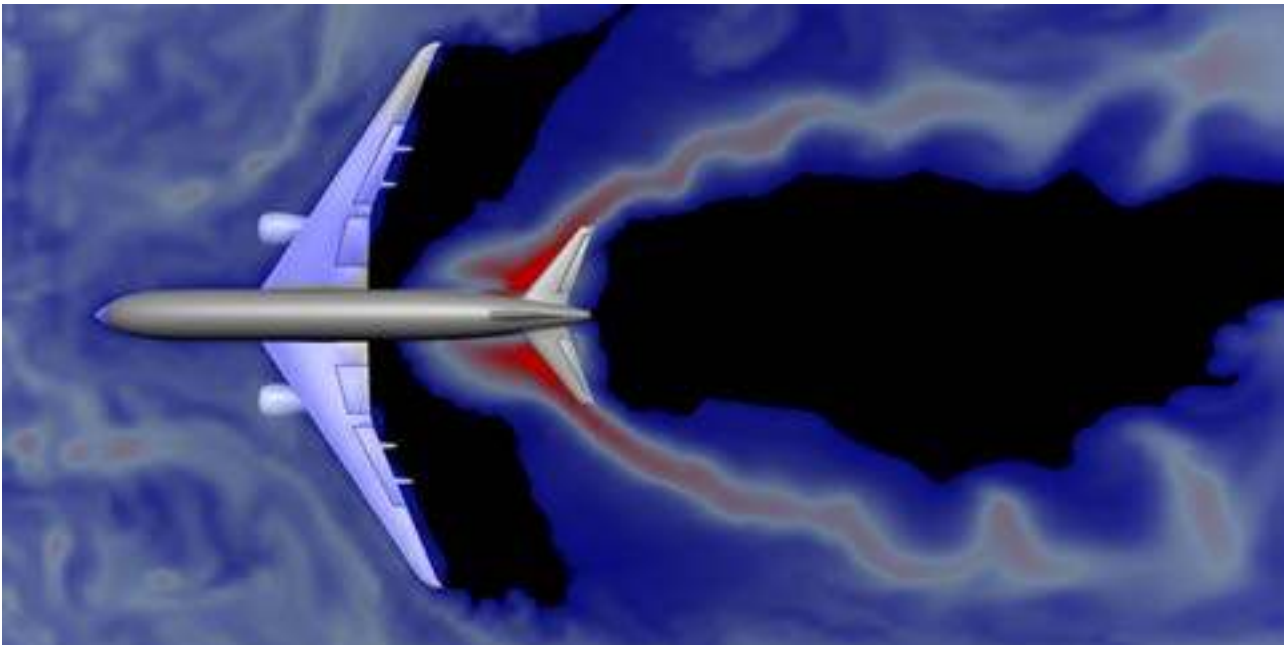
Podczas badania modeli w tunelach aerodynamicznych przeprowadza się jednocześnie pomiar wielkości związanych z samym strumieniem. Do najważniejszych z nich należą ciśnienie i prędkość. Pomiar tych wielkości powinny być dokładne, gdyż np. siła aerodynamiczna zależy od kwadratu prędkości, zatem niewielki błąd w ocenie prędkości prowadzi do znacznych niedokładności w obliczaniu sił aerodynamicznych.

Wyznaczanie ciśnienia i prędkości w danym punkcie jest związana z koniecznością umieszczenia przyrządu pomiarowego w tym punkcie. Przyrząd taki jednak zaburza ośrodek w bezpośrednim otoczeniu punktu, w którym należy wykonać pomiar. Kształt przyrządu pomiarowego odgrywa więc poważną rolę. Do pomiaru ciśnienia statycznego stosuje się tzw. sondę statyczną (Rys. 6.). Jest to zamknięta rurka o końcach opływowych. Na jej powierzchni bocznej znajdują się otworki o małej średnicy, których osie są prostopadłe do osi rurki.

Ciśnienie statyczne odbierane za pomocą sondy statycznej jest przekazywane do manometru, na którym odczytuje się mierzoną wartość. Manometr mierzy różnicę ciśnień w dwóch dowolnych obszarach. Jeden z nich jest obszarem badanym, drugi zaś obszarem, w którym ciśnienie jest znane, najczęściej bywa to ciśnienie atmosferyczne.

W aerodynamice doświadczalnej najbardziej rozpowszechnione są manometry cieczowe w postaci U-rurki

Foto – Adobe Stock



Rys. 7. Manometr cieczowy.

(Rys. 7). Ciśnienie doprowadza się do obu końców U-rurki, przy czym wysokość słupa cieczy wyznacza mierzoną różnicę ciśnień.

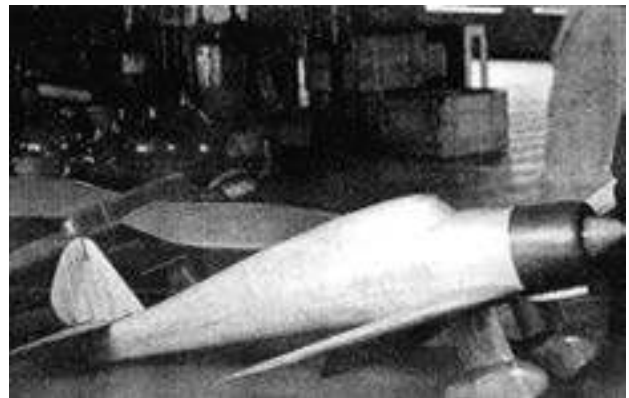
### Modele tunelowe

Celem badania aerodynamiki nowo projektowanych statków powietrznych buduje się ich modele w odpowiedniej skali. Wielkość takiego modelu zależy przede wszystkim od wymiarów tunelu aerodynamicznego a głównie od wielkości komory pomiarowej. Jeszcze przed II Wojną Światową istniał tunel aerodynamiczny na Politechnice Warszawskiej, za pomocą którego badano własności lotne szeregu nowych konstrukcji samolotów. Konkretnie modele tunelowe przedstawiona na rys. 8 i 9.

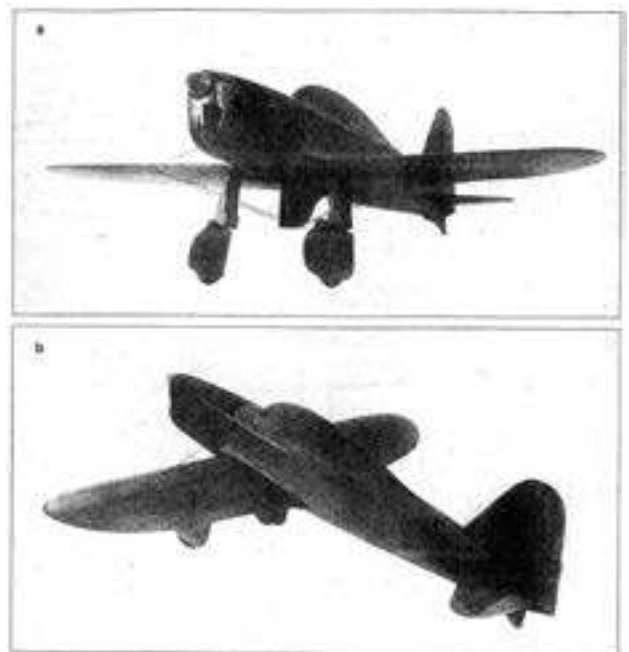
Andrzej Wasiak

#### LITERATURA

- [1] Szymon Pilecki, Lotnictwo i kosmonautyka Zarys encyklopedyczny. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1975.
- [2] Andrzej Cichosz, Rozwój samolotów naddźwiękowych. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1980.
- [3] Andrzej Morgała, Encyklopedia broni i uzbrojenia. Samoloty wojskowe w Polsce 1924–1939. Wydawnictwo Bellona. Warszawa 2003.



Rys. 9. Model tunelowy samolotu myśliwskiego PZL-45 Sokół. Z tyłu model LWS-7 Mewa II.



Rys. 8. Model tunelowy samolotu myśliwskiego PZL-39/LWS-4. a) widok z przodu, b) widok z tyłu.

# 110-lecie odkrycia nadprzewodnictwa (w krótkim zarysie)

Kazimierz Mikulski

Nadprzewodnictwo, zostało odkryte w 1911 r. W nadprzewodniku poniżej pewnej temperatury, nazywanej temperaturą krytyczną  $T_c$  opór elektryczny oraz indukcja magnetyczna spadają do zera.<sup>1</sup> Aktualnie naukowcy z Indian Institute of Science uzyskali nadprzewodnictwo w normalnej temperaturze i ciśnieniu.<sup>2</sup>

W 1905 r. rozpoczęto doświadczenia mające doprowadzić do skroplenia helu. Dopiero w 1908 r. James Dewar opublikował artykuł, w którym omówił wszystkie kłopoty i przeszkody w pracach nad skropleniem helu. Podczas korekty artykułu dopisał: Profesor H. K. Onnes skroplił hel 9 lipca 1908 r. Kamerlingh Onnes skroplił ostatni z naturalnych gazów – hel i rozwinął w Lejdzie badania przewodnictwa metali w niskich temperaturach.

Onnes zajął się badaniem własności substancji w temperaturze ciekłego helu. Doprowadziło to do odkrycia

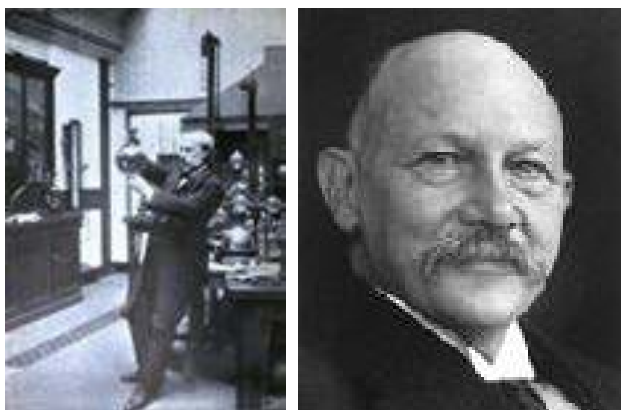
(z Gilles Holstw'em) w dniu 8 kwietnia 1911 r. zjawiska nadprzewodnictwa. Za całokształt prac otrzymał w 1913 r. Nagrodę Nobla.

W referacie<sup>3</sup> wygłoszonym w trakcie wręczania Nagrody Nobla odwołał się do swoich poprzedników, wymieniając na pierwszym miejscu Wróblewskiego i Olszewskiego – polskich pionierów kriogeniki.

Szukając odpowiedzi na pytanie o zachowanie się oporu elektrycznego czystych metali w najniższych temperaturach badano przewodnictwo platyny i złota oraz rtęci, łatwo uzyskiwanej w czystym stanie. Podczas pomiarów ustalano wartość temperatury, a następnie mierzono opór próbek.

Według relacji Gerrita Jana Flima opisaną przez Jacobusa de Nobela<sup>4</sup>, gdy oziębiono próbkę rtęci do temperatury nieco poniżej 4.2 K, jej opór spadł do zera. Pomiary wykonywał Gilles Holst, który wynik ten zinterpretował jako zwarcie elektryczne w układzie pomiarowym.

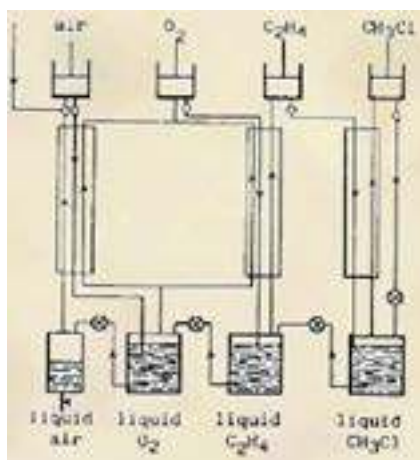
Odkrycie nadprzewodnictwa zawdzięczamy przypadkowi. Holst po raz kolejny mierzył opór rtęci w temperaturze poniżej 4.2 K i zdrzemnął się. Ciśnienie par helu w kriostacie nieco wzrosło. Wzrosła też temperatura



Fot. 1. Sir James Dewar (1842-1923)

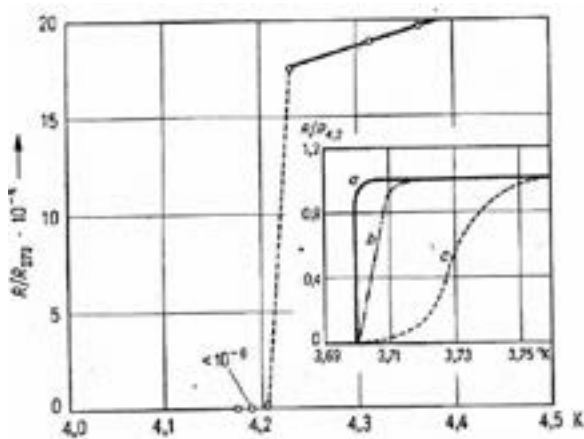
Fot. 2. Heike Kamerlingh Onnes (1853 – 1926)

Źródło: [http://pl.wikipedia.org/wiki/James\\_Dewar](http://pl.wikipedia.org/wiki/James_Dewar)  
Źródło: [http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/fizyka/c\\_nadprzewodnictwo/history/history.html](http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/fizyka/c_nadprzewodnictwo/history/history.html)



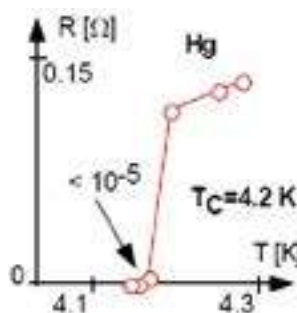
Rys. 1. Schemat metody kaskadowej zastosowanej przez H. K. Onnesa w trakcie osiągnięcia niskich temperatur i skraplania gazów. Aparatura udoskonalona przez Onnesa w 1906 r.

Źródło: Kolodziejczyk Andrzej, 100-lecie nadprzewodnictwa, <http://www.ftj.agh.edu.pl/doc/pl/seminarium/kolodziejczyk2011.pdf>



Rys. 2. Zjawisko całkowitego zaniku oporu elektrycznego nazwano nadprzewodnictwem. Dokładność pomiaru wskazana na rysunku.

Źródło: [za] Kolodziejczyk A., 100-lecie nadprzewodnictwa, <http://www.ftj.agh.edu.pl/doc/pl/seminarium/kolodziejczyk2011.pdf>



Rys. 2a. Obserwacje Kamerlingh'a Onnes'a oraz wykres dla cyny; a-monokryształ, b-forma gruboziarnista, c-forma drobnoziarnista polikrystaliczna  
Źródło: Owczarek I., Nadprzewodnictwo, [http://cmf.p.lodz.pl/iowczarek/materiały/fizyka/mibm\\_3nadprzew\\_new13.pdf](http://cmf.p.lodz.pl/iowczarek/materiały/fizyka/mibm_3nadprzew_new13.pdf)

<sup>1</sup> Wiśniewski A., Nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe, Delta, XII 2018 <http://www.deltami.edu.pl/temat/fizyka/materiały/2018/11/26/2018-12-delta-wisniewski.pdf>

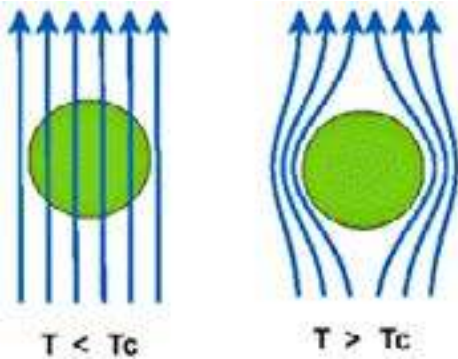
<sup>2</sup> Kowal A., Udało się osiągnąć nadprzewodnictwo w temperaturze otoczenia <https://whatnext.pl/udalo-sie-osiagnac-nadprzewodnictwo-w-temperaturze-otoczenia/>

<sup>3</sup> Szytuła A., 125 rocznica skroplenia składników powietrza, Instytut Fizyki UJ, FOTON 102, lato 2008

<sup>4</sup> Jacobus de Nobel, *Postępy Fizyki* 48, 379 (1997) – K.I. Wysokiński, Nadprzewodnictwo – pierwsze 100 lat <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1109/1109.0711.pdf>



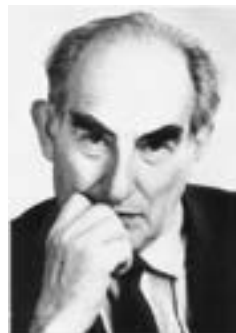
Fot. 3. Fritz Walther Meissner (1882-1974)

Fot. 4. Robert Ochsenfeld (1901-1993), Źródło: <http://pl.wikipedia.org/wiki/>

Rys. 3. Wypychanie zewnętrznego pola magnetycznego z wnętrza nadprzewodnika.

wrzenia helu przewyższając temperaturę przemiany badanej rtęci ( $T_c = 4.14$  K), co spowodowało pojawienie się skończonej wartości oporności próbki.<sup>5</sup> Opór elektryczny wybranych materiałów (nadprzewodników), schłodzonych poniżej temperatury, zwanej temperaturą krytyczną, maleje do niemierzalnej wartości.

Wykres z pracy H. Kamerlingha-Onnes'a<sup>6</sup> przedstawiający zależność oporności rtęci od temperatury wykonano 26 października 1911 r. Został opublikowany bez uwzględnienia wykonawców pomiarów.

Fot. 5, 6. Fritz Wolfgang London (1928 r.) i Heinz London  
Źródło: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/London%2CFritz\\_1928\\_M%C3%BCnchen.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/8/8c/London%2CFritz_1928_M%C3%BCnchen.jpg)  
<https://www.sciencephoto.com/media/226540/view/portrait-of-heinz-london>

Fot. 7, 8, 9. Witalij Łazarewicz Ginzburg (1916-2009), Lew Dawidowicz Landau (1908-1968), Aleksiej Aleksiejewicz Abrikosow (1928-2017)

Źródło: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/AA\\_Abrikosov\\_ANL1.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0e/AA_Abrikosov_ANL1.jpg)  
[https://www.wikizero.com/pl/Witalij\\_Ginzburg](https://www.wikizero.com/pl/Witalij_Ginzburg)  
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/0b/Landau.jpg>

<sup>5</sup> K. I. Wysokiński, Nadprzewodnictwo – pierwsze 100 lat, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1109/1109.0711.pdf>

<sup>6</sup> H. Kamerlingh Onnes, *Commun. Phys. Lab. Univ. Leiden*. Suppl. 29 (Nov. 1911) – Wysokiński K. I., Nadprzewodnictwo – pierwsze 100 lat, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1109/1109.0711.pdf>

<sup>7</sup> Zjawisko to jest podstawą do określenia, czy dany przewodnik o zerowym oporze elektrycznym jest nadprzewodnikiem. [https://pl.wikipedia.org/wiki/Efekt\\_Meissnera](https://pl.wikipedia.org/wiki/Efekt_Meissnera)

<sup>8</sup> Stephen Blundell, *Physics World* 24, no. 4, 26 (2011) [za] K. I. Wysokiński, Nadprzewodnictwo – pierwsze 100 lat, <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1109/1109.0711.pdf>

<sup>9</sup> Nagrody Nobla z fizyki (1962) za teorie materii skondensowanej, w tym ciekłego helu [https://pl.wikipedia.org/wiki/Lew\\_Landau](https://pl.wikipedia.org/wiki/Lew_Landau)

<sup>10</sup> Razem z W. L. Ginzburgiem oraz A. J. Leggett'em otrzymał w 2003 r. Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki, za badania nad nadprzewodnictwem i nadciekłością [https://pl.wikipedia.org/wiki/Aleksiej\\_Abrikosow](https://pl.wikipedia.org/wiki/Aleksiej_Abrikosow)

W 1933 r. dokonano wielkiego kroku. W. Meissner i R. Ochsenfeld odkryli drugą własność nadprzewodników – zjawiska usuwania z ich wnętrza pola magnetycznego.

### Istota idealnego diamagnetyzmu<sup>7</sup>

Strumień magnetyczny jest wypychany z próbki, kiedy zostaje ona schłodzona poniżej temperatury krytycznej w słabym zewnętrznym polu magnetycznym. Przejściu do stanu nadprzewodzącego, odbywającemu się w polu magnetycznym, towarzyszy powstanie prądów powierzchniowych o takim natężeniu, że ich własne pole magnetyczne redukuje się wzajemnie z polem zewnętrznym we wnętrzu próbki.

W 1934 r. bracia Fritz Wolfgang London (1900-1954) i Heinz London (1907-1970) przedstawili teoretyczny opis tych zjawisk uzupełniając elektrodynamikę Maxwella. Odkrycie braci polegało na obserwacji, że równania w odniesieniu do pola, a nie jego czasowych zmian poprawnie opisują wyniki doświadczenia Meissnera-Ochsenfelda. To F. London jako pierwszy zauważył, że nadprzewodnictwo i nadciekłość są przejawem kwantowych zjawisk w skali makroskopowej.<sup>8</sup>

Natomiast w 1950 r. Witalij Ginzburg (1916-2009) i Lew Landau (1908-1968) opublikowali teorię nadprzewodnictwa opartą na podstawach fenomenologicznej teorii przejść fazowych podanej wcześniej przez Landaua<sup>9</sup>.

Lata 1955-57 to czas, w którym A. A. Abrikosow (1928-2017) dokonał podziału nadprzewodników na dwa typy: nadprzewodniki I i nadprzewodniki II rodzaju. Określił w jaki sposób strumień pola magnetycznego przenika przez nadprzewodniki. Opisał wirową strukturę stanu mieszanego.<sup>10</sup>

Witalij Ginzburg i Lew Landau opublikowali teorię nadprzewodnictwa w oparciu o fenomenologiczną teorię przejść fazowych Landaua. Rozwiniętą przez Aleksija Abrikosowa i Gorkowa (GLAG),



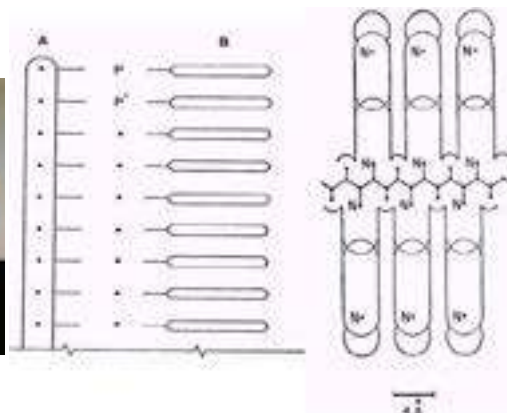
nych. Problem nadprzewodnictwa w strukturach organicznych był poruszany już w latach trzydziestych ubiegłego wieku przez Londona, po odkryciu i przebadaniu efektu Meissnera. Jednym z ciekawych wyników było zauważenie przez grupę<sup>16</sup> Ahmed'a interesującego zachowania się roztworu lizozynu w polu magnetycznym.

**Organiczne związki z przeniesieniem ładunku.**

Pierwszy organiczny nadprzewodnik został odkryty przez Bechgarda i Jerome w 1979 r. (T=0,9 K, p=12 kbar). Natomiast nadprzewodnik organiczny typu [TMTSF]2PF6 został odkryty przez K. Bechgaard i D. Jerome'a w 1980 r. Związki te charakteryzuje przewodnictwo prawie jednowymiarowe i niska koncentracja nośników. Nadprzewodnictwo odkryto również w związku b-(BEDT-TTF)<sub>2</sub>I<sub>3</sub>, dla którego określono temperaturę krytyczną o wartości 8,1K.

W 1966 r. W. A. Little przedstawił uwagi o syntezie substancji organicznej, która imitowałaby własności metalu nadprzewodzącego. Podkreślił, że stan nadprzewodzący charakteryzujący się wysokim stopniem uporządkowania wewnętrznego istnieć może w cząsteczce organicznej, gdy spełnia kryteria: cząsteczka powinna zawierać te same zasadnicze składniki charakteryzujące nadprzewodzący metal, a mianowicie ośrodek, w którym poruszały się elektrony, sprężystą strukturę będącą elektrycznie naładowaną, odgrywającą rolę sieci jonów.

Little proponuje użyć cząsteczki podobnej do DNA, gdzie atomy węgla tworzące kręgosłup odgrywają podobną rolę jak ciąg cukrowo-fosforanowy w DNA, a łańcuchy boczne są brane pod uwagę jak grupy zasadowe. W łańcuchu węglowym występują na przemian wiązanie pojedyncze i podwójne. Cząstka zachowywać się będzie jak metal, w którym elektrony mogą: poruszać się wzdłuż „kręgosłupa” zaproponowanej cząstki, czyli spełniają rolę nośników prądu i drugi rodzaj, to elektrony poruszające



Fot. 13. William A. Little  
 Źródło: [http://www.stanford.edu/dept/physics/people/faculty/shorts/little\\_william.html](http://www.stanford.edu/dept/physics/people/faculty/shorts/little_william.html)  
 Rys. 8. Propozycje modelu struktur nadprzewodnictwa zawarte w opracowaniach Little'a.

się wewnątrz każdego bocznego łańcucha. Wywołują one polaryzację i są zdolne wykonywać drganie z częstotnością f<sub>0</sub>, odgrywając rolę drgania sieci – fononu.

W skonstruowanym związku organicznym występuje mechanizm: elektrony przechodzące obok łańcucha bocznego, swoim polem elektrycznym polaryzują cząstkę owego łańcucha. W łańcuchu przemieszcza się jeden elektron powodując indukowanie ładunkiem dodatnim na końcu cząsteczki bocznej stykającej się z kręgosłupem. Duża prędkość elektronu w kręgosłupie powoduje, iż następuje przyciąganie drugiego elektronu z kręgosłupa do obszaru o max. wartości wzbudzonego ładunku dodatniego – powstałym za pierwszym elektronem. Obliczona temperatura przejścia wynosi około 2000 K.

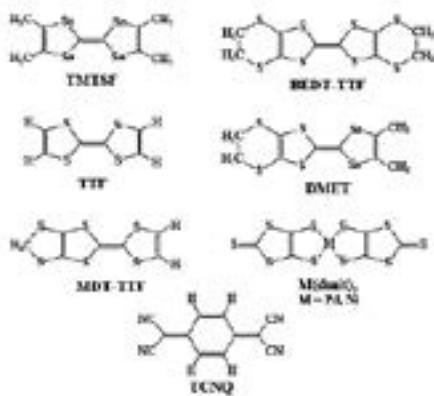
Prace Little'a wzbudziły żywą i krytyczną dyskusję. Jednak Ferrel<sup>17</sup> w swoich badaniach pokazał, że w modelach Little'go wahania gęstości elektronów, które mają miejsce także w nadprzewodnikach trójwymiarowych nie odgrywają tam większej roli. W jednowymiarowym przypadku doprowadzają do zniszczenia stanu nadprzewodzącego już przy dowolnie niskich temperaturach.

W kolejnym dziesięcioleciu Little ogłosił drugi model nadprzewodnika jednowymiarowego cząstki organicznej. W ogłoszonym w 1976 r. modelu kręgosłup taki składał się z łańcucha utlenionych atomów platyny, do których są przyłączone polaryzowane drobiny barwników. Zaproponował, by orbitale atomów platyny z łańcucha głównego nakrywały się tworząc liniową ścieżkę przewodzącą.

Teorie Little nigdy nie zostały potwierdzone lub obalone. Wskazano i wysunięto je celem zinterpretowania ciekawych rozważań. Pozostały niezwykle wpływowe na kolejne pokolenia naukowców.

**O nadprzewodnictwie wysokotemperaturowym**

W 1986 r. odkryto klasę materiałów nazwanych nadprzewodnikami wysokotemperaturowymi. To materiały, których temperatura krytyczna jest znacznie wyższa od temperatury konwencjonalnych nadprzewodników. Stwierdzono w 1993 r., że najwyższa wówczas temperatura krytyczna T<sub>c</sub> nadprzewodnika wysokotemperaturowe-



Rys. 6. Struktury organicznych związków, kandydatów do nadprzewodnictwa.

Źródło: <http://www.if.zut.edu.pl/sem/RTSC24.ppt>

Rys. 7. Publikacja W.A. Little w Physical Review. [Prehistoria RTSC: W.A. Little, Phys. Rev. Vol. 134, A1416 (1964)]

Źródło: <http://www.if.zut.edu.pl/sem/RTSC24.ppt>



<sup>16</sup> N. Ahmed i inni, Phys. Let. Vol. 53A, No 2 /1975/129  
<sup>17</sup> J. Dune, E. J. Brandas, Phs. Lett. 71A /1979/377

go  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{8+x}$  wynosiła 135 K, czyli  $-138^\circ\text{C}$ , pod ciśnieniem atmosferycznym. Pod wysokim ciśnieniem  $T_c$  wzrasta do 164K.

Za przełomowe dla nadprzewodników wysokotemperaturowych można uznać dwa odkrycia. Pierwsze, dokonane w 1986 r. przez Szwajcarów, A. Mullera i G. Bednorza<sup>18</sup>. Stwierdzili występowanie nadprzewodnictwa w ceramicznym materiale tlenkowym zawierającym lantan, bar, miedź i tlen  $(\text{La, Ba})_2\text{CuO}_{4-x}$ .

Temperatura krytyczna wynosiła 35 K. Drugiego dokonał na początku 1987 r., Amerykanin Paul Chu odkrywając nadprzewodnictwo w związku  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$ , z temperaturą krytyczną  $T_c = 92$  K. Nadprzewodnik konwencjonalny musi być zanurzony w ciekłym helu, natomiast nadprzewodnik  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x}$  może być zanurzony w ciekłym azocie. Ciekły hel jest dużo droższy i mniej dostępny od ciekłego azotu, a jego wytwarzanie i zastosowanie jest bardziej skomplikowane niż azotu.

Eksperyment przeprowadzony w 2015 r. pokazał, że rekordową temperaturę krytyczną,  $T_c = 203$  K, wykazuje siarkowodór  $\text{H}_2\text{S}$ . Stan nadprzewodzący obserwuje się pod ogromnymi ciśnieniami około 150 GPa.<sup>19</sup>

W grudniu 1986 r. odkryto, że zastąpienie baru przez stront podwyższyło temperaturę do 40 K.<sup>20</sup> Odkrycie z 1986 r. dokonane przez Bednorza i Mullera, to nadprzewodnictwo w rodzinie związków o ogólnym wzorze

$\text{La}_{2-x}\text{M}_x\text{CuO}_{4-y}$ , gdzie: M = Ba, Sr, Ca, K;  $x \approx 0.15$ ;  $y \approx 0$  o temperaturze krytycznej rzędu 35 K.

Już 16 lutego 1987 r.<sup>21</sup> Narodowa Fundacja ds. Nauki (USA) zakomunikowała, że grupa fizyków z Uniwersytetu Alabama w Huntsville oraz z Uniwersytetu w Houston zaobserwowała występowanie nadprzewodnictwa w temperaturze 92 K. Powtarzalne przejście do stanu nadprzewodzącego w temperaturze pomiędzy 80 K a 90 K zostało jednoznacznie stwierdzone metodą oporową, jak i magnetyczną w związku na bazie itru, baru, miedzi i tlenu (Y-Ba-Cu-O) pod umiarkowanym ciśnieniem.

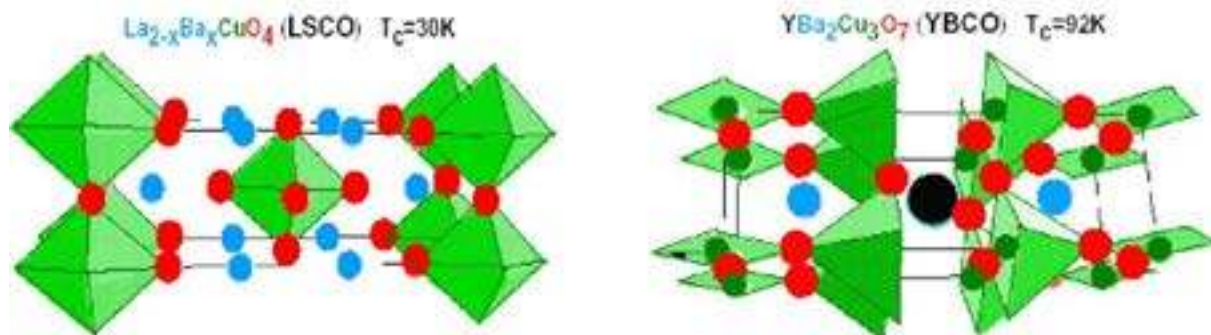
Paul Chu stwierdził, że utrzymanie związku baru pod ciśnieniem podwyższyło temperaturę krytyczną. W styczniu 1987 r. ogłosił w „Physical Review Letters” o uzyskaniu związku  $(\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-x})$  – podobnego do związków lantanu), który był nadprzewodnikiem przy temperaturze wyższej od temperatury ciekłego azotu ( $T_c = 90$  K). Związek  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_6$  jest izolatorem domieszkowanym poprzez zwiększanie zawartości tlenu tworzącego łańcuchy miedziowo-tlenowe. Jony tlenu przyciągają elektrony z płaszczyzn  $\text{CuO}_2$ , powodując przewodnictwo w tych płaszczyznach o charakterze metalicznym. YBCO ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+x}$ ) jest: izolatorem, gdy  $0 < x < 0,4$ , nadprzewodnikiem – gdy  $0,4 < x < 1$ .

W marcu 1988 r. odkryto związki talu  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  o temperaturze krytycznej 118K i 125K. Uzyskano związki bizmutowe  $\text{Bi}_2\text{Sr}_3\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$  oraz talowe  $\text{Tl}_2\text{Ca}_2\text{Ba}_2\text{Cu}_3\text{O}_{10}$ , które mają temperaturę krytyczną  $T_c = 125\text{K}$ .

W 1993 r. otrzymano związki o wyższych temperaturach krytycznych. Potwierdzoną temperaturę krytyczną 135 K obserwuje się w rtęciowych nadprzewodnikach  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$ . Większość nadprzewodników wysokotemperaturowych zawiera płaszczyzny miedziowo-tlenowe. Atom miedzi otoczony jest czterema atomami tlenu tworząc strukturę o symetrii grupy punktowej  $C_{4v}$ . Płaszczyzny oddzielone są tlenkowymi warstwami nieprzewodzącymi. W fazie normalnej przewodnictwo elektryczne w kierunkach równoległych do płaszczyzn miedziowo-tlenowych jest znacznie większe niż w kierunku prostopadłym. Więcej płaszczyzn miedziowo-tlenowych zawartych



Fot. 14, 15. Alex Müller i Georg Bednorz – odkrywcy nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego.  
Źródło: [http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/fizyka/c\\_nadprzewodnictwo/history/history.html](http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/fizyka/c_nadprzewodnictwo/history/history.html)



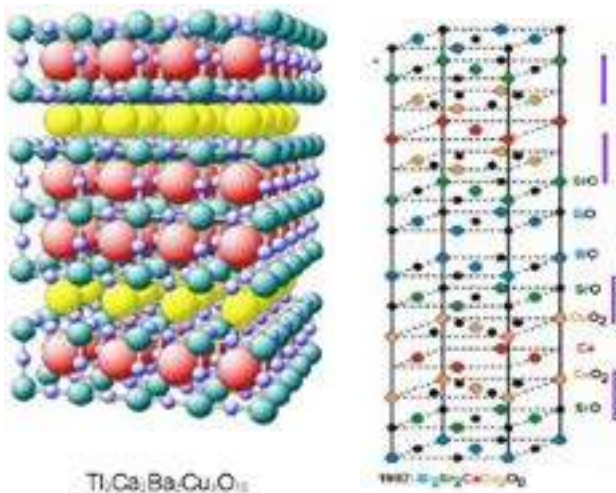
Rysunek 9. Struktury przestrzenne komórek elementarnych związków wysokotemperaturowych [<http://lodd.p.lodz.pl/~iowczarek/extra/hts.pdf>].  
Źródło: J. Mieczkowska, Nadprzewodniki wysokotemperaturowe [http://mf.duo.netstrefa.pl/seminarium\\_files/Nadprzewodniki%20wysokotemperaturowe.pdf](http://mf.duo.netstrefa.pl/seminarium_files/Nadprzewodniki%20wysokotemperaturowe.pdf)

<sup>18</sup> Nagroda Nobla z Fizyki w 1987 r.

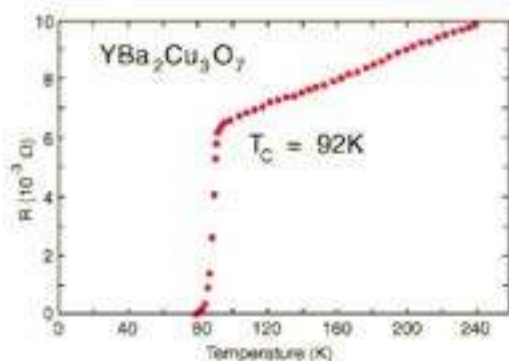
<sup>19</sup> ciśnienie w jądrze Ziemi to około 360 GPa

<sup>20</sup> Praca ukazała się w VIII 1986 r. w „Zeitschrift für Physik”, powodując lawinę doniesień o podobnych rezultatach.

<sup>21</sup> <http://www.iwiedza.net/materialy/m006.html>



Rys. 10. Struktury przestrzenne związków wysokotemperaturowych [http://lodd.p.lodz.pl/~iowczarek/extra/hts.pdf].



Rys. 11. Zanik oporu w temperaturze krytycznej związku wysokotemperaturowego [http://lodd.p.lodz.pl/~iowczarek/extra/hts.pdf].

w komórce elementarnej, czyni je zasadniczym elementem struktury nadprzewodników wysokotemperaturowych.

S. Baran w wykładach dla studentów, mówi o rekordzie należącym do  $HgBa_2Ca_2Cu_3O_x$  ( $T_k=133K$ ). Ze związkami tymi wiązano duże nadzieje na komercyjne zastosowania nadprzewodnictwa, ponieważ nadprzewodzą one w temperaturach wyższych od temperatury wrzenia ciekłego azotu (77K,  $-196^\circ C$ ). Badana jest klasa nadprzewodników wysokotemperaturowych żelazowo-arsenowe. Rekord należał do związków  $LnFeAsO_{1-x}F_x$  (Ln –lanthanowiec) z  $T_k$  dochodzącymi do 56K.<sup>22</sup> Badacze zaobserwowali zjawisko w temperaturze  $-37^\circ$  Celsjusza. Oporność nie była zerowa, lecz znacznie niższa niż w przypadku jakiegokolwiek innego metalu. W 2016 r. Artur P. Durajski komunikuje o nadprzewodnictwie wysokotemperaturowy w świetle najnowszycy wyników teoretycznych i doświadczalnych<sup>23</sup>.

### Zjawiska tunelowe w nadprzewodnikach

W badaniach zakomunikowanych w 1964 r. Ginzburg<sup>24</sup> rozpatrywał nadprzewodnictwo w dwuwymiarowych strukturach sandwichowych: metal–izolator. Warstwa roz-

<sup>22</sup> S. Baran – Podstawy fizyki materii skondensowanej – Nadprzewodnictwo

<sup>23</sup> Komunikat podany podczas XXI Mini Sympozjum Fizyki Statystycznej w Poznaniu <http://pearl.amu.edu.pl/wp-content/uploads/WP1.pdf>

<sup>24</sup> V.L. Ginzburg, Phys. Lett. 13 (1964) 101; V.L. Ginzburg, On the problem of high temperature superconductivity, Sov. Phys. JETP 19 (1964) 269; V.L. Ginzburg, D.A. Kirzhnits, On high-temperature surface superconductivity, Doklady Akad. Nauk SSSR 176 (1967) 553

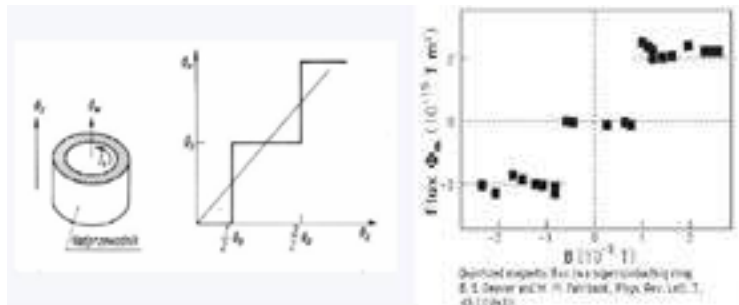
<sup>25</sup> J. Langer, Unusual properties of aniline black – does superconductivity exist at room temperature?, Solid State Communication 26 (1978) 839

<sup>26</sup> Dune J., Brandas E. J., Phys. Lett. 71A/1979/ 377



Fot. 16. Brian David Josephson (1940) – brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1973 r. (wraz z Esakim i Giaeverem) za swoją pracę nad teorią nadprzewodnictwa, w szczególności za odkrycie w 1970 r. tzw. efektu Josephsona

Źródło: [https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/ff/Brian\\_Josephson%2C\\_March\\_2004.jpg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/ff/Brian_Josephson%2C_March_2004.jpg)



Rys. 12. Zjawiskiem, które potwierdza kwantowy charakter strumienia magnetycznego w nadprzewodniku jest zjawisko Josephsona. Strumień magnetyczny może zmieniać się tylko w określonych porcjach – fluxon jest kwantem strumienia magnetycznego  $\phi = (h/2e) = 2,0678 \cdot 10^{-15} [Wb]$

Źródło: Owczarek I., Nadprzewodnictwo [http://cmf.p.lodz.pl/iowczarek/materialy/fizyka/mibm\\_3nadprzew\\_new13.pdf](http://cmf.p.lodz.pl/iowczarek/materialy/fizyka/mibm_3nadprzew_new13.pdf)

dzielająca dwa metale nadprzewodzące jest wystarczająco cienka. Nie grubsza niż odległość, z jakiej oddziałują ze sobą elektrony pary Coopera (np. ok.  $1 \div 2$  nm). Wówczas oprócz tunelowania elektronów normalnych może również wystąpić tunelowanie elektronów związanych w te pary. Złącze nazywamy złączem Josephsona. Stałe napięcie  $U$  przyłożone do złącza powoduje oscylacje o częstotści radiowej prądu par Coopera płynącego przez złącze.

$$J = J_c \sin \left[ \delta(0) - \left( \frac{2eVt}{\hbar} \right) \right]$$

Prąd oscyluje z częstością

$$\omega = \frac{2eV}{\hbar}$$

Zmienne napięcie o tej częstość powoduje obserwację „stopni”, występujących przy napięciu wynikającym z równania:

$$V_n = (nhv)/(2e)$$

gdzie:  $V_n$  – napięcie, odległość między stopniami na charakterystyce prądowo-napięciowej w polu mikrofal,  $n$  – numer kolejnego schodka,  $h$  – stała Plancka,  $v$  – częstotliwość klustronu,  $e$  – ładunek elektronu.

### Nadprzewodnictwo w temperaturze pokojowej<sup>25</sup>

Ginzburg proponuje układ „sandwich” zbudowany z dwóch warstw metalicznych oddzielonych od siebie warstwą dielektryka. W. Dune<sup>26</sup> potwierdza występowanie



Fot. 17. Kazimierz Antonowicz (1914-2003) i doniesienie naukowe o obserwacjach nadprzewodnictwa w temperaturze pokojowej

Źródło: <http://www.fizyka.umk.pl/wfaiis/?q=node/15938>

Źródło: [http://pl.wikipedia.org/wiki/Kazimierz\\_Antonowicz](http://pl.wikipedia.org/wiki/Kazimierz_Antonowicz)

wysokotemperaturowego nadprzewodnictwa w układach warstwowych typu aluminium-węgiel-aluminium, czyli (Al-C-Al). Zagadnieniem nadprzewodnictwa zajmował się w Polsce K. Antonowicz, który w 1974 r. podaje dla Al-C-Al temperaturę 300 K (około 23°C), czyli temperaturę pokojową.

Publikowano o tym w trzech pracach. Najważniejsza ogłoszona w 1974 r. w „Nature”<sup>27</sup>. Wyniki badań próbek węgla bezpostaciowego, przez które przepuszczano prąd elektryczny, informowały, że próbki te stają się nie tylko wielokrotnie bardziej przewodzące, ale i po wyłączeniu prądu „zapamiętują” ten stan. Interpretacja wskazuje na możliwość pojawienia się efektu nadprzewodnictwa w temperaturach pokojowych.

Antonowicz nigdy nie twierdził, że zaobserwował nadprzewodnictwo w temperaturze pokojowej, jedynie mówił o możliwościach pojawienia się takiego efektu. W swoich badaniach użył alkoholu furfurylowego (furfurol, 2-furylometanol, 2-furanokarbinol, 2-furylometanol,) – organicznego związku chemicznego z grupy alkoholi heterocyklicznych, pochodną furanu o wzorze: C<sub>4</sub>H<sub>3</sub>O-CH<sub>2</sub>-OH.

W badaniach uwzględniono, że układ warstwowy Al-C-Al wykazuje duże podobieństwo do złącza Josephsona.

Na rys. 15 widzimy, że próbka zachowuje się jak element omowy. W pewnym przedziale wartości napięcia obserwuje się narastanie prądu. Wzrost trwa określony czas, do pewnej wartości, po osiągnięciu której zauważalny jest ostry spadek prądu. W sytuacji, gdy układ warstwowy Al-C-Al osiągnął maks. wartości prądu K.

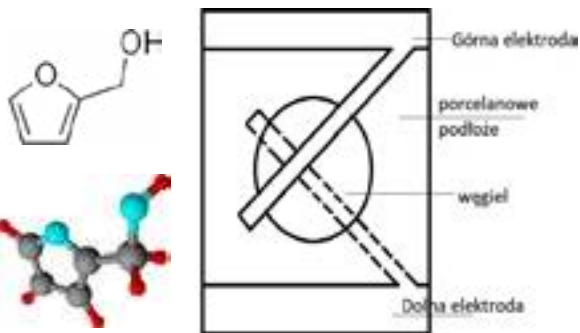
Antonowicz umieszczał badany element w polu mikrofal. W efekcie na charakterystyce I-U pojawiały się charakterystyczne stopnie, analogicznie jak w złączu Josephsona. Przypuszcza się, że w czasie narastania natężenia prądu, przy stałym lub zmieniającym się napięciu, istnieją obszary – jeziora, stanu nadprzewodzącego. Otrzymał wyniki przez K. Antonowicza, to przede wszystkim występowanie stopni na charakterystyce I – U, złącza Al-C-Al w polu mikrofal. Interpretuje się jako pojawienie się nadprzewodnictwa w temperaturze pokojowe<sup>28</sup>.

<sup>27</sup> K. Antonowicz, *Nature* **247**, 358 (1974).

<sup>28</sup> Należy dodać, że procesy zachodzą bardzo wolno i wpływa to na procedurę eksperymentu oraz rezultaty końcowe.

<sup>29</sup> Akademia Górniczo-Hutnicza, Wyd. Fizyki i Informatyki Stosowanej Katedra Fizyki Ciała Stałego <http://www.ftj.agh.edu.pl/doc/pl/seminarium/kołodziejczyk> 2011.pdf

<sup>30</sup> Ad.1

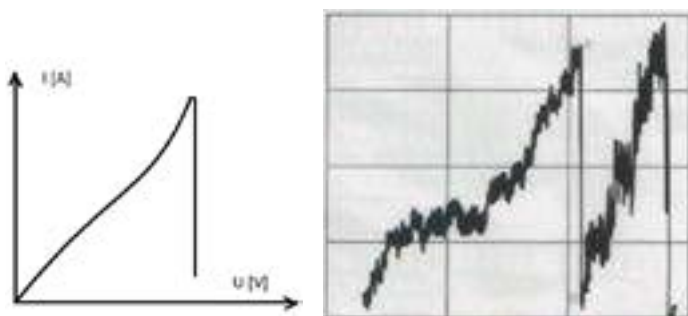


Rys. 13. Wzór strukturalny alkoholu furfurylowego

Źródło: [http://pl.wikipedia.org/wiki/Alkohol\\_furfurylowy](http://pl.wikipedia.org/wiki/Alkohol_furfurylowy)

Rys. 14. Schematyczne przedstawienie konstrukcji próbki do uzyskania charakterystyki I-U (napięciowo – prądowa) w układzie Al-C-Al.

Źródło: notatki własne [Mikulski K., *Efekt Josephsona, Toruń 1984, Praca mgr wykonana pod kierunkiem prof. dr K. Antonowicza, ss. 80*]



Rys. 15. Charakterystyka I-U (napięciowo-prądowa) w układzie Al-C-Al. otrzymana w trakcie badania w laboratorium K. Antonowicza.

Źródło: opracowanie własne [Mikulski K., *Efekt Josephsona, Toruń 1984, Praca mgr wykonana pod kierunkiem prof. dr K. Antonowicza, s. 84*]

## Podsumowanie

Nie napisano o zastosowaniach praktycznych, albowiem jest to temat na oddzielny artykuł, a jedynie o wydarzeniach tak ważnych dla świata, w których uczestniczyli także Polacy. Obszerniej pisze o tym A. Kołodziejczyk<sup>29</sup>. Mamy nadzieję, że przed badaczami i odkrywami wiele ciekawych tajemnic, o których dowiemy się wkrótce. Tak naprawdę zjawisko nadprzewodnictwa można by traktować jak coś egzotycznego – niskie temperatury, wysokie ciśnienia. Jednak to temperatury i ciśnienia, do których przyzwyczailiśmy się na Ziemi, są wyjątkowo egzotyczne.

Stan nadprzewodzący może być więc dużo bardziej fundamentalnym stanem materii niż się nam wydaje.<sup>30</sup>

Jak ważne jest ten stan w fizyce świadczy liczba nagród Nobla.

dr Kazimierz Mikulski  
Maksymilianowo

Tabela 1. Nazwiska uczonych, którzy otrzymali Nagrodę Nobla

Rok	Nazwisko badacza	Dokonywanie	Nagroda Nobla
1911	Heike Kamerlingh – Onnes	„Za jego badania dotyczące właściwości materii w niskich temperaturach, które doprowadziły, między innymi, do wytworzenia ciekłego helu.” <b>Odkrycie zjawiska nadprzewodnictwa</b>	1913
1952	Witalij Ginzburg	zapropozował do wyjaśnienia procesu nadprzewodnictwa koncepcję łączenia się elektronów w grupy o parzystej liczbie.	2003
1957	John Bardeen Leon Cooper John Schrie	„Za ich wspólne opracowanie teorii nadprzewodnictwa zwanej zwykle teorią BCS.” Twórcy mikroskopowej teorii nadprzewodnictw.	1972
1962	Lew Landau	„Za jego pionierskie teorie dotyczące skondensowanej materii, a w szczególności ciekłego helu.” <b>Wiele prac poświęcił nadprzewodnictwu.</b>	1962
1973	Leo Esaki; Ivar Giaever Brian Josephson	„Za ich empiryczne odkrycie zjawiska tunelowania w półprzewodnikach i nadprzewodnikach.” „Za teoretyczne przewidzenie własności prądu nadprzewodnictwa płynącego przez barierę tunelową, w szczególności tych zjawisk, które są znane jako efekty Josephsona.” <b>Elektronika tunelowa nadprzewodnictwa.</b>	1973
1986	Georg Bednorz Karl Müller	„Za postępy w odkrywaniu nadprzewodnictwa materiałów ceramicznych.” <b>Materiały ceramiczne a nadprzewodnictwo.</b>	1987
1985	Robert Curlow Richard Smalley Harold Kroto <i>CHEMIA</i>	“Za odkrycie fulerenów nowej odmiany węgla (obok grafitu i diamentu) w 1985.” <b>Odkrycie nowej odmiany węgla, które domieszkowane metalami alkalicznymi wykazują nadprzewodnictwo.</b>	1996
1950	A. A. Abrikosow W. L. Ginzburg A. J. Leggett	„Za pionierski wkład w rozwój teorii nadprzewodnictwa i nadciekłości.” <b>Wkład w rozwój teorii nadprzewodnictwa i nadciekłości.</b>	2003

Źródło: [za] Kołodziejczyk Andrzej, 100-lecie nadprzewodnictwa, <http://www.fj.agh.edu.pl/doc/pl/seminarium/kołodziejczyk2011.pdf>  
[http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/fizyka/c\\_nadprzewodnictwo/historia.html](http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/fizyka/c_nadprzewodnictwo/historia.html)  
[https://pl.wikipedia.org/wiki/Laureaci\\_Nagrody\\_Nobla\\_w\\_dziedzinie\\_fizyki](https://pl.wikipedia.org/wiki/Laureaci_Nagrody_Nobla_w_dziedzinie_fizyki)  
[https://pl.wikipedia.org/wiki/Laureaci\\_Nagrody\\_Nobla\\_w\\_dziedzinie\\_chemii](https://pl.wikipedia.org/wiki/Laureaci_Nagrody_Nobla_w_dziedzinie_chemii)  
<https://pl.wikipedia.org/wiki/Nadprzewodnictwo>

Tabela 2. Odkrycie nowych grup materiałów nadprzewodzących

Rok	Dokonywanie	Źródło
VIII 2018	Osiągnięto nadprzewodnictwo w 215 K w wodorku lantanu przy wysokich ciśnieniach.	A. P. Drozdov i inni, <i>Superconductivity at 215 K in lanthanum hydride at high pressures</i> , „arXiv: [cond-mat]”, 21 sierpnia 2018, arXiv:1808.07039 <a href="https://arxiv.org/abs/1808.07039">https://arxiv.org/abs/1808.07039</a>
XII 2018	Osiągnięto nadprzewodnictwo w 250 K kontynuacja badań z wodorotlenkiem lantanu przy wysokich ciśnieniach.	A. P. Drozdov i inni, <i>Superconductivity at 250 K in lanthanum hydride under high pressures</i> , „arXiv: [cond-mat]”, 4 grudnia 2018, arXiv:1812.01561. <a href="https://arxiv.org/abs/1812.01561">https://arxiv.org/abs/1812.01561</a>
III 2018	Rekord wynosił już 280 K – Nadprzewodnictwo w temperaturze bliskiej pokojowej w nadwodnikach przy ciśnieniach megabarowych - nowej klasy takich materiałów – superwodników (MH <sub>x</sub> , z x > 6).	<i>APS-APS March Meeting 2019 – Event – Near room temperature superconductivity in superhydrides at megabar pressures</i> , American Physical Society
IX 2019	<b>Nowy rekord 288 K – Nadprzewodnictwo w temperaturze pokojowej w węglowym wodorku siarki.</b>	Elliot Snider i inni, <i>Room-temperature superconductivity in a carbonaceous sulfur hydride</i> , „Nature”, 586 (7829), 2020, s. 373–377, DOI: 10.1038/s41586-020-2801-z <a href="https://www.nature.com/articles/s41586-020-2801-z">https://www.nature.com/articles/s41586-020-2801-z</a>

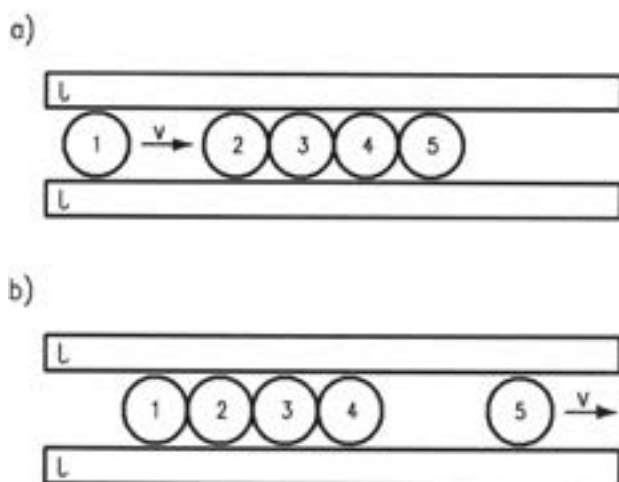
Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Nadprzewodnictwo#cite\\_note-5](https://pl.wikipedia.org/wiki/Nadprzewodnictwo#cite_note-5)

# Zderzenia zwykłe i niezwykłe

Stanisław **Bednarek**

Powszechnie występujące w przyrodzie zjawiska zderzeń warto zilustrować podczas nauczania doświadczeniami. Dobrze, żeby nauczyciel mógł je przygotować małym nakładem pracy, albo mogli to zrobić sami uczniowie. Opisy kilku interesujących doświadczeń, dotyczących zderzeń zawiera ten artykuł.

W artykule opublikowanym niedawno na łamach „Fizyki w Szkole” dr Julian Płoszajski zajął się opisem i analizą różnych przypadków zderzeń w makro- i mikroświecie [1]. Ponieważ fizyka jest nauką eksperymentalno-dedukcyjną, to doświadczenia, nawet najprostsze z wykorzystaniem przedmiotów codziennego użytku, powinny być możliwie często wykonywane podczas nauczania tego przedmiotu [2]. Niestety, praktyka pokazuje, że to

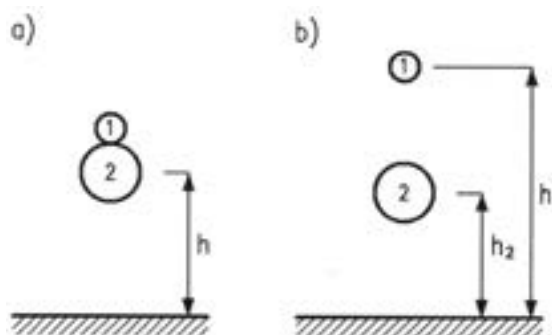


Rys. 1. Układ doświadczenia do pokazu zderzeń sprężystych centralnych wielu ciał o różnych masach: a) sytuacja przed zderzeniem, b) sytuacja po zderzeniu;  $L$  – linijka, 1-5 – kulki lub monety o równych masach  $v$  – prędkość.

wymaganie zwykle pozostaje niespełnionym życzeniem. Niniejszy artykuł ma na celu pomóc w spełnieniu tego życzenia. Dlatego opisano w nim sposoby przeprowadzenia kilku łatwych i efektownych doświadczeń, pokazujących interesujące przypadki zderzeń. W prosty sposób wyjaśniono również obserwowane zjawiska lub podano wskazówki, dotyczące ich wyjaśnienia.

## Zderzenia w jednym wymiarze

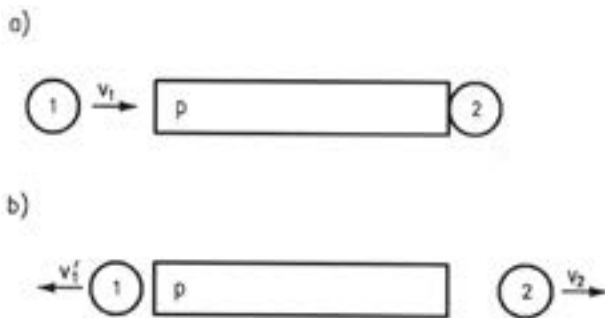
Do przeprowadzenia doświadczeń opisanych w dalszych częściach artykułu będą potrzebne sprężyste kulki stalowe o średnicy 10-15 mm. Odpowiednie kulki można wymontować ze zużytych łożysk. Stalowe kulki o takich rozmiarach są też sprzedawane w sklepach z łożyskami. Kulki te stanowią odpad przy produkcji łożysk, dlatego że mają średnice nie mieszczące się w granicach tolerancji i stąd nie nadają się do umieszczenia w łożyskach. Do przeprowadzenia opisanych eksperymentów te różnice średnic nie mają znaczenia. W niektórych doświadczeniach kulki mogą być zastąpione przez monety dwu-, albo pięciozłotowe.



Rys. 2. Układ doświadczenia do pokazu zderzeń sprężystych centralnych trzech ciał o różnych masach: a) sytuacja przed zderzeniem, b) sytuacja po zderzeniu;  $p$  – płaskownik, 1, 2 – kulki lub monety o równych masach,  $v_1$ ,  $v_2$  – prędkości odpowiednio przed i po zderzeniu.

Pierwsze doświadczenie jest odpowiednikiem tzw. kołyski, albo wahadła Newtona, przeprowadzonym znacznie mniejszym kosztem (rys. 1). (Kołyškę Newtona można od czasu do czasu kupić sklepach z gadżetami lub pamiątkami za kilkadziesiąt złotych). Na gładkiej, poziomej powierzchni, np. na stole lub na kawałku szyby, należy położyć w szeregu kilka kulek o równych masach 2-5 tak, żeby kulki stykały się ze sobą. Kulki można zastąpić jednakowymi monetami. Równoległe do szeregu kulek 2-5, po obu jego stronach, kładzie się linijki 1 i ewentualnie przymocowuje je do powierzchni taśmą klejącą. Między linijkami 1 i kulkami 2-5 powinna być niewielka szczelina. W pewnej odległości z lewej strony przed kulka 2 kładzie się pojedynczą kulka 1 i popycha ją palcami w kierunku pozostałych kulek. W wyniku tego zachodzą sprężyste i centralne zderzenia między wszystkimi kulkami [3]. W końcu z tego szeregu odskakuje skrajna kulka 5 po prawej stronie, a kulka popchnięta 1 i pozostałe kulki 2-4 zostają nieruchome. Podobnie, jak w kołysce Newtona, można powtórzyć to doświadczenie układając przed szeregiem po lewej stronie większą liczbę kulek i je popychając. Z szeregu po prawej stronie odskoczy wówczas tyle kulek, ile popchnięto, zaś pozostałe kulki będą nieruchome.

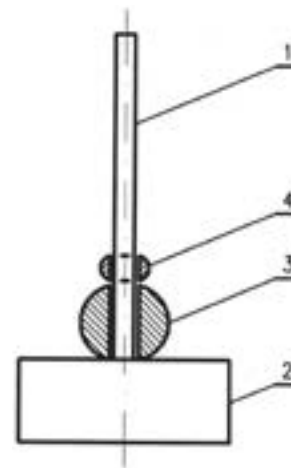
Następne doświadczenie dotyczy zderzenia sprężystego, prostego między ciałami o dużej różnicy mas (rys. 2). Na gładkiej, poziomej powierzchni należy położyć stalowy płaskownik p o grubości ok. 10 mm, porównywalnej szerokości i długości ok. 100 mm. Z prawej strony do płaskownika dotyka jedna kulka 2. Drugą kulka 1 o takiej samej masie należy położyć od strony przeciwległego końca płaskownika p i popchnąć palcami. Kulka 1, dolatuje do płaskownika p i zderza się z jego końcem. Po zderzeniu kulka 1 odbija się w kierunku przeciwnym prawie z taką samą prędkością, jak przed zderzeniem, ale przeciwnie zwróconą. Jest to zrozumiałe, ponieważ doświadczenie ilustruje odbicie sprężyste od ciała o bardzo dużej masie, np. od ściany. Obserwuje się jednak również odbicie początkowo spoczywającej kulki 2. Dlaczego tak się dzieje? Po uderzeniu kulki 1 w płaskownik p rozchodzi się fala sprężysta, odbijająca się od jego przeciwległego końca. Wracając ta fala, przekazuje energię, kulce 1. Część energii tej fali jest też przekazywana kulce spoczywającej 2 i powoduje wprawienie jej w ruch. W miejscu sty-



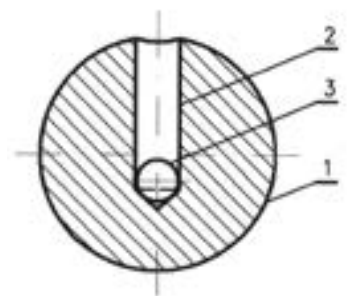
Rys. 3. Zderzenie sprężyste z masywną płytą dwóch kulek, spadających razem: a) sytuacja przed zderzeniem, b) sytuacja po zderzeniu; 1, 2 – kulki odpowiednio: o mniejszej i o większej masie,  $h, h_1, h_2$  – maksymalne wzniesienia środków masy nad płytą odpowiednio: układu obu kulek, kulki o mniejszej masie i kulki o większej masie.

ku płaskownika z tą kulka opór falowy jest mniejszy, niż w przypadku przechodzenia fali do powietrza [4]. Gdyby nie było kulki spoczywającej 2, to prędkość kulki nala-tującej 1 po odbiciu byłaby większa. To doświadczenie pozwala wnikać w mikroskopowe efekty, występujące podczas zderzeń.

Zaskakujący efekt daje bardzo proste doświadczenie, którego sposób przeprowadzenia przedstawia rys. 3. Dwie sprężyste kulki 1, 2 o znacznie różniących masach należy trzymać w zetknięciu ze sobą tak, żeby kulka o mniejszej masie 1 była nad kulka 2 o masie większej. Po puszczeniu kulek swobodnie na poziomą, sprężystą powierzchnię, może to być betonowa posadzka, spadają one razem i odbijają się od tej powierzchni. Jeżeli podczas odbicia kulki pozostają w kontakcie ze sobą jedna nad drugą, to po odbiciu kulka 1 o mniejszej masie osiąga znacznie większe maksymalne wzniesienie, niż kulka 2 o masie większej. Takie zachowanie kulek wynika z zasad zachowania energii i pędu [3]. To doświadczenie wymaga pewnej zręczności, dlatego jego przeprowadzenie ułatwia przyrząd pokazany na rys. 4. Zastosowano w nim pionowy pręt 1, zamocowany w sprężystej, masywnej podstawie 2. Pręt 1 stanowi prowadnicę dla spadających wzdłuż niego kulek 3, 4 o różnych masach z otworami przewierconymi wzdłuż ich średnic. Jeszcze bardziej niezwykły, wręcz magiczny efekt, można uzyskać, stosując rozwiązanie pokazane na rys. 5. W kulce 1 o większej masie jest wykonane cylindryczne, wydrążenie 2 skierowane wzdłuż jej średnicy. Wydrążenie wykonuje się przy użyciu twardego wiertła po zamocowaniu kulki 1 w imadle. Na dnie tego wydrążenia ukrywa się wcześniej przed widzami kulka 3 o mniejszej masie. Następnie należy pokazać kulka o większej masie 1, nie ujawniając, że znajduje się w niej kulka 3 i puścić swobodnie na sprężystą powierzchnię. Wówczas po odbiciu z kulki 1 wyskakuje z niej kulka 3 i wznosi się na znacznie większą wysokość, niż kulka 1. Gdy poprosić widzów o wyjaśnienie tego efektu, to nie mogą oni uwierzyć, że wewnątrz kulki 1 nie ma żadnej sprężyny, ani



Rys. 4. Przyrząd do pokazu różnicy maksymalnego wzniesienia po odbiciu sprężystym wspólnie spadających kulek o różnych masach: 1 – pręt, 2 – masywna podstawa, 4, 3 – kulki odpowiednio: o mniejszej i o większej masie.



Rys. 5. Najprostszy przyrząd do pokazu różnicy maksymalnego wzniesienia po odbiciu sprężystym wspólnie spadających kulek o różnych masach: 1 – sprężysta kulka o większej masie, 2 – wydrążenie, 3 – sprężysta kulka o mniejszej masie.

innego mechanizmu, a zaskakujące zachowanie kulki 3 można wyjaśnić korzystając jedynie z zasad zachowania energii i pędu

### Zderzenia w dwu wymiarach

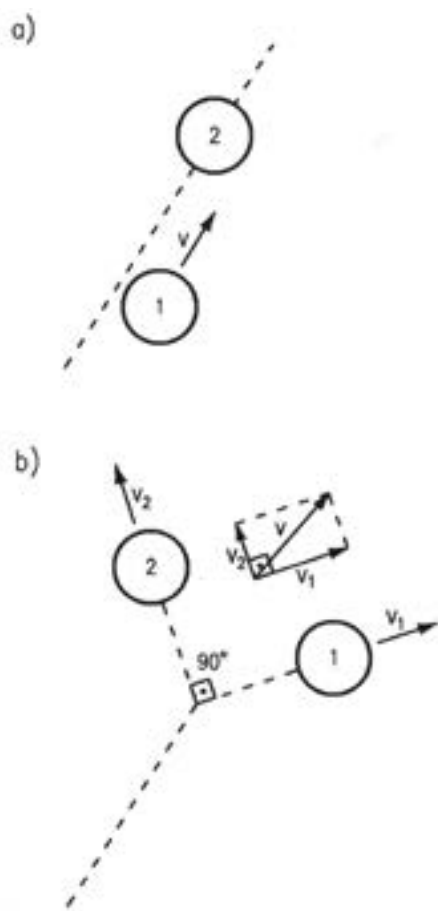
Klasyczny i interesujący przypadek takiego zderzenia zachodzi dla dwu kulek 1, 2 o równych masach, trafiających na siebie niecentralnie (rys. 6). W tym przypadku kulki po zderzeniu poruszają się w kierunkach wzajemnie prostopadłych. To doświadczenie wykonuje się układając dwie kulki o równych masach 1, 2 na gładkiej, poziomej powierzchni i popychając jedną z nich palcami tak, żeby trafiła w drugą, ale nieco z boku. Kulki można zastąpić jednakowymi monetami. Ten przypadek zderzenia odgrywa ważną rolę podczas analizy śladów reakcji w fizyce jądrowej i fizyce cząstek elementarnych, ponieważ pozwala wnioskować o równości mas oddziałujących obiektów.

Występując podczas strzelania z broni palnej zjawisko rykoszetu to też zderzenie w dwu wymiarach, co ilustruje doświadczenie pokazane na rys. 7. Podobnie, jak poprzednim doświadczeniu na gładkiej poziomej powierzchni należy ułożyć prostokątną płytkę stalową p o długości boków kilku cm i grubości ok. 10 mm. W przypadku braku kawałka blachy stalowej o odpowiedniej grubości można wykorzystać stalową część młotka – prostokątną część

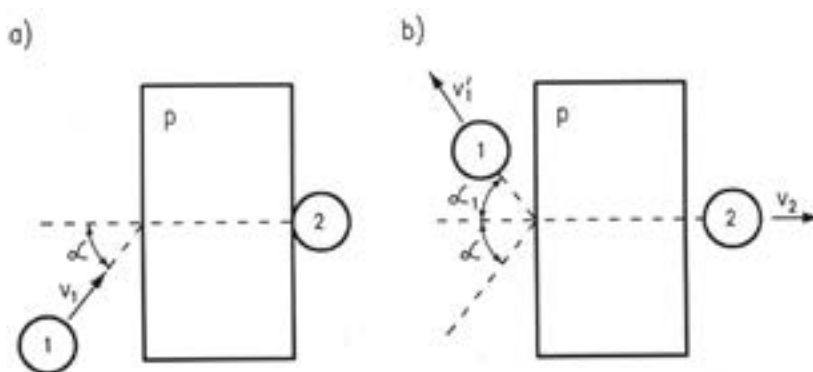
tw. obucha. Młotek wystarczy położyć wraz z trzonkiem płasko na poziomej powierzchni (fot. 1). Jeżeli z jednej strony płytki p położyć tylko kulkę 1 i popychając palcami nadać jej prędkość skierowaną ukośnie do boku płytki, to wówczas kulka 1 ulegnie odbiciu. To odbicie nastąpi pod kątem  $\alpha_1$ , takim samym jak kąt  $\alpha$ , pod którym kulka 1 uderzyła w płytkę p. Jest to właśnie sytuacja, która ma miejsce podczas rykoszetu. Jeżeli jednak po przeciwnej stronie do płytki p przyłożyć kulkę 2 o takiej samej masie, jak kulka 1, to wtedy kulka 2 też ulegnie odbiciu od płytki p w kierunku prostopadłym do boku, którego dotykała. Zachowanie się kulek wyjaśnia tak, jak w przypadku odbicia od płaskownika, rozchodzenie się fal sprężystych w płytce p, spowodowanych uderzeniem kulki 1. Opisane doświadczenie można łatwo powtórzyć dla płytki p w kształcie klina (rys. 8). W tym celu, jako płytkę można wykorzystać trójkątną część obucha młotka (fot. 2). Także w tej sytuacji odbicie kulki 2 nastąpi w kierunku prostopadłym do powierzchni, której dotykała.

### Zderzenia w układzie magnesów

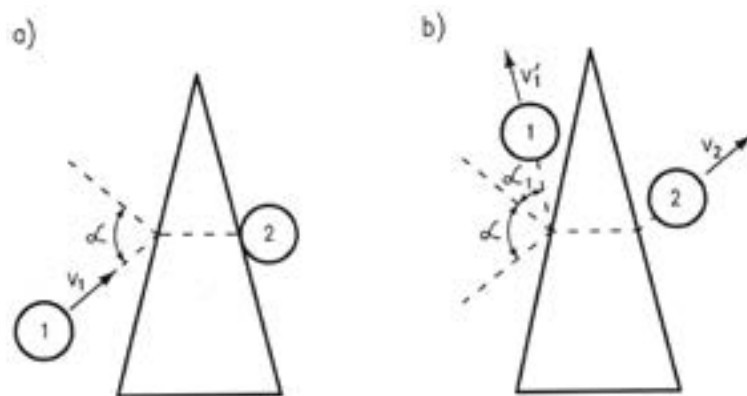
Podczas zderzeń nie zawsze musi zachodzić bezpośredni kontakt powierzchni zderzających się ze sobą obiektów. Pośrednikiem przy tym mogą być pola elektryczne lub magnetyczne, wytwarzane przez te objekty.



Rys. 6. Zderzenie sprężyste niecentralne dwóch kulek o równych masach: a) sytuacja przed zderzeniem, b) sytuacja po zderzeniu; 1 – kulka nalatująca, 2 – kulka spoczywająca,  $v$  – prędkość kulki nalatującej przed zderzeniem,  $v_1, v_2$  – prędkości kulek po zderzeniu.



Rys. 7. Odbicie sprężyste skośne kulek od masywnej płytki prostokątnej: a) sytuacja przed odbiciem, b) sytuacja po odbiciu; p – płyta prostokątna o dużej masie, 1 – kulka nalatująca, 2 – kulka spoczywająca,  $\alpha, \alpha_1$  – kąty odpowiednio: padania i odbicia kulki nalatującej,  $v_1, v_1', v_2$  – prędkości odpowiednio: kulki nalatującej i kulki odbitej.



Rys. 8. Odbicie sprężyste skośne kulek od masywnej płytki w kształcie klina: a) sytuacja przed odbiciem, b) sytuacja po odbiciu; p – płyta w kształcie klina o dużej masie, 1 – kulka nalatująca, 2 – kulka spoczywająca,  $\alpha, \alpha_1$  – kąty odpowiednio: padania i odbicia kulki nalatującej,  $v_1, v_1', v_2$  – prędkości odpowiednio: kulki nalatującej i kulki odbitej.



Fot. 1. Wykorzystanie obucha młotka, jako płyty prostokątnej do badania zderzeń.

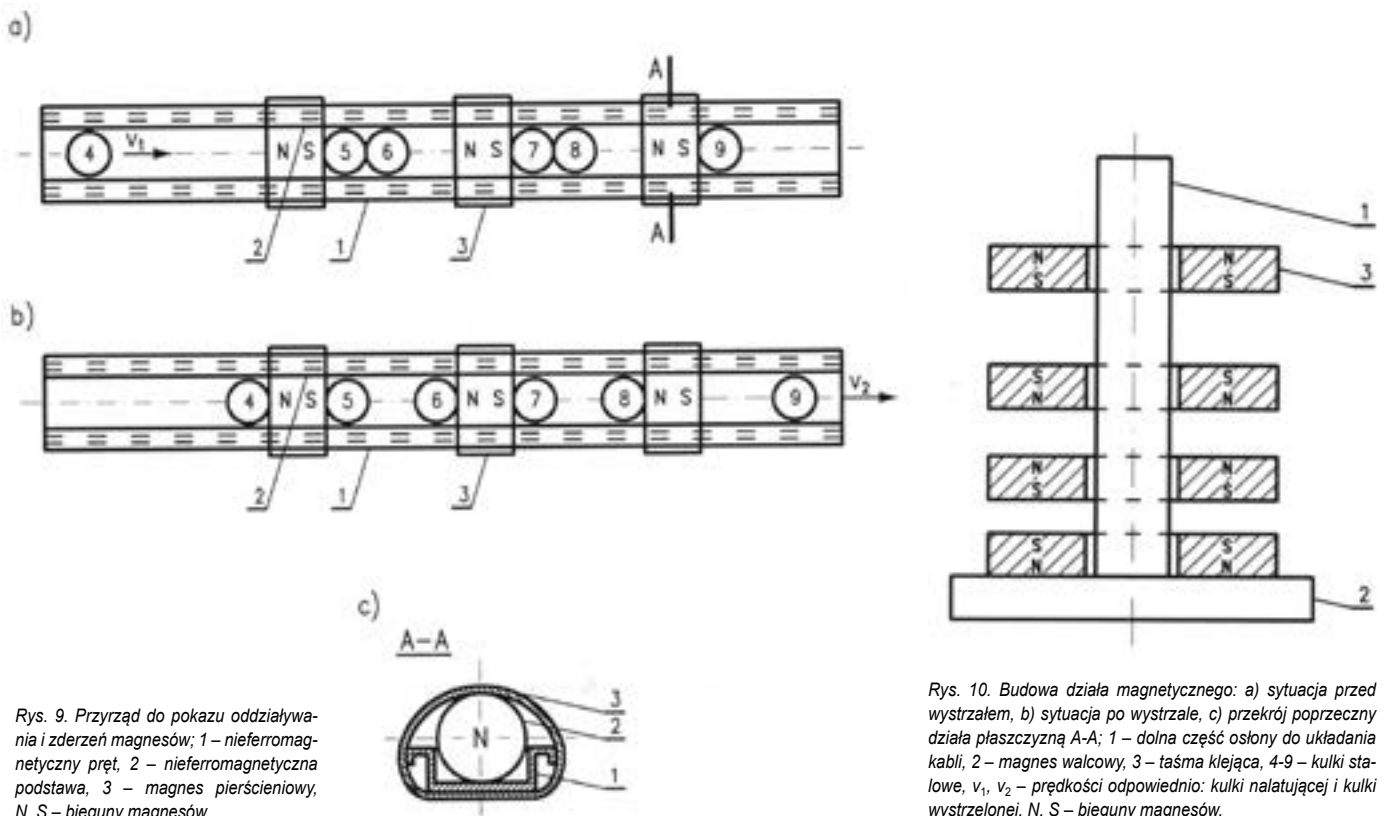


Fot. 2. Wykorzystanie obucha młotka, jako płyty trójkątnej do badania zderzeń.

Taki przypadek pozwala zademonstrować przyrząd pokazany na rys. 9. Do jego zbudowania wykorzystano pręt o przekroju okrągłym 1, przymocowany do podstawy 2. Pręt 1, podstawa 2 i łączące je elementy, np. wkręty muszą być wykonane z materiału nieferromagnetycznego, np. pręt z kawałka kija do szczotki, połączony z deseczką za pomocą mosiężnych wkrętów lub kleju. Na pręt nałożono kilka magnesów pierścieniowych 3, przy czym sąsiednie magnesy są zwrócone ku sobie biegunami jednoimiennymi. Dzięki temu magnesy 3 odpychają się wzajemnie. Między magnesami 3 jest dystans, malejący dla magnesów umieszczonych bliżej podstawy 2, ponieważ działa na nie większy ciężar wszystkich magnesów, położonych

nad nimi. Magnesy 3 znajdują się w stanie lewitacji, stabilizowanej w kierunku poziomym przez pręt 1. Jeżeli któryś z magnesów 3 zostanie lekko popchnięty w dół lub w górę, to spowoduje on oscylacje pozostałych magnesów kierunku pionowym. Magnesy 3 zachowują się tak, jakby między nimi następowały zderzenia bez stykania się ich powierzchni. Oczywiście, za ten efekt są odpowiedzialne siły magnetyczne, działające za pośrednictwem pola magnetycznego.

Interesującym przykładem wykorzystania zderzeń w układzie magnesów jest działo magnetyczne, nazywane też działem Gausa i pokazane na rys. 10 oraz fot. 3. Do kawałka dolnej części plastikowej osłony 1, używanej do układania kabli, zostało przymocowane w równych odstępach kilka walcowych magnesów 2 przy pomocy taśmy klejącej 3. Sąsiednie magnesy są skierowane ku sobie biegunami różnoimiennymi. Przykładowe wymiary magnesów walcowych 2, to średnica 12 mm i długość 10 mm, a odstęp między nimi 35 mm. Długość kawałka osłony 1 zależy od ilości użytych magnesów 2. Między magnesami są umieszczone jednakowe kulki stalowe 5-9. Dla podanych wymiarów magnesów odpowiednia średnica kulek wynosi 10 mm. W dalszej części rozpatrywane będzie dla uproszczenia działo zawierające trzy magnesy, ale oczywiście liczbę tych magnesów można zwiększyć. Początkowo w odstępach między magnesami 2 umieszcza się po dwie kulki 5, 6 i 7, 8 przylegające z lewej strony do każdego z magnesów 2. Ponadto za ostatnim magnesem 2 po prawej stronie umieszcza się jedną kulkę 9, przylegającą do tego magnesu też z lewej strony. Jeżeli przed pierwszym magnesem z lewej strony zostanie umieszczona taka sama kulka 4 i lekko popchnięta kierunku tego magnesu,



Rys. 9. Przyrząd do pokazu oddziaływania i zderzeń magnesów; 1 – nieferromagnetyczny pręt, 2 – nieferromagnetyczna podstawa, 3 – magnes pierścieniowy, N, S – bieguny magnesów.

Rys. 10. Budowa działu magnetycznego: a) sytuacja przed wystrzałem, b) sytuacja po wystrzale, c) przekrój poprzeczny działu płaszczyzną A-A; 1 – dolna część osłony do układania kabli, 2 – magnes walcowy, 3 – taśma klejąca, 4-9 – kulki stalowe,  $v_1$ ,  $v_2$  – prędkości odpowiednio: kulki nalatującej i kulki wystrzelonej, N, S – bieguny magnesów.



Fot. 3. Jeden z wykonanych modeli działa magnetycznego.

to kulka 9, przylegająca do ostatniego z magnesów 2 zostanie wystrzelona z prędkością  $v_2$  znacznie większą, niż prędkość  $v_1$  popchniętej kulki 4. Przed wystrzałem kulki 9 nastąpi też zmiana położenia pośrednich kulek 6 i 8, polegająca na tym, że zostają one przyciągnięte do prawych stron poprzedzających je magnesów 2.

W tym momencie należy postawić ważne pytanie. Skąd bierze się energia kinetyczna, potrzebna do zwiększenia prędkości kulki 9? Ta energia pochodzi ze zmiany energii potencjalnej oddziaływania magnetycznego kulek pośrednich 6, 8 i sąsiadujących z nimi magnesów 2. Kulki pośrednie 6, 8 znajdują się między magnesami 2 w tzw. stanie równowagi metastabilnej, z którego są wytrącane przez uderzenie popchniętej kulki 4. To uderzenie wytwarza falę sprężystą, która dochodzi do kulek 5 i 6, powodując oderwanie słabiej przyciąganej kulki 6. Oderwana kulka 6 jest przyspieszana w polu magnetycznym następnego magnesu 2. Po uderzeniu w ten magnes kulka 6 zostaje do niego przyciągnięta i wytwarza kolejną falę sprężystą, ale mającą amplitudę większą, niż fala poprzednia. Ta fala, powoduje analogicznie jak wcześniej oderwanie kulki 8, która z kolei uderzając w ostatni magnes 2 powoduje wystrzelenie kulki 9. W skrócie można to sformułować tak, że kulki 6, 8, po oderwaniu od magnesów 2 z lewej strony, są przyspieszane w polu magnetycznym między magnesami i uzyskują energię kinetyczną, którą w końcu przekazują wystrzeliwanej kulce 9, [5]. Po oddaniu strzału działko należy przygotować do ponownego użycia przekładając ręcznie kulki 4, 6, 8 i 9 do początkowych pozycji.

Zbadanie, od jakich parametrów zależy prędkość  $v_2$  wystrzelwanej kulki 9 i optymalizacja konstrukcji takiego działka, mająca na celu uzyskanie maksymalnej wartości tej prędkości są świetnym tematem na konkurs uczniowskich prac z fizyki. Działko magnetyczne jest nie tylko ciekawostką techniczną. W ostatnich latach zainteresowali się nim wojskowi w niektórych krajach. Skuteczność podobnych dział jest testowana m.in. w Marynarce Wojennej USA. Ich zaleta polega na nadawaniu pociskom prędkości znacznie większych, niż przy użyciu w tym celu materiałów wybuchowych.

Niewątpliwymi zaletami opisanych doświadczeń są bezpieczeństwo, niskie koszty i łatwość wykonania, a w kilku przypadkach także zaskakujące efekty. Niektóre z tych doświadczeń można poddać głębszej analizie, utrwalając tory poruszających się kulek i zapisując czas ich ruchu. Pozwala to dokładniej zmierzyć kąty i wyznaczyć prędkości. Dawniej do zaznaczania torów kulek w takich doświadczeniach używano kalki do pisania i papieru. W tym celu kulki wprawiano w ruch po arkuszu kalki, pod którą podkładano papier. Innym sposobem było pokrywanie kulek sadzą, albo tuszem kreślarskim i przeprowadzanie doświadczeń na arkuszu papieru [2]. Dziś w epoce drukarek komputerowych i kserokopierek cyfrowych kalka do pisania ręcznego lub na maszynie, czyli wykonywania tzw. przebitek, jest prawie zapomnianym rekwizytem muzealnym. Cały przebieg doświadczenia można jednak łatwo utrwalić za pomocą smartfona, albo kamery internetowej. Analiza zapisanych fotografii lub filmów otwiera nowe możliwości, które pozwalają uczniom lepiej zrozumieć prawa fizyki, rządzące obserwowanymi zjawiskami.

Stanisław Bednarek,  
Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej  
Uniwersytetu Łódzkiego

#### LITERATURA

- [1] J. Płoszajski, Zjawiska zderzeń w makro i mikroświecie, „Fizyka w Szkole Czasopismo dla Nauczycieli”, 28. Rocznik, LXX, nr 1 (2020).
- [2] T. Dryński, Doświadczenia pokazowe z fizyki, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa (1966).
- [3] S. Szczeniowski, Fizyka doświadczalna, cz. I, Mechanika i akustyka, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa (1972).
- [4] W. Mizerski (red.), Tablice fizyczno-astronomiczne, Wydawnictwo Adamantan, Warszawa (2013).
- [5] S. Bednarek, Gauss, cel, pal!, „Delta – matematyka, fizyka, astronomia, informatyka”, 18, Rocznik, XXXVIII, nr 8 (2013).

W następnym wydaniu m.in.

### MARIA GOEPPERT-MEYER: ŚLĄZACZKA, FIZYK, NOBLISTKA

Urodziła się 28 czerwca 1906 w Katowicach przy ulicy Młyńskiej 5, które w owym czasie należały do Cesarstwa Niemieckiego a zmarła w 1972 r w USA. Została ochrzczona w kościele ewangelicko-augsburskim w Katowicach przy ulicy Warszawskiej (rodzice ewangelicy). Śląsk opuściła w wieku trzech lat. Jej prace z fizyki jądrowej dotyczące powłokowej budowy jądra atomowego (fizyka kwantowa) były uhonorowane niebywałym sukcesem – Nagrodą Nobla w dziedzinie fizyki w 1963 r. Trzeba dodać, że ten sukces dotyczył tylko czterech kobiet w dziejach historii laureatów tejże Nagrody. Poza fizyką jej pasją była hodowla orchidei (storczyków).

## Żywoty fizyków –

# Isaac Newton (1642/43-1727)

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

Tadeusz Wibig

**Isaac Newton** to jedna z najważniejszych postaci w historii nauki w ogóle. O palmę pierwszeństwa w dziedzinie nauk fizycznych może walczyć chyba jedynie z Einsteinem. W odróżnieniu od dzieł Einsteina, owoce pracy Newtona znane są, wszystkim, którzy chodzili do jakiegokolwiek szkoły. Uważa się, że to on wymyślił grawitację i choć nie jest prawdą, że przed Newtonem ludzie unosili się w powietrzu jako ptacy, to właśnie jemu zawdzięczamy proste prawo opisujące jednocześnie i spadek z drzewa jabłka, i ruch Księżycy wokół Ziemi – **prawo grawitacji Newtona**.

Zmora uczniów na rozmaitych egzaminach i klasówkach z fizyki są trzy **prawa dynamiki Newtona**. Nie ważne, czy to on wymyślił je i zapisał po raz pierwszy, weszły one do życia naszego codziennego, a szczególnie to trzecie o akcji i reakcji, jako nieuprawnione niczym usprawiedliwienie przysłowia „*Jak Kuba Bogu, tak Bóg Kubie*”. Studenci cierpią przez Newtona próbując zgłębić przed kolokwiami tajniki **rachunku różniczkowego**, ale za to samo błogosławią go inżynierowie, budowniczowie, twórcy cywilizacji technicznej i naukowcy, dla których stanowi on podstawowe narzędzie pracy. Można by tak jeszcze długo. Dość, że Newtona wszyscy znają, choć oczywiście tak naprawdę wydaje im się to tylko.

O Newtonie napisano więcej książek niż normalny człowiek zdołałby przeczytać, bo postać to nietuzinkowa i poza tym, że nieprzeciętna, to i pokręcona ponad przeciętność. Streszczenie biografii Newtona na stronie, czy kilku stronach nie ma sensu, gdyż każdy bez wysiłku od-

najdzie w Internecie dużo więcej szczegółów już po kilku kliknięciach. Nie będziemy więc mówić o jego trudnym dzieciństwie. O tym, że ojciec zmarł przed jego urodzeniem i matka oddała dwuletniego Izaaka pod opiekę babci, a gdy miał lat szesnaście zabrała go ze szkoły chęć zrobić z niego rolnika, na co on oczywiście nie miał najmniejszej ochoty. Bardzo słusznie z naszego punktu widzenia.

Kluczowym momentem w życiu Newtona była tragiczna w skutkach epidemia dżumy w latach 1665/66. Z braku szczepionek jedyną formą ochrony przed nią była wtedy izolacja. W przypadku Newtona była to samoizolacja. Przez dwa lata siedział w swoim domu na wsi wymyślając i rozwijając tam swoją wersję rachunku nieskończonościowego. Wiekopomne dzieło „*Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*” Newton opublikował w 1687 roku, nie będziemy jednak o tym teraz mówić.

Nie opowiemy też pasjonującej historii o tym, jak łapał fałszerzy pieniędzy piastując stanowisko Strażnika, a potem Mistrza Królewskiej Mennicy i sędziego pokoju. Nie będziemy powtarzać opowieści, jak zasiadł dwukrotnie w Parlamencie i o jego zaskakującej aktywności tamże.

Moglibyśmy opowiedzieć też, o próbie inwestycji Newtona w akcje Kompanii Mórz Południowych, angielskiej spółki, posiadającej królewski monopol na handel z Ameryką Południową. Był to głównie handel niewolnikami, co nie przynosiło jednak wielkich zysków, aż do czasu, kiedy 1720 roku ktoś wpadł na pomysł zajęcia się obsługą długu narodowego Królestwa zamieniając znaczną jego część na akcje zabezpieczone właśnie państwowym długiem.

Po intensywnej akcji korupcyjnej i reklamowej ceny akcji poszybowały w górę od około 100 na początku roku,

do prawie 1000 funtów w sierpniu. Przypominało to słynny holenderski szał tulipanowy z lat 1636–1637, który wstrząsnął światem finansów, nie nauczył jednak niczego nie tylko chciwych kandydatów na milionerów, ale nawet takich zacnych i obdarzonych rozumem ludzi, jak Izaak Newton. Zainwestował on w akcje Kompanii 22000 funtów (dziś kilka milionów euro). Nie wiadomo dokładnie, ile na tym stracił, ale, gdy bańka spekulacyjna pękła, sam komentując całą aferę napisał „*I can calculate the movement of the stars, but not the madness of men*”.

Pod koniec życia Newton zajął się biblioznawstwem. Przejrzystość przemyślenia swoje w tym temacie skrzętnie ukrywał przed światem, podobnie jak i swoje traktaty i osiągnięcia alchemiczne. Nie będziemy mówić o jego poszukiwaniach kamienia filozoficznego i metody transmutacji, jakie zajmowały go nie mniej niż studia nad sekretami świątyni Salomona.

Wspomniemy jednak o notatce jaką uczynił około roku 1707. Zapisał wtedy na małej karteczce, która szczęśliwie zachowała się do dziś, że spodziewa się końca świata w roku 2060. Ponieważ niektórzy Czytelnicy mogą być tym żywotnie zainteresowani przedstawimy krótko, na czym opierał on swoją prognozę.

W oparciu o prorocstwo Daniela (12:7) koniec świata nastąpi, gdy upadnie Kościół jako taki, a potem początkowo zostanie jeszcze przez trochę czasu na przemyślenia, a dokładnie „*czas, i czasy i jeszcze pół czasu*”, co należy tłumaczyć jako rok i jeszcze dwa lata i jeszcze pół roku, czyli jakieś ~ 1260 dni (3,5 lat po 12 miesięcy, a każdy po 30 dni) podczas których dzieć się będą rzeczy straszne i dziwne.

Te 1260 dni, zdaniem Newtona, zamienić należy na lata (co nie jest niczym nowym: IV Mojż.14:34, czy Ezech.4:6.) i najważniejsze: początek liczenia tych lat Newton ustalił na rok 800 AD. W tym to roku nastąpiła bowiem koronacja Karola Wielkiego na Cesarza Zachodu, a tym samym definitywny rozłam Kościoła na całej ziemi i to wtedy zdaniem Newtona rozpoczął się okres ostatecz-

nego upadku ludzkości, klęsk, katastrof i wszelkich nieszczęść, które ciągle trwają i trwać będą, nim zakończy się wszechogarniającym chaosem i apokaliptycznym końcem wszystkiego w roku 2060, bo 800 + 1260 to właśnie 2060 c.b.d.o. Mamy zatem jeszcze trochę czasu.

Chcemy tu jednak wspomnieć o jego innym opublikowanym w 1704 mniej znanym dziele, o „*Optyce*” („*Opticks: or, A Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*”). Jest to w dużej mierze opisanie eksperymentów i wniosków, jakie wyciągnąć z nich można. Dziś dla nas, od czasu szkoły, gdy spojrzeliśmy w sposób „naukowy” na świat przez pryzmat, wiemy, że światło białe jest mieszaniną wszystkich kolorów tęczy. Nie mamy z tym problemów. Wiemy, czym są kolory i nawet niektórzy potrafią wyjaśnić skąd się bierze tęcza na niebie. Nikt nie zastanawia się, jak działają okulary, po prostu nosi się je na nosie i już. Teleskop nie jest czymś nadzwyczajnym, ale trzeba było być Newtonem, aby zastąpić soczewkę zwierciadłem i zbudować **teleskop Newtona**.

Poważna nauka o świetle stawiała dopiero pierwsze nowożytnie kroki, wiele istotnych pytań było wciąż do zadania i Newton nie tylko je zadawał, ale i odpowiadał, a co najmniej próbował odpowiedzieć na nie w „*Opticks*”: Czym są kolory? Dlaczego jedne rzeczy są innego koloru niż inne? Na czy polega to, że niektóre ciała są czarne? Czym jest ogień? Jak działa świeca? Jak światło jest postrzegane przez nasze oko? Itd, itd. Szesnaście podobnych prostych i skomplikowanych jednocześnie pytań zawarł w pierwszym wydaniu. Ostatecznie ich liczba urosła do 31 w wydaniu czwartym.

Podążając tą drogą, proponujemy poszukania odpowiedzi na inne proste pytanie.

Tadeusz Wibig  
Katedra Fizyki Teoretycznej  
Uniwersytet Łódzki

## Doświadczenie domowe:

### Pryzmat – jak działa (?)

#### A. Potrzebne materiały:

1. Pryzmat szklany albo
  - 1a) arkusz przezroczystej sztywnej plastikowej folii,
  - 1b) woda.
2. Wąska szczelina wycięta w sztywnym kartonie.
3. Lusterko.
4. Słońce.

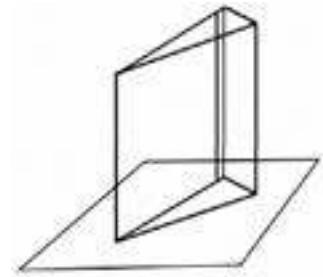
#### B. Narzędzia – urządzenie do klejenia na gorąco (przy braku pryzmatu), nożyczki.

#### C. Kolejność czynności:

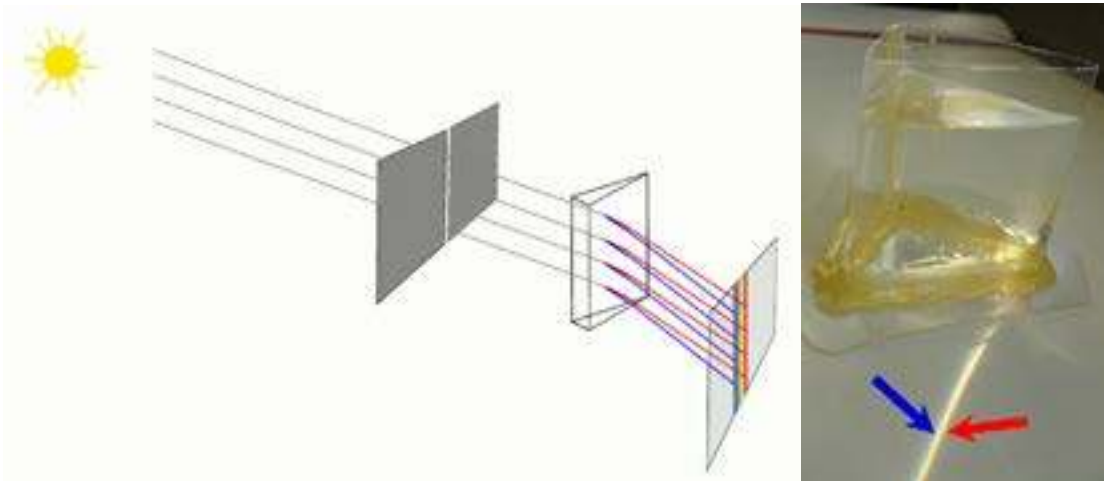
1. Przy użyciu nożyczek wyciąć w sztywnym kartonie szczelinę o szerokości około 1 mm i długości kilku centymetrów.
2. Ustawić ją pionowo.
3. Ustawić lusterko na drodze promienia słonecznego tak, aby skierować go w miarę poziomo na szczelinę.
4. (Przy braku szklanego pryzmatu)
  - a) Wyciąć z przezroczystej grubej folii prostokąt o wymiarach (4+4+1) cm na ~5 cm (wg rysunku).
  - b) Zaznaczyć delikatnie linie składania.



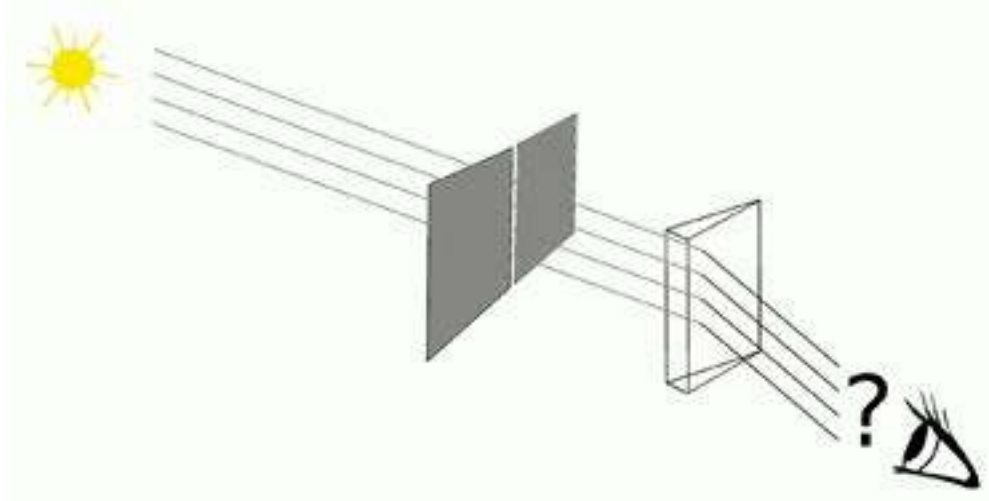
- c) Skleić z prostokąta powierzchnię boczną graniastostłupa o podstawie trójkąta równoramiennego (wg rysunku).
- d) Wyciąć z folii prostokąt (albo trójkąt) większy od podstawy graniastostłupa.
- e) Nałożyć gorącego kleju na ten prostokąt i wkleić doń powierzchnię boczną. Sprawdzić, czy jest skleiony wodoszczelnie (uwaga gorące!).
- f) Poczekać aż ostygnie.
- g) Nalać do tak zrobionego naczynka wody – i mamy pryzmat, nie najlepszy, ale zawsze.



5. Ustawić pryzmat na drodze wiązki światła za szczeliną.



6. Powinno być widać tęczę w załamanej w pryzmacie wiązce światła. Najmniej odchyłony od pierwotnego kierunku powinien być kolor czerwony, najbardziej niebieski.
7. Umieścić na drodze załamanej wiązki własne oko tak byśmy widzieli przez pryzmat wąską szczelinę.

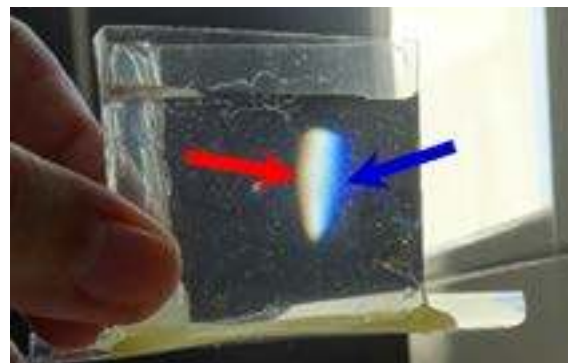


8. Popatrzeć uważnie, która krawędź szczeliny jest niebieska, a która czerwona.
9. Zamiast okiem można popatrzeć aparatem fotograficznym.

Fotografia pokazuje, co widać.

Kolor czerwony zamienił się miejscami z niebieskim.

Kto potrafi wytłumaczyć tę (pozornie) zaskakującą obserwację, ten wie naprawdę, jak działa pryzmat.



# Kwadratowe równania w zadaniach z fizyki

Czesław Surowiec

Rozwiązując zadania z fizyki niekiedy stwierdzamy, że wielkość szukana występuje w równaniu kwadratowym. Rozwiązując zadania z kwadratowym równaniem należy pamiętać, że:

1. Dwa pierwiastki jakie otrzymamy w wyniku rozwiązania tego równania wymagają przeprowadzenia dodatkowej analizy.
2. Dodatkowa analiza powinna dać odpowiedź na pytanie postawione w zadaniu.
3. Analizując wynik rozwiązania kwadratowego równania w postaci dwóch pierwiastków może się okazać, że:
  - a) Obydwa pierwiastki mają sens fizyczny, ale na pytanie postawione w zadaniu odpowiada tylko jeden pierwiastek.
  - b) Obydwa pierwiastki są rozwiązaniem zadania.
  - c) Jeden z pierwiastków nie posiada sensu fizycznego.
4. Aby wybrać prawdziwy pierwiastek jako rozwiązanie zadania należy bardzo uważnie analizować treść zadania, a zwłaszcza warunki zadania i pytanie, gdyż niewłaściwe odczytanie warunków i pytania może doprowadzić do błędnego wyboru (przykład 1).

Na początek rozwiązujemy dwa zadania, w których obydwa pierwiastki nie tracą sensu fizycznego, ale tylko jeden z nich spełnia warunki opisane w zadaniu.

## Przykład 1.

Kolarz poruszający się z szybkością  $v_1 = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  po prostoliniowej drodze przejechał przez most. Po  $t_0 = 3$  min przejechał przez most motocyklista poruszając się z prędkością  $v_2 = 19 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , a po przejechaniu przez most zaczął hamować z przyspieszeniem o wartości  $a = 0,15 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ . Po jakim czasie i w jakiej odległości dogoni kolarza?

### Rozwiązanie.

Za początek układu przyjmujemy koniec mostu, a oś  $x$  skierujemy zgodnie z ruchem kolarza i motocyklisty. Czas  $t$ , po którym motocyklista dogoni kolarza będziemy liczyć od momentu przejazdu motocyklisty przez koniec mostu. Współrzędną kolarza  $x_1$  i motocyklisty  $x_2$  zapiszemy wzorami

$$x_1 = v_1(t + t_0)$$

$$x_2 = v_2 t - \frac{at^2}{2}$$

W chwili dogonienia kolarza przez motocyklistę

$$x_2 = x_1$$

Po podstawieniu za  $x_2$  i  $x_1$  i przekształceniu, otrzymujemy równanie kwadratowe

$$\frac{at^2}{2} - (v_2 - v_1)t + v_1 t_0 = 0.$$

Rozwiązując to równanie względem  $t$  (co pozostawiam Czytelnikowi) otrzymujemy

$$t^2 - \frac{2(v_2 - v_1)}{a}t + \frac{2v_1 t_0}{a} = 0.$$

Pierwiastki tego równania wynoszą

$$t_{1,2} = \frac{v_2 - v_1}{a} \left( 1 \mp \sqrt{1 - \frac{2v_1 a t_0}{(v_2 - v_1)^2}} \right).$$

Podstawiając wartości dane otrzymujemy

$$t_1 = 80 \text{ s i } t_2 = 120 \text{ s.}$$

Aby odpowiedzieć na pytanie która z tych wartości odpowiada warunkom zadania obliczamy prędkości motocyklisty  $v_2'$  i  $v_2''$  po czasie  $t_1$  i  $t_2$

$$v_2' = v_2 - at_1 = 7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v_2'' = v_2 - at_2 = 1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Ponieważ  $v_2' > v_2''$  warunkom zadania odpowiada tylko pierwsze znaczenie czasu  $t_1 = 80$  s, wówczas motocyklista dogoni kolarza, gdyż jego prędkość jest większa od prędkości kolarza. Odległość, w której motocyklista dogoni kolarza wyniesie  $l = v_1(t + t_0) = 1040$  m.

Jednakże drugi pierwiastek może mieć sens fizyczny. Początkowo prędkość motocyklisty jest większa od prędkości kolarza i po czasie  $t_1 = 80$  s motocyklista dogoni kolarza a następnie wyprzedzi go. W miarę upływu czasu prędkość motocyklisty będzie maleć i po 100 s zrówna się z prędkością kolarza, a malejąc dalej spowoduje, że po 20 s kolarz dogoni go. Pierwiastek  $t_2$  może być rozwiązaniem zadania, jeśli należałoby znaleźć czas, po którym motocyklista spotka się z kolarzem a nie czas, po którym dogoni kolarza. Przykład ten dowodzi, że należy bardzo dokładnie analizować treść zadania, gdyż w przypadku pytania o czas spotkania obydwa pierwiastki rozwiązania spełniają warunki zadania, a w przypadku pytania o czas po jakim dogoni kolarza tylko  $t_1$ .

## Przykład 2.

Ciało masy  $m$  znajduje się nad powierzchnią stołu na wysokości  $h$ . Pod nim na powierzchni stołu znajduje się zajmująca pionowe położenie przymocowana do niej sprężyna o długości  $l_0$  i współczynniku sprężystości  $k$ . Ile wyniesie maksymalne odkształcenie sprężyny przy swobodnym spadaniu na nią ciała?

**Rozwiązanie.**

Przy spadaniu ciała na sprężynę jego energia potencjalna częściowo zamienia się w energię potencjalną ściśniętej sprężyny (energia kinetyczna na początku i w końcowym położeniu jest równa zeru). Energię potencjalną ciężkości ciała podniesionego nad stołem zapiszemy wzorem  $Ep_1 = mgh = Em_1$  gdzie  $Em_1$  jest początkowo energią mechaniczną układu złożonego z ciała i sprężyny. Jeśli maksymalne odkształcenie sprężyny oznaczymy przez  $x_m$ , to końcową energię potencjalną ciężkości zapiszemy wzorem  $Ep_2 = mg(l_0 - x_m)$ , a energię potencjalną sprężystości  $Eps = \frac{kx_m^2}{2}$ . Końcowa energia mechaniczna układu wyniesie  $Em_2 = Ep_2 + Eps = mg(l_0 - x_m) + \frac{kx_m^2}{2}$ .

Z zasady zachowanie energii

$$Em_2 = Em_1$$

$$\frac{kx_m^2}{2} + mg(l_0 - x_m) = mgh.$$

Po przekształceniu otrzymujemy

$$x_m^2 - \frac{2mg}{k}x_m - \frac{2mg(h-l_0)}{k} = 0.$$

którego pierwiastkami są

$$x_{m1,2} = \frac{mg}{k} \left( 1 \mp \sqrt{1 + \frac{2k(h-l_0)}{mg}} \right).$$

Odpowiedzią na pytanie postawione w zadaniu jest drugi dodatni pierwiastek

$$x_{m2} = \frac{mg}{k} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2k(h-l_0)}{mg}} \right).$$

Pierwszy pierwiastek jest ujemny, ale on również posiada sens fizyczny. Wyobraźmy sobie, że jeśli tylko ciało dotknie sprężyny przyklei się do niej i powstaną drgania. Po osiągnięciu maksymalnego odkształcenia zaczyna ono maleć przechodząc w rozciąganie. Maksymalną jego wartość wyraża zależność

$$x_{m1} = \frac{mg}{k} \left( 1 - \sqrt{1 + \frac{2k(h-l_0)}{mg}} \right).$$

Następne dwa przykłady dotyczą przypadku, kiedy obydwa pierwiastki są rozwiązaniami zadania.

**Przykład 3.**

Mała kulka rzucona pionowo w górę z początkową prędkością  $v_0 = 10 \frac{m}{s}$ . Po jakim czasie kulka osiągnie wysokość  $h = 3,2$  m. Przyjmujemy  $g = 10 \frac{m}{s^2}$ , a opór powietrza pomijamy.

**Rozwiązanie**

Początek układu przyjmujemy w punkcie wyrzucenia kulki a oś  $x$  kierujemy pionowo w górę. Wówczas współrzędna  $x$  tej kulki w dowolnej chwili  $t$  wyrazi się wzorem

$$x = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

Jeśli przyjmujemy  $x = h$  to otrzymamy

$$h = v_0 t - \frac{gt^2}{2}.$$

Rozwiązując względem  $t$  otrzymamy równanie kwadratowe

$$t^2 - 2 \frac{v_0}{g} t + \frac{2h}{g} = 0.$$

Pierwiastki tego równania są równe

$$t_{1,2} = \frac{v_0}{g} \left( 1 \mp \sqrt{1 - \frac{2gh}{v_0^2}} \right).$$

Po podstawieniu wartości danych otrzymujemy:  $t_1 = 0,4$  s,  $t_2 = 1,6$  s.

Obydwa pierwiastki spełniają warunki zadania, ponieważ na wysokości  $h$  kulka znajdzie się dwukrotnie: wznosząc się w czasie  $t_1$  i spadając po czasie  $t_2$ . Jeśli wprowadzimy dodatkowy warunek na czas (minimalny lub maksymalny) lub na zwrot ruchu (w górę lub w dół) to rozwiązane będzie jednoznaczne.

**Przykład 4**

Od transformatora, dla którego napięcie skuteczne na wyjściu wynosi  $U = 500$  V należy przesłać energię na odległość  $l = 2,5$  km. Potrzebna moc wynosi  $P = 10$  kW. Ile wyniosą straty mocy linii przesyłowej, jeśli średnica miedzianych przewodów wynosi  $d = 1,5$  cm a opór właściwy miedzi  $\rho = 1,7 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$ ?

**Rozwiązanie**

Ponieważ wartość skuteczna napięcia prądu przemienego jest odpowiednikiem wartości stałej napięcia, która daje taki sam skutek w obwodzie możemy do rozwiązania zadania stosować zależności dotyczące prądu stałego. Oznaczmy natężenie prądu w obwodzie przez  $I$ , opór ów linii przesyłowej przez  $R$ , moc przekazaną przez transformator linii przez  $P_1$  a straty mocy przez  $\Delta P$ . Wówczas możemy zapisać zależności

$$P_1 = P + \Delta P$$

$$P_1 = U \cdot I$$

Po podstawieniu za  $\Delta P = R \cdot I^2$  otrzymujemy  $P + R \cdot I^2 = U \cdot I$ , a po przekształceniu

$$R \cdot I^2 - U \cdot I + P = 0$$

Rozwiązaniem tego kwadratowego równania są pierwiastki

$$I_{1,2} = \frac{U}{2R} \left( 1 \mp \sqrt{1 - \frac{4RP}{U^2}} \right). \quad \textcircled{1}$$

Wartość oporu przesyłowej linii  $R$  wynosi

$$R = \rho \cdot \frac{2l}{S} = \frac{8\rho l}{\pi d^2} = 0,48 \Omega.$$

Podstawiając do zależności otrzymanej na pierwiastki równania kwadratowego mamy

$$I_1 = 21 \text{ A} \quad I_2 = 1020 \text{ A}$$

Straty mocy policzone w zależności  $\Delta P = R \cdot I^2$  wynoszą

$$\Delta P_1 = R \cdot I_1^2 = 211,7 \text{ W}$$

$$\Delta P_2 = R \cdot I_2^2 = 500 \text{ kW}$$

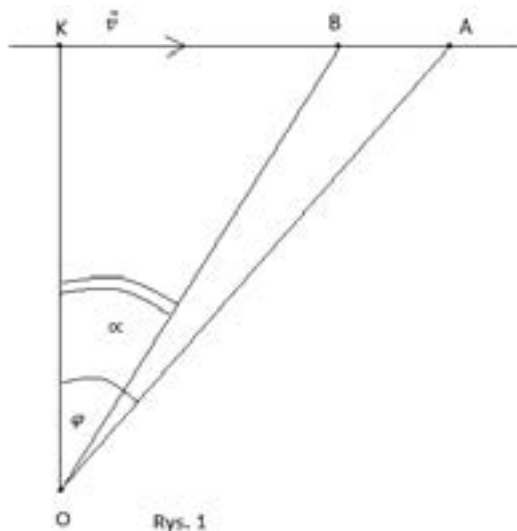
Oba wyniki są odpowiedzią na pytanie postawione w zadaniu. Odpowiadają one różnym wartościom obciążenia, przy których pobierana jest ta sama moc. W pierwszym przypadku opór obciążenia jest duży i straty mocy są małe. W drugim przypadku opór obciążenia jest mały, płynie duży prąd i straty mocy w linii przesyłowej są bardzo duże. Sprawność linii przesyłowej w pierwszym przypadku jest dużo większa, dlatego jest to przypadek, który znajduje praktyczne zastosowanie. Zazwyczaj nakładamy dodatkowe warunki na wielkość strat energii przy przesyłaniu (wartość natężenia prądu lub sprawność przesyłania), co powoduje, że tylko jeden z pierwiastków jest odpowiedzią na pytanie.

### Przykład 5.

Samolot przelatuje z prędkością  $v$  po poziomej prostej nad głową obserwatora. Jaki kąt  $\alpha$  z pionem tworzy kierunek, z którego do obserwatora dociera dźwięk silnika w chwili, kiedy obserwator widzi samolot w kierunku tworzącym kąt  $\beta$  z? Prędkość dźwięku  $v_d > v$ .

#### Rozwiązanie

Jeśli obserwator znajduje się w punkcie O (rys. 1) widzi samolot w punkcie A i słyszy dźwięk wytworzony przez samolot w chwili kiedy on znajduje się w punkcie B. Oznaczmy przez  $t$  czas, po którym dźwięk z punktu B dojdzie do obserwatora. Wówczas  $BO = v_d t$ .



Z prostokątnego trójkąta AOK otrzymujemy

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{KB + BA}{KO} = \frac{KB}{KO} + \frac{BA}{KO}.$$

Ponieważ

$$\frac{KB}{KO} = \operatorname{tg} \alpha, \quad a \quad BA = vt, \quad a \quad KO = OB \cos \alpha = v_d t \cos \alpha$$

otrzymujemy

$$\operatorname{tg} \beta = \operatorname{tg} \alpha + \frac{vt}{v_d t \cos \alpha}. \quad (1)$$

Oznaczając  $\operatorname{tg} \beta - \operatorname{tg} \alpha = x$  oraz uwzględniając, że  $\cos \alpha = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha}}$  po podniesieniu do kwadratu (1) otrzymujemy

$$x^2 - 2 \frac{\operatorname{tg} \beta}{1 - \frac{v_d^2}{v^2}} x + \frac{1}{\left(1 - \frac{v_d^2}{v^2}\right) \cos^2 \beta} = 0.$$

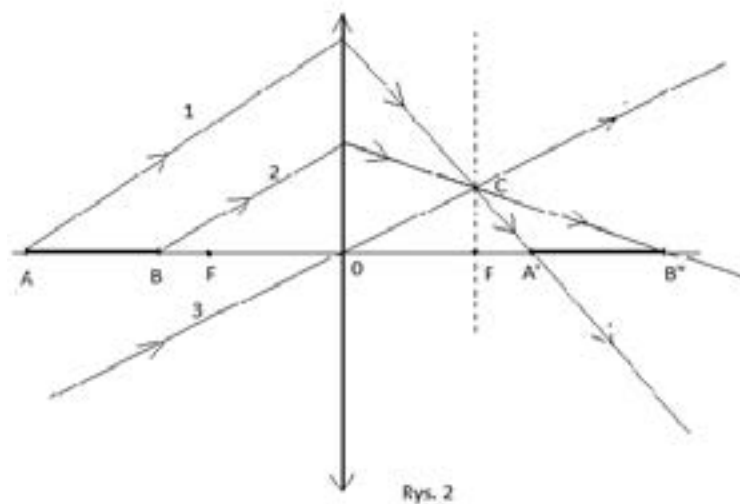
Stąd

$$x_{1,2} = \frac{\operatorname{tg} \beta}{1 - \frac{v_d^2}{v^2}} \pm \sqrt{\frac{\operatorname{tg}^2 \beta}{\left(1 - \frac{v_d^2}{v^2}\right)^2} - \frac{1}{\left(1 - \frac{v_d^2}{v^2}\right) \cos^2 \beta}}.$$

Równaniu (1) odpowiadają tylko dodatnie wartości  $x$ . Ponieważ prędkość samolotu jest mniejsza od prędkości dźwięku to  $x_1 > 0$  a  $x_2 < 0$ . Warunki zadania spełnia tylko jedno znaczenie  $x = x_1$ , co odpowiada sytuacji, w której obserwator najpierw zobaczy samolot a później go usłyszy.

### Przykład 6.

Wzdłuż głównej osi optycznej cienkiej soczewki skupiającej znajduje się cienki pręt o długości  $l = 15 \text{ cm}$ , którego koniec po stronie soczewki znajdujący się bliżej niej jest w odległości większej od ogniskowej soczewki. Obrazy końców pręta znajdują się w odległości  $x_1 = 36 \text{ cm}$  i  $x_2 = 60 \text{ cm}$  od soczewki. Ile wynosi ogniskowa soczewki?



#### Rozwiązanie.

Konstruujemy obraz pręta w soczewce. Rysujemy pierwszy promień z punktu A do soczewki, drugi równoległy do pierwszego oraz trzeci pomocniczy równoległy do pierwszego i drugiego przechodzący przez środek so-

czewki, który nie ulega przesunięciu i biegnie bez zmiany kierunku, ponieważ soczewka jest cienka. Trzy załamane w soczewce promienie przecinają się w jednym punkcie C leżącym na płaszczyźnie ogniskowej soczewki (ponieważ promienie równoległe do siebie po załamaniu w soczewce przecinają się w jednym punkcie leżącym na płaszczyźnie ogniskowej).

Ognisko soczewki otrzymujemy prowadząc prostą przechodzącą przez punkt C prostopadłą do osi optycznej soczewki. Z rysunku jest widoczne, że obraz końca pręta B' jest położony dalej od osi soczewki a koniec pręta B jest położony bliżej niej. Oznaczmy  $y_1 = OA'$ ,  $y_2 = OB'$ , oraz  $x_1 = OA$ ,  $x_2 = OB$ , a długość pręta

$$l = x_1 - x_2 \quad (1)$$

Z równania soczewki  $\frac{1}{x} + \frac{1}{y} = \frac{1}{f}$  otrzymujemy

$$x = \frac{f \cdot y}{y - f} \quad (2)$$

podstawiając (2) do (1) mamy  $l = \frac{y_1 \cdot f}{y_1 - f} - \frac{y_2 \cdot f}{y_2 - f}$ .

Przekształcając to równanie otrzymujemy

$$(y_2 - y_1) \cdot f^2 + l(y_1 + y_2) \cdot f - l y_1 \cdot y_2 = 0.$$

Rozwiązując to kwadratowe równanie otrzymujemy

$$f_{1,2} = \frac{-l(y_1 + y_2) \pm \sqrt{l^2(y_2 - y_1)^2 + 4y_1 \cdot y_2 + l y_2}}{2(y_2 - y_1 - l)}.$$

Podstawiając wartości danych do wzoru otrzymujemy  $f_1 = 20$  cm,  $f_2 = -180$  cm.

Drugi pierwiastek nie ma sensu fizycznego, ponieważ ogniskowa soczewki skupiającej jest dodatnia. Ogniskowa soczewki wynosi 20 cm.

## ZADANIA DO ROZWIĄZANIA

1. Helikopter wznosi się pionowo w górę jednostajnie z prędkością  $v$ . W chwili, kiedy znajduje się na wysokości  $h$  zaczęło z niego swobodnie spadać ciało. Po

jakim czasie spadnie na ziemię, jeśli pominiemy opór powietrza?

$$\text{Odp. } t = \frac{v}{g} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2gh}{v^2}} \right).$$

2. Do sufitu na sprężynie podwieszono znajdujące się na podstawie ciało. W chwili początkowej sprężyna nie była odkształcona. Podstawka zaczęła się poruszać w dół ze stałym przyspieszeniem  $a < g$ . Oblicz czas, po którym ciało oderwie się od podstawki, a także maksymalne naprężenie sprężyny, jeśli masa ciała wynosi  $m$  a współczynnik sprężystości sprężyny  $k$ .

$$\text{Odp. } t = \sqrt{\frac{2m}{k} \left( \frac{g}{a} - 1 \right)}, \quad x_m = \frac{m}{k} \left( g + \sqrt{a(2g - a)} \right).$$

3. Punktowe dodatnie elektryczne ładunki  $q_1 = q$  i  $q_2 = 2q$  znajdują się w odległości  $r$  od siebie. W którym miejscu prostej między tymi ładunkami należy umieścić elektryczny ładunek, aby znajdował się w równowadze?

$$\text{Odp. } r_1 = r(\sqrt{2} - 1) = 0,41r, \quad r_2 = -r(\sqrt{2} + 1) = -1,41r.$$

4. Oblicz natężenie prądu w obwodzie zawierającym źródło prądu o  $\epsilon = 4$  V i oporze wewnętrznym  $R_w = 1$   $\Omega$  jest moc wydzielona w obwodzie zewnętrznym wynosi  $P = 3$  W.

$$\text{Odp. } I_{1,2} = \frac{\epsilon}{2R_w} \left( 1 \pm \sqrt{1 - \frac{4R_w P}{\epsilon^2}} \right), \quad I_1 = 3 \text{ A}, \quad I_2 = 1 \text{ A}.$$

Obydwa pierwiastki odpowiadają warunkom zadania, ponieważ występują dla różnych wartości oporu zewnętrznego.

5. Odległość między przedmiotem i jego obrazem w soczewce rozpraszającej wynosi  $l = 32$  cm. Oblicz odległość między przedmiotem i soczewką, jeśli ogniskowa soczewki  $f = -10$  cm.

$$\text{Odp. } x = \frac{l}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - \frac{4f}{l}} \right) = 40 \text{ cm}.$$

Czesław Surowiec, Dębica

# O głębi ostrości i czytaniu bez okularów

Waldemar Reńda

Wiele osób używa tradycyjnych aparatów fotograficznych, w których można ręcznie ustawiać ostrość fotografowanego obiektu. Chcąc jednak, by równocześnie ostro rysował się zarówno ów obiekt jak i dalszy plan, musimy uwzględnić tak zwaną *głębłą ostrości*.

Z praktyki wiemy, że owa głębia jest znacznie większa dla obiektów dalszych, a mniejsza dla bliższych od fotografowanego obiektu. Wiemy też, że w przypadku fotografii „makro” owa głębia ostrości jest bardzo ograni-

Dalej na kol. 42

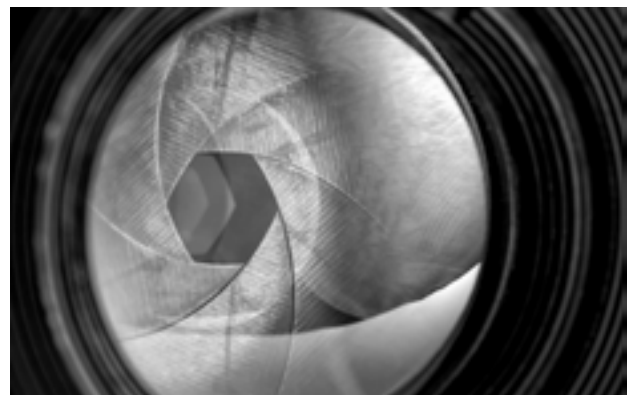


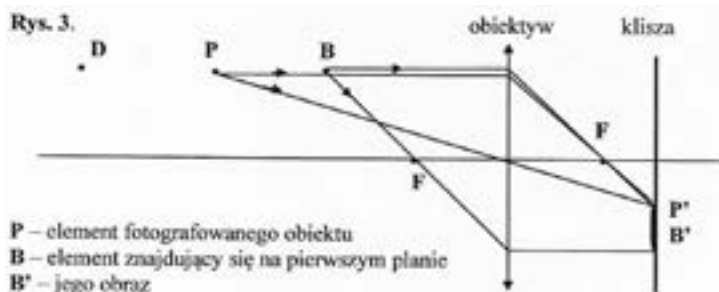
Foto – Dreamstime

czona, ale zawsze większa dla przedmiotów za obiektem fotografowanym, a mniejsza dla przedmiotów bliższych niż ów obiekt. Wiemy też, że zmniejszenie otworu przesłony (blendy) powiększa w obie strony głębię ostrości. Dlaczego tak się dzieje? Spróbuję to wyjaśnić z pomocą odpowiednich rysunków.

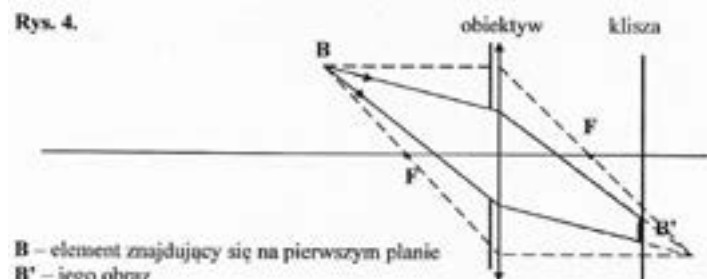
Pierwszy rysunek ilustruje powstawanie na kliszy (matówce lub matrycy) „ostrego” obrazu elementu **P** fotografowanego obiektu.

Drugi rysunek pokazuje, jaki obraz elementu **D** powstanie na kliszy, jeżeli ów element znajduje się **za** fotografowanym obiektem.

Obrazem punkтового elementu **D** jest plamka **D'**. Jego ostry obraz powstaje przed kliszą. Jak widać, na kliszy nastąpiło „rozmycie” obrazu.



Rys. 3.  
P – element fotografowanego obiektu  
B – element znajdujący się na pierwszym planie  
B' – jego obraz



Rys. 4.  
B – element znajdujący się na pierwszym planie  
B' – jego obraz

### O czytaniu bez okularów

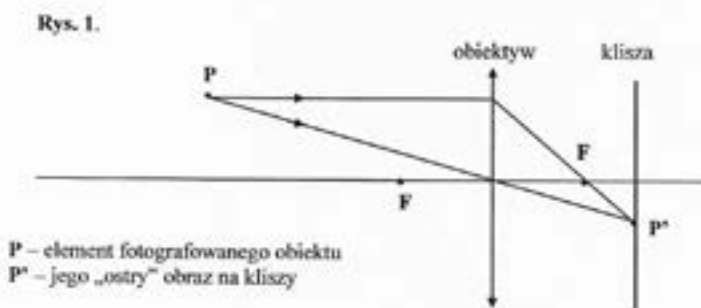
W kartoniku o wielkości ćwiartki widokówki zrobimy otworek o średnicy ok. 1 mm (np. grubą igłą). Zaczernimy go ostrzem miękkiego ołówka (np. 5-B). Wygładzi to jego krawędzie, osłabi odbicia światła, a także ograniczy dyfrakcję. Patrząc przez tak przygotowany otworek, dalekowiedz może z powodzeniem czytać książkę bez użycia okularów. W dodatku może ją trzymać zarówno stosunkowo blisko oczu jak i w większej odległości. Natomiast krótkowidz może czytać np. napisy na pasku, jakie ukazują się na ekranie telewizora w czasie niektórych audycji informacyjnych. Ów efekt wykorzystujemy mimowolnie, gdy dla lepszego widzenia silnie mrużymy oczy. Efekt ten obrazuje rysunek 4.

I na koniec kilka informacji o rozdzielczości wizualnej oka ludzkiego. Niedostrzeganie nieostrości obrazu związane jest z ograniczoną rozdzielczością siatkówki oka.

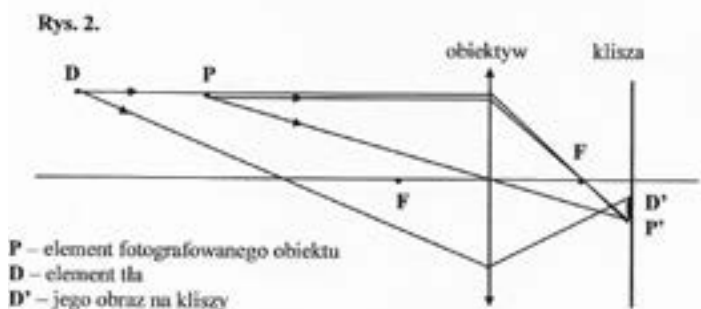
Oto kilka informacji: siatkówka oka składa się ze światłoczułych elementów, w skład których wchodzi czułe na barwę czopki i nierejestrujące jej pręciki. Przy czym czopki wymagają znacznie większego natężenia światła, by rejestrowały obraz barwny. Pręciki wprawdzie nie rejestrują barw, ale są ok. 1000 razy czulsze niż czopki. W efekcie o zmierzchu bardzo słabo nasze oko rejestruje barwne obrazy. Natomiast duża czułość pręcików pozwala widzieć o zmierzchu, a także dostrzegać wówczas szczegóły, na które nie patrzymy wprost.

Czopki koncentrują się głównie w tak zwanej żółtej plamce znajdującej się na osi optycznej oka. Tam też powstaje centrum obrazu. Rozdzielczość optyczna oka zależy od gęstości rozmieszczenia owych czopków. W żółtej plamce jest ich od 13 000 do 14 000 na mm<sup>2</sup>. Wynika stąd, że odległość między sąsiednimi czopkami wynosi ok. 0,004 mm. Ponieważ do rejestracji obrazu potrzebne są co najmniej 2 pręciki lub czopki, więc jesteśmy w stanie dostrzec przedmiot, dla którego kąt widzenia (*fizjologiczny kąt graniczny oka*) jest większy od 1 minuty kątowej. Pozwala to dostrzec plamkę o średnicy 1mm z odległości 5 m. Podana gęstość rozmieszczenia czopków odpowiada rozdzielczości ok. 8 megapikseli na cal kwadratowy, co jest dość typową rozdzielczością matryc współczesnych aparatów elektronicznych.

Waldemar Reñda, Olkusz



Rys. 1.  
P – element fotografowanego obiektu  
P' – jego „ostry” obraz na kliszy



Rys. 2.  
P – element fotografowanego obiektu  
D – element tła  
D' – jego obraz na kliszy

A teraz zobaczymy, jakie „rozmycie” obrazu uzyskamy dla elementu **B**, znajdującego się **przed** fotografowanym obiektem (rys. 3).

Ostry obraz elementu **B** powstaje za kliszą. Natomiast na kliszy nastąpiło jego „rozmycie”. Jak widać, owo „rozmycie” jest teraz większe niż dla elementu **D**, mimo że punkt **B** jest w takiej samej odległości od fotografowanego obiektu jak element **D**.

Rozpatrywane tu przykłady dotyczą sytuacji, gdy obiekt fotografowany jest stosunkowo blisko aparatu fotograficznego. W przypadku, gdy fotografujemy obiekty w dostatecznie dużej odległości od aparatu, to głębia ostrości za fotografowanym obiektem może sięgać bardzo daleko.

A teraz sprawdźmy, jak owo „rozmycie” obrazu zależy od średnicy przesłony (rys. 4). Porównam je z efektem uzyskanym na rysunku 3.

Widać, że „rozmycie” to jest teraz znacznie mniejsze i będzie malało wraz ze zmniejszaniem się otworu przesłony. Efekt ten można wykorzystać do czytania tekstu, bez konieczności użycia okularów korekcyjnych.

# Rekonstrukcja formuły Einsteina opisującej zjawisko fotoelektryczne

## Propozycja dydaktyczna

Badania wykazały, że uczniowie błędnie interpretują przebieg zjawiska fotoelektrycznego (ZF) korzystając z zasady zachowania energii  $K_{Max} = hf - W_o$  lub z typowego wykresu ilustrującego to zjawisko [1]. Artykuł ten proponuje bardziej spójne dostosowanie zasad matematyki z przebiegiem tego zjawiska. Propozycja ta może być traktowana jako alternatywa algebraiczna przedstawiająca prawo zachowania energii w zjawisku fotoelektrycznym. Propozycja ta może być przedstawiona uczniom klas licealnych i studentom, a szczególnie adeptom fizyki by ich zainspirować do własnych naukowych poszukiwań.

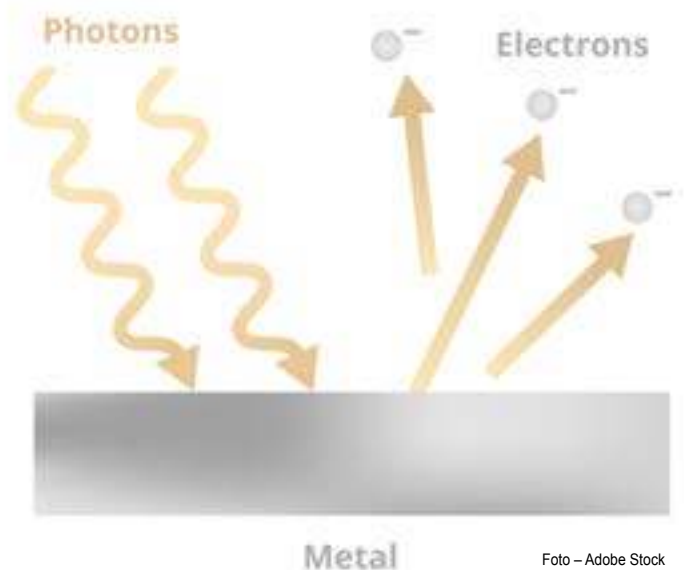


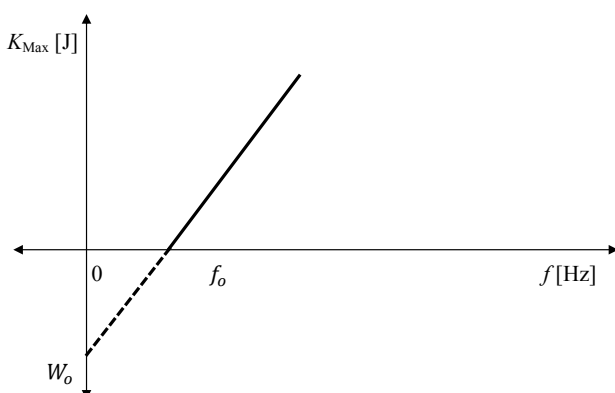
Foto – Adobe Stock

Andrzej Sokółowski

### 1. Analiza wykresu $K_{MAX}$ przedstawiona w podręcznikach do fizyki [2,3]

Typowy wykres przedstawiający ZF jest przedstawiony na rysunku 1.

Wykres ten ma za zadanie opisać  $K_{Max} = hf - W_o$  gdzie  $K_{Max}$  oznacza maksymalną energię kinetyczną emitowanych elektronów,  $hf$  – energię fotonów, które emitują te elektrony i  $W_o$  – pracę wyjścia z płyty, z której elektrony są emitowane. Wykres ten (Rys. 1) ma przedstawiać funkcję liniową  $f(x) = mx - b$ . Niektóre elementy tego wykresu mogą być jednak zakwestionowane, jeśli uczniowie mają za zadanie zrozumieć naukowy charakter tego wykresu wykorzystując rozumowanie matematyczne.



Rys.1. Wykres prawa zachowania energii dla ZF przedstawiany w podręcznikach do fizyki.

Zacznijmy od przerywanej linii wykresu sugerującej zerową energię kinetyczną. Przerywana linia może być myląca. W matematyce linia przerywana zwykle przedstawia asymptoty funkcji: pionowe lub poziome. Żaden z tych atrybutów wykresu (asymptot) nie występuje w tym zjawisku. Tak więc, aby oznaczyć zerową energię kinetyczną elektronów, należy użyć innego matematycznego opisu.

Oznaczenie  $K_{Max}$  na osi pionowej może być również mylące z punktu widzenia matematyki. Maksymalną wartość funkcji liczy się biorąc pod uwagę specjalne parametry funkcji; metoda liczenia takiej wartości dla funkcji kwadratowej jest inna niż dla funkcji wielomianowej.

Oznaczenie dwóch różnych wielkości fizycznych na tej samej osi współrzędnych; energii kinetycznej i pracy wyjścia z płyty, z której elektrony są emitowane też może być mylące. Na matematyce zwykle jedna wartość jest oznaczana na jednej osi. Jeśli oznaczymy oś pionową jako przedstawiającą energię kinetyczną, wykres (Rys. 1) może sugerować, że energia kinetyczna ma wartości ujemne, co również nie jest zupełnie zgodne z prawdą.

Problematiczne mogą być również interpretacje poziomych i pionowych przecięć wykresu z osiami. W matematyce punkt przecięcia pionowego jest szczególną wartością  $f(x)$  często nazywaną wartością początkową, której jednostki i interpretacje są takie same jak jednostki wartości funkcji w innych punktach. W równaniu  $K_{Max} = hf - W_o$ , pionowe przecięcia funkcji liniowej byłoby pracą wyjścia. Zauważamy że praca wyjścia nie jest jednak oznaczona jako funkcja na osi pionowej. Pójdźmy dalej, traktując

równanie jako funkcje dla  $f = 0$ ,  $K_{Max} = -W_0$ , co również nie jest zgodne z przebiegiem eksperymentu.

Algebraiczne rozumowanie nie w pełni koresponduje z podstawami naukowymi zjawiska fotoelektrycznego, jeśli próba jego interpretacji jest podjęta bezpośrednio za pomocą wiedzy matematycznej. Nieścisłości z prawami matematyki można by znaleźć więcej w tym wykresie. Potrzebna jest więc inne matematyczne przedstawienie zjawiska fotoelektrycznego, które by było spójne z wiedzą matematyczną, i które uczeń poznaje na lekcjach matematyki. Jak to przeprowadzić? Poniżej podaje pewne założenia, które będą pomocne w rekonstrukcji wzoru Einsteina.

## 2. Wprowadzenie energii i częstotliwości fotonu jako funkcji liniowej

Energia fotonu jest powszechnie przedstawiana jako  $E = hf$ . Jego naukowa interpretacja jest prosta. Energia fotonu zależy od częstotliwości źródła światła, gdzie  $h$  jest stałą Plancka. Stała Plancka może być również współczynnikiem kierunkowym tej funkcji.

Studenci fizyki mają trudności z klasyfikacją parametrów tradycyjnie wyrażonych w formułach z fizyki jako zależnych i niezależnych [4, 5]. Tak więc, aby wykorzystać rozumowanie matematyczne, zastosujemy notację funkcyjną, która pozwoli jednoznacznie określić parametry zmienne i stałe jak również ich wzajemne relacje, więc  $E(f) = hf$ . Formuła ta ma więc postać funkcji liniowej, której nachylenie ma wartość stałej Plancka  $h = 6.626 \times 10^{-34}$  Js albo  $h = 6.626 \times 10^{-34} \frac{\text{J}}{\text{Hz}}$ . Zauważmy że jednostka bardziej odpowiada interpretacji współczynnika kierunkowego tej funkcji jako zmiany energii fotonów na jednostkę częstotliwości. Taka interpretacja potwierdza również metody kwantyfikacji energii fotonu.

## 3. Określenie pracy wyjścia emitera w funkcji częstotliwości progowej fotonów

Jak wcześniej wspomniano, naukowe podstawy formuły Einsteina  $K_{Max} = hf - W_0$  nie do końca pasują do modelu matematycznej funkcji. Energia wiązania elektronów albo praca wyjścia jest zewnętrznym parametrem wbudowanym w zjawisku jako dodatkowa współzmienna. Jej włączenie ma swoje uzasadnienie, co potwierdzone w zasadzie zachowania energii.

Praca wyjścia jest uważana za parametr metalowej płyty, który można uznać za dodatkowy, zewnętrzny element. Z punktu widzenia rozumowania matematycznego, a ściślej rysowania tej funkcji, jego interpretacja może być trudna. W związku z tym zamiast pracy wyjścia  $W_0$ , równoważne wyrażenie  $hf_0$  będzie użyte w głównym opisie ZF. Porównanie  $W_0 = hf_0$  jest zasadne. Praktycznie może ono być wprowadzone na oddzielnej lekcji poprzedzającej wprowadzenie ogólnej postaci ZF. Tym sposobem symbole  $hf_0$  będą korelować z symbolami (parametrami) funkcji  $E(f)$ , co wzmocni korelację metod matematyki i fizyki.

Aby dalej uprościć fizyczną interpretację, spróbujmy zminimalizować liczbę zmiennych parametrów podczas wyprowadzania wzoru na ZP. W tym celu przyjęto następujące ograniczenia:

a) płyta emitująca elektrony będzie niezmienna, w ten sposób część formuły:  $hf_0$  nie zmieni się,

b) napięcie na baterii zostanie początkowo zredukowane do zera, tak by faza zatrzymania elektronów przez zewnętrzne pole elektryczne nie została uwzględniona na tym etapie analizy. Te ograniczenia pozwolą na skupieniu uwagi ucznia na merytorycznym aspekcie ZP. Rozszerzenie istoty zjawiska powinno być omawiane na następnych lekcjach.

## 4. Zbudowanie spójnej formuły na ZF tak, by zapewnić korelację pomiędzy matematyczną i naukową interpretacją

Ta część wykładu jest najważniejsza, ponieważ będzie wyprowadzony inny matematyczny wzór (funkcja).

Funkcyjna notacja formuł fizycznych wyraźnie określa parametry niezależne i zależne i pozwala skupić uwagę badacza na ich wzajemnych związkach [6]. Zamiast  $K_{Max}$ , zapiszemy związek na energię kinetyczną elektronów jako  $K(f)$ . Korzystanie z  $K_{Max}$  ma swoją naukową ważność, jednak sugeruje się tę postać użyć jako dodatkowy naukowy fakt, który wzbogaca charakter PE.

### 4.1. Konstruowanie wykresu $E(f)$

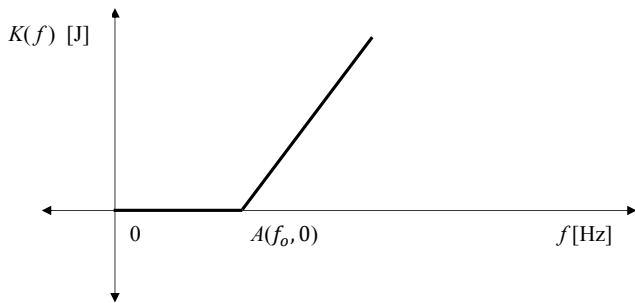
Reprezentacje wizualne mają zmniejszyć zapotrzebowanie na pamięć roboczą ucznia i umożliwiają skupienie się na zrozumieniu zachowania zjawiska. Jednak wykres ma być prosty i podparty zasadami matematycznymi, aby odczytać jego podstawy naukowe. Formułowanie algebraicznej postaci zjawiska fotoelektrycznego będzie opierać się na jego graficznym odpowiedniku. Wirtualne laboratorium, którego schemat jest przedstawiony na rys. 2 będzie pomocny w narysowaniu i matematycznym opisie tego zjawiska.

Demonstrujemy to doświadczenie zaczynając od zerowej częstotliwości światła. Eksperyment dostarczył dowodów na to, że elektrony nie są wyrzucane z emitera, jeśli  $0 \leq f < f_0$ , tak więc wykres energii kinetycznej  $E(f)$  powinien mieć wartość zerową dla tego zakresu częstotliwości.

Pierwszy fragment wykresu  $E(f)$  powinien mieć nachylenie zerowe i być umieszczony wzdłuż osi częstotliwości. Kiedy częstotliwość fotonów osiągnęła wartość progową,  $f_0$ , elektrony zostały emitowane z płyty. Dalszy wzrost częstotliwości fotonów spowodował zwiększenie prędkości elektronów, a tym samym ich energii kinetycznej.



Rys. 2. Demonstracja sposobu powstawania energii kinetycznej emitowanych fotonów. Źródło: PhET Interactive Simulations, University of Colorado, <http://phet.colorado.edu> [7].



Rys. 3. Odcinkowa funkcja liniowa reprezentująca energię kinetyczną emitowanych elektronów.

Energia kinetyczna elektronów zależy liniowo od częstotliwości fotonów. Podczas gdy obserwacja „gołym okiem” tej zależności liniowej jest trudna, można śledzić tę zależność poprzez aktywację wykresu *Electrons energy versus light frequency* udostępnionego po prawej stronie symulacji (Rys. 2). Drugi fragment wykresu musi być więc liniowy z nachyleniem innym niż zero co przedstawia Rys.3.

Wykres ten nie przecina osi poziomej, ponieważ energia kinetyczna nie może być ujemna. Funkcja spełnia test algebraicznej funkcji (jedna wartość energii dla jednej wartości częstotliwości [8]). Tak więc, matematycznie, wykres jest jego naukowy charakter jest poprawny.

#### 4.2. Znalazienie algebraicznej reprezentacji wykresu

Oś pionowa wykresu wyraża energię kinetyczną emitowanych elektronów w całym jej zakresie. Ponieważ energia kinetyczna może być tylko równa lub większa od zera, jej wykres leży wzdłuż i powyżej osi poziomej. Pierwszy odcinek funkcji będzie miał więc postać  $K(f) = 0$ . Bardziej ściśle zapiszemy to zawężając dziedzinę tego odcinka funkcji do  $0 \leq f \leq f_0$ . Tak więc:

$$K(f) = 0 \quad \text{gdy} \quad 0 \leq f \leq f_0 \quad (1)$$

Jeśli zewnętrzna częstotliwość osiągnie  $f_0$ , elektrony są emitowane, jednak nie mają jeszcze możliwości poruszania się w kierunku kolektora. Jeśli  $f > f_0$  elektrony będą emitowane i będą docierać do kolektora. Odcinek ten jest liniowy tak więc  $y - y_A = m(x - x_A)$  może być wykorzystane by matematycznie zapisać tę zależność. Nachylenie tej funkcji jest równe  $h$ . Przypisując parametry eksperymentu do zmiennych, dowiadujemy się, że  $E(f) - y_A = h(f - x_A)$ , gdzie  $A(x_A, y_A)$  są współrzędnymi punktu, który jest nam potrzebny. Aby ukończyć funkcję, jest nam potrzebna co najmniej jedna dodatkowa współrzędna z wykresu  $E(f)$ . Jeśli częstotliwość emitowanych fotonów osiągnie progową częstotliwość  $f_0$ , więc  $E(f_0) = \lim_{f \rightarrow f_0^-} (hf - hf_0) = hf_0 - hf_0 = 0$ .

Elektrony są wyrzucane, ale nie posiadają energii kinetycznej. Tą dodatkową współrzędną niezbędną do sformułowania  $E(f)$  jest więc  $A(f_0, 0)$ . Podstawiając te współrzędne do proponowanego wzoru  $K(f) - 0 = h(f - f_0)$  prowadzi do pełnej jego postaci  $K(f) = hf - hf_0$  gdzie  $f > f_0$ . Łącząc obydwie formy otrzymujemy:

$$\begin{aligned} K(f) &= 0, & \text{gdy} \quad 0 \leq f \leq f_0 \\ K(f) &= hf - hf_0, & \text{gdy} \quad f > f_0 \end{aligned} \quad (2)$$

Funkcja  $K(f)$  przedstawiona w (2) jest odcinkową funkcją liniową z dwoma różnymi regułami w swojej dziedzinie. Biorąc pod uwagę, że  $K(f)$  opisuje to samo zjawisko funkcja energii kinetycznej emitowanych elektronów może być zapisywana w sposób bardziej precyzyjny:

$$K(f) = \begin{cases} 0, & \text{gdy } 0 \leq f \leq f_0 \\ hf - hf_0, & \text{gdy } f > f_0 \end{cases} \quad (3)$$

Funkcja ta odzwierciedla zachowanie zjawiska. Elektrony nie są emitowane, jeśli  $f < f_0$ . Jeśli  $f = f_0$  elektrony są emitowane z zerową prędkością. Fakty te mogą być wywnioskowane z pierwszego odcinka funkcji.

Jeśli częstotliwość emitowanych fotonów jest większa niż częstotliwość progowa,  $f > f_0$  elektrony posiadają energię kinetyczną  $K(f) = hf - hf_0$ . Równanie (3) ilustruje dynamiczny proces zjawiska a rozumowanie matematyczne jest z nim spójne.

#### Wnioski

Algebraiczna forma prawa zachowania energii dla zjawiska fotoelektrycznego prezentowana w podręcznikach sprawdza się dobrze, gdy trzeba wspierać rozwiązywanie problemów. Jego graficzna reprezentacja zbudowana bezpośrednio przy użyciu jej formuły jest problematyczna. Celem artykułu było wskazanie jego słabości – z punktu widzenia studentów i może również nauczycieli fizyki i zaproponowanie alternatywnej reprezentacji spójnej z wymogami matematyki.

Podczas gdy formalna ocena proponowanej algebraicznej postaci zjawiska fotoelektrycznego nie była możliwa do przeprowadzenia w czasie opracowywania tej jednostki dydaktycznej, była ona przeprowadzona z grupą uczniów w liceum w USA [9]. Zaangażowanie uczniów i uczestnictwo w procesie wyprowadzenia funkcji na ZF dało dowody, że integrowanie matematycznej wiedzy ze zjawiskami przyrody przyczynia się do pogłębiania wiedzy i jest warte dalszych poszukiwań. Podczas gdy fizyka kwantowa jest uważana za złożoną sekcję fizyki, uczniowie doceniali prostotę wykładu i jego korelacje z matematyką co zapewniło im lepsze zrozumienie ZF.

Dr. Andrzej Sokolowski

#### BIBLIOGRAPHIA

- [1] McKagan, S.B., Handley, W., Perkins, K.K., and Wieman, C.E., 2009. A research-based curriculum for teaching the photoelectric effect. *American Journal of Physics*, 77(1), pp.87-94
- [2] Cutnell J, Johnson K 2007 *Physics*, 7th edn, V.2 2010, p.919 (New York, Wiley & Sons, Inc)
- [3] Giancoli D C 2005, p.760, *Physics: Principles with Applications* 6th ed (Upper Saddle River NJ: Prentice-Hall)
- [4] Sokolowski, A., 2019, August. Enhancing Scientific Inquiry by Mathematical Reasoning: Case of Applying Limits to Model Motion of a System of Objects. In *Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1287, No. 1, p. 012051). IOP Publishing.
- [5] Sokolowski, A., 2020a. Unpacking structural domain of mathematics to aid inquiry in physics: a pilot study. *Physics Education*, 56(1), p.015009
- [6] Sokolowski, A., 2020b. Developing students' covariational reasoning using contexts of Formulas: Are Current Formula Notations Aiding Graph Sketching. *The Physics Educator* Vol. 2, No. 4 2020 p. 2050016
- [7] PhET Interactive Simulations, University of Colorado, <http://phet.colorado.edu>.
- [8] Stewart J 2000 p.17, p 45 *Calculus Concepts and Contexts, 2nd ed* (Pacific Grove, Ca: Brooks/Cole)
- [9] Sokolowski, A., 2021. Enabling covariational reasoning in Einstein's formula for photoelectric effect, *Physics Education*, 56(3), p.035029.

# Kompendium astronomiczne

## – wybrane pojęcia i zagadnienia – cz. 3

Kompendium astronomiczne zostało napisane z myślą o szerokim gronie czytelników. Może być ono przydatne dla uczniów szkół ponadpodstawowych, a także dla kandydatów na studia, którzy planują zdawać egzamin maturalny z przedmiotu fizyka z astronomią. Również może stanowić ciekawą pozycję literaturową dla nauczycieli przedmiotu fizyka z astronomią i wszystkich miłośników tego przedmiotu. W pracy tej przedstawiono najważniejsze pojęcia i terminy związane z astronomią.

W trzeciej części tego kompendium zostały przedstawione wybrane zagadnienia z astronomii w porządku alfabetycznym na literę **G** oraz częściowo na literę **H**.

**Galaktyka** jest to układ o bardzo dużej ilości gwiazd i materii międzygwiazdowej, które wzajemnie powiązane są siłami grawitacji. Galaktyki ze względu na morfologię dzielimy na regularne i nieregularne. Regularne dzielimy z kolei na eliptyczne (E), soczewkowe (SO), spiralne zwykłe (Sa, Sb, Sc) i spiralne z poprzeczką materii (SBa, SBb, SBc). W galaktykach spiralnych typu Sa występują relatywnie duże jądra i słabo rozwinięte ramiona, galaktyki typu Sb mają mniejsze jądra, lecz lepiej rozwinięte ramiona a galaktyki typu Sc mają najmniejsze jądra, lecz najlepiej wykształcone ramiona spiralne. Analogiczna zasada podziału dotyczy galaktyk spiralnych z poprzeczką.

Słowo Galaktyka (duża litera „G” na początku wyrazu, nazwa własna) – oznacza galaktykę, do której należy Układ Słoneczny. Nasza Galaktyka (Droga Mleczna, Galaktyka Drogi Mlecznej) jest dużą galaktyką spiralną z poprzeczką (prawdopodobnie typu SBb) o średnicy około 100 000 lat świetlnych (30 000 ps) i grubości około 3000 lat świetlnych (1000 ps). Spowiada jest przez bardzo rzadką chmurę wodoru tzw. halo galaktyczne, w której znajdują się gromady kuliste gwiazd.

Galaktyka zawiera około  $10^{12}$  gwiazd, jej całkowita masa jest rzędu  $10^{11}M_{\odot}$  –  $10^{12}M_{\odot}$  (mas Słońca). W Galaktyce wyróżnia się pięć podsystemów (populacji) gwiazd:

skrajna I populacja (gwiazdy najmłodsze), pośrednia I populacja (gwiazdy młode), populacja dysku, pośrednia II populacja (gwiazdy stare), skrajna II populacja (najstarsze gwiazdy).



Foto. 1. Przykładowa fotografia galaktyki – Czarne Oko (Foto. NASA, ESA).

**Galileo** – amerykański statek kosmiczny wyniesiony w 1989 r. na orbitę geocentryczną przez wahadłowiec kosmiczny Atlantis i następnie skierowany w stronę Jowisza. Galileo wraz z sondą, która się od niego oddzieliła i wniknęła w atmosferę Jowisza, dostarczyła cennych informacji o charakterystykach fizyko-chemicznych Jowisza, jego atmosfery i księżyców.

**Gęstość krytyczna**  $\rho_c$  – parametr określony wzorem  $\rho_c = 3H^2/8\pi G$  (H i G oznaczają odpowiednio stałą Hubble’a i stałą grawitacji) odgrywający ważną rolę w modelach kosmologicznych. Jeśli rzeczywista

gęstość Wszechświata  $\rho$  spełnia warunek  $\rho < \rho_c$  to przestrzeń ma krzywiznę ujemną, jeśli  $\rho = \rho_c$  to krzywizna jest równa zero (obowiązuje wtedy geometria euklidesowa), jeśli  $\rho > \rho_c$  to krzywizna jest dodatnia. W dwóch pierwszych przypadkach Wszechświat w modelach Friedmanna będzie rozszerzał się nieograniczenie, w trzecim przypadku jednak po okresie aktualnej ekspansji zapadnie się z powrotem do punktu.

**Giotto** – sonda kosmiczna wysłana przez ESA w celu eksploracji komety Halleya. Przeleciała ona 14.03.1986 roku w odległości około 600 km od jądra komety wykonując wiele unikatowych pomiarów i przekazując na Ziemię szereg doskonałych zdjęć powierzchni jądra komety.

**Granica Roche’a** – najmniejsza odległość od kulistego ciała kosmicznego np. planety w jakiej może poruszać się po okręgu jej satelita związany tylko siłami własnej grawitacji (przy pominięciu jego wytrzymałości materiałowej). Satelita znajdujący się wewnątrz granicy Roche’a poddany byłby siłom przypływowym większym od jego grawitacji co doprowadziłoby do jego rozerwania na bardzo drobne okruchy. Promień Roche’a  $r_R$  określony jest wzorem:

$$r_R = 2.423 \cdot R_p \cdot \left( \frac{\rho_p}{\rho_s} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

gdzie  $R_p$  oznacza promień planety, a  $\rho_p$ ,  $\rho_s$  są odpowiednio gęstościami planety i satelity.

Roche uzyskał ten wynik w 1849 roku i na jego podstawie wywnioskował, że pierścienie Saturna nie mogą być jednolitymi ciałami stałymi, gdyż leżą wewnątrz granicy  $r_R$  lecz muszą składać się z drobnych okruszków materii. Wynik ten został potwierdzony przez późniejsze obserwacje.

**Gromada kulista** – sferyczne zgrupowanie setek tysięcy gwiazd związanych ze sobą grawitacyjnie o rosnącej ku centrum gromady gęstości przestrzennej. Gromady kuliste złożone są z gwiazd starych – II populacji.



Foto 2. Przykładowa fotografia gromady kulistej M13, która położona jest w gwiazdozbiore Herkulesa. Została ona odkryta 1714 roku przez Edmonda Halleya, a w 1764 roku Charles Messier dołączył ją do swojego katalogu jako M13. (Foto. NASA, ESA).

**Gromada otwarta** – zgrupowanie kilkuset słabo powiązanych ze sobą grawitacyjnie młodych gwiazd I populacji.



Foto 3. Gromada otwarta w Małym Obłoku Magellana NGC 346 (Foto NASA).

**Grupa Lokalna** – gromada kilkudziesięciu (około 30) galaktyk, o średnicy rzędu  $10^6$  pc, do której należy Galaktyka. Największe składniki to Galaktyka i Wielka Mgławica Andromedy (M31). Grupa Lokalna jest częścią większej struktury – Lokalnej Supergromady (Supergromady Virgo).

**Gwiazda** – samoświecący obiekt astronomiczny, który przez znaczną część

swojej ewolucji emituje energię powstałą w wyniku reakcji termojądrowych zachodzących w jego wnętrzu (głównie spalanie wodoru w hel). Najbliższą gwiazdą względem Ziemi jest Słońce odległe od niej o około 150 mln km, drugą z kolei  $\alpha$  Centauri odległa o 4.3 lat świetlnych.

Gwiazdy o największej (obserwowanej z Ziemi) jasności to Słońce, Syriusz, Kanoopus, Arktur, Alfa Centauri, Wega, Rigel, Procyon, Achernar, Betelgeza, Hadar, Kapella, Altair. Masy gwiazd przybierają wartości od około  $0.08M_S$  do rzędu  $100 M_S$  (gdzie  $M_S$  oznacza masę Słońca), promienie od ok. 10 km (gwiazdy neutronowe) do rzędu  $1000 R_S$  (gdzie  $R_S$  oznacza promień Słońca), temperatury powierzchni od rzędu tysięcy do kilkudziesięciu tysięcy Kelwinów.

Ze względu na jasność absolutną gwiazdy podzielono na następujące klasy: I – nadolbrzymy, II – jasne olbrzymy, III – olbrzymy, IV – podolbrzymy, V – karły (gwiazdy ciągu głównego), VI – podkarły, VII – białe karły. Dla gwiazd o szczególnie dużej jasności absolutnej tzw. hiperolbrzymów wprowadzono dodatkowo klasę jasności 0.

Ze względu na intensywność występujących w widmie promieniowania elektromagnetycznego linii i pasm absorpcyjnych gwiazdy dzielimy na następujące typy widmowe (zgodnie ze zmniejszaniem się temperatury fotosfery gwiazdy): O, B, A, F, G, K, M. Oprócz wyszczególnionych powyżej podstawowych typów widmowych gwiazd istnieje nieliczna grupa gwiazd o widmach zbliżonych do typów G lub K mających silne linie i pasma węgla. Typy te oznaczono literami R i N. Są to tzw. gwiazdy węglowe. Gwiazdom posiadającym w widmie pasma tlenku cyrkonu przypisano typ S – są to gwiazdy cyrkonowe.

W każdym z typów wyróżnia się dodatkowo dziesięć podtypów oznaczonych cyframi 0,1,2,3,...9. Np. gwiazda oznaczona



Foto 4. Fotografia tarczy Słońca, która została wykonana w skrajnym ultrafiolecie (Foto. NASA).

jako G5 jest gwiazdą o widmie pośrednim pomiędzy typem F i K. Obecnie stosowany jest powszechnie system MK dwuwymiarowej klasyfikacji widm gwiazdowych (Morgana i Keenana), w którym każdej gwiazdzie przypisuje się typ widmowy i klasę jasności. W tej klasyfikacji Słońce jest gwiazdą typu widmowego G2 V.

Większość gwiazd jest tak od nas odległa, że widzimy je jako pojedyncze punkty światła, choć w rzeczywistości są one znacznie większe niż Słońce. Warto zauważyć, że rozgwieżdżone nocne niebo stawało się często, inspiracją dla poetów, pisarzy, malarzy czy muzyków.

**Gwiazda neutronowa** – jeden z możliwych ostatnich etapów ewolucji gwiazd. Obiekt powstały po wybuchu supernowej



Rys. 1. Rodzaje gwiazd neutronowych w tym magnetary i pulsary (Foto. NASA)

o bardzo niewielkich rozmiarach rzędu 10 km i olbrzymiej gęstości około  $10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ , zbudowany z nukleonów (głównie neutronów). Szybko rotująca gwiazda neutronowa obdarzona znacznym polem magnetycznym może być pulsarem – źródłem silnego promieniowania elektromagnetycznego o pulsującym w czasie natężeniu.



Rys. 2. Magnetar wraz z liniami pola magnetycznego – wizja artystyczna (Foto. NASA).



Foto. 5. Przykładowe zdjęcie pulsara w mgławicy Kraba (Foto. NASA, ESA). Wyraźnie widoczny jest wpływ pola magnetycznego na materię.

**Gwiazda nowa** – gwiazda zmienna, która nagle w ciągu kilku dni powiększa wybuchowo swą jasność o kilkanaście wielkości gwiazdowych. Następnie jasność gwiazdy powoli w ciągu kilku lat maleje by w końcu osiągnąć poziom z przed wybuchu przy czym mogą występować dalsze wahania jej jasności. Analiza jasności prowadzi do wniosku, że przyczyną wybuchu jest niestabilność prowadząca do odrzucenia warstw zewnętrznych gwiazdy. Wzrost jasności początkowo związany jest z gwałtownym wzrostem promienia gwiazdy, a więc ze zwiększeniem powierzchni

emitującej promieniowanie a następnie duża jasność gwiazdy pochodzi od promieniowania jej gorętszych teraz odsto- niętych głębszych warstw.

Obecnie uważa się, że zdecydowana większość (lub nawet wszystkie) gwiazdy nowe to składniki układów podwójnych a wybuchy są konsekwencją procesów związanych z przepływem materii z jednej gwiazdy do drugiej. Termin „gwiazda nowa” może być mylący, gdyż nie oznacza on oczywiście gwiazdy nowo powstałej lecz taką, która świeciła relatywnie słabo lecz nagle gwałtownie pojaśniała.

**Gwiazda supernowa, (supernowa)** – gwiazda ulegająca zjawisku fizycznego wybuchu, który prowadzi do jej rozpadu i któremu towarzyszy olbrzymi wzrost blasku nawet o 20 magnitudo. Zjawisko to ma miejsce na bardzo późnym etapie ewolucji gwiazdy. W maksimum blasku gwiazdy supernowe promieniają z mocą porównywalną z mocą promieniowania całych galaktyk przez co mogą być wykrywane nawet w bardzo dużych odległościach od Ziemi. Ze względu na cechy obserwacyjne supernowe dzielimy obecnie na trzy grupy Ia (SNIa), Ib (SNIb) i II (SNIi). Podział ten jest pozostałością pierwotnego podziału na dwie grupy. Supernowe typu Ia osią- gają maksymalną jasność w czasie około dwóch tygodni od wybuchu a następnie w podobnym czasie obniżają swój blask o około 3.5 magnitudo. Dalszy spadek jasności jest już znacznie wolniejszy. Jasność w maksimum blasku wykazuje bardzo małą dyspersję i dlatego są one najlepszymi „świecami standardowymi” służącymi do wyznaczania odległości we Wszechświecie.

Charakterystyczną cechą widm tego rodzaju supernowych jest całkowity brak linii wodoru. Występują one w galaktykach eliptycznych i w dyskach galaktyk spiralnych, ale nie są obserwowane w ich ramionach. Powszechnie uważa się, że przyczyną wybuchu supernowych Ia jest niestabilność białego karła pojawiająca się w momencie, gdy przekroczy on masę krytyczną  $1,44 M_{\odot}$  (masę Chandrasekhara). Może się to zdarzyć np. w układzie podwójnym.

Gwiazdy supernowe Ib są znacznie rzadziej obserwowane. Ich krzywa blasku jest podobna do supernowych Ia lecz wykazuje nieco wolniejszy spadek jasności szczególnie w pobliżu maksimum. Widma supernowych Ib są podobne do widma supernowych Ia. Wykazują jednak pewne cechy w okolicach maksimum blasku, które w widmach supernowych Ia ujawnia-

ją się później około kilkadziesiąt dni po maksimum. Stwierdza się również w ich widmach brak linii wodorowych. Prawdopodobnie poprzednikami supernowych Ib są gwiazdy Wolfa-Rayeta. Supernowe Ib nigdy nie występują w galaktykach eliptycznych. Dowodzi to, że pomimo pewnych podobieństw są to obiekty różne od Ia. Za przyczynę wybuchu uważa się nagłą implozję jądra nadolbrzymia o masie większej niż  $15 M_{\odot}$ . Supernowe II zmieniają po wybuchu swoją jasność w sposób zdecydowanie inny niż dwie poprzednie grupy supernowych. Przede wszystkim zmiany blasku są wolniejsze i wykazują większą niejednorodność. Kilkadziesiąt dni po maksimum spadek jasności jest zatrzymany na pewien czas – pojawia się jego wyraźne plateau następnie, jasność maleje w przybliżeniu liniowo.

Widma supernowych II zawierają linie emisyjne wodoru oraz absorpcyjne linie helu, azotu, sodu, magnezu, żelaza. Supernowe II występują w ramionach spiralnych galaktyk. Uważa się, że przyczyną wybuchu supernowej II jest przekształce- nie się rdzenia masywnej gwiazdy w neu- trony i towarzyszące temu powstanie fali uderzeniowej, która rozrywa gwiazdę.

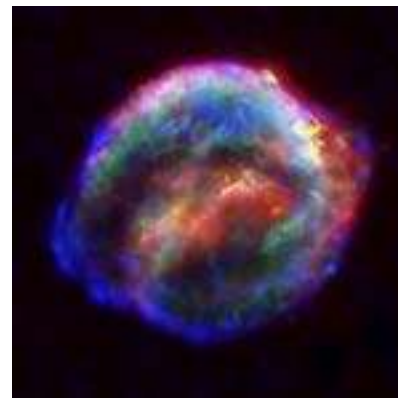


Foto. 6. Mgławica, która jest pozostałością po Gwieździe Keplera (SN 1604, Foto. NASA).



Foto. 7. Rozproszona materia po supernowej SN 1987A (Foto. NASA).

**Gwiazda zmienna** – gwiazda o zmieniającej się jasności. Zasadniczo różniamy dwa typy gwiazd zmiennych: gwiazdy zmienne fizycznie oraz gwiazdy zmienne zaćmieniowe. W pierwszym typie gwiazd zmiany jasności są wynikiem zachodzących w nich procesów fizycznych, w drugim typie zmiany jasności są wynikiem wzajemnego zakrywania się dwóch składników układu podwójnego.



Foto. 8. Przykład gwiazdy zmiennej Eta Carinae (Eta Argus, Foto. NASA).

**Gwiazdozbiór (konstelacja)** – obszar nieba ograniczony umownie wyznaczonymi granicami, w którym położona jest grupa gwiazd. Nazwa gwiazdozbioru pochodzi od symbolicznego kształtu w jaki układają się najjaśniejsze jego gwiazdy. Na ogół gwiazdy wchodzące w skład gwiazdozbioru nie są ze sobą związane grawitacyjnie. Ich bliskie położenie na niebie wynika z efektu rzutowania się ich rzeczywistych położań na sferę niebieską. Międzynarodowa Unia Astronomiczna w 1922 roku podzieliła umownie sferę niebieską na 88 gwiazdozbiorów.

W poniżej tabeli przedstawiamy zestawienie 88 gwiazdozbiorów.

Nr	Gwiazdozbiór nazwa polska	Gwiazdozbiór nazwa łacińska
<b>Gwiazdozbiory okotobiegunowe północne</b>		
1.	Cefeusz	Cepheus
2.	Kasjopeja	Cassiopeia
3.	Mała Niedźwiedzica	Ursa Minor
4.	Smok	Draco
5.	Wielka Niedźwiedzica	Ursa Maior
6.	Żyrafa	Camelopardalis
<b>Gwiazdozbiory zimowe</b>		
7.	Bliźnięta	Gemini
8.	Hydra	Hydra
9.	Jednorożec	Monoceros
10.	Kompas	Pyxis
11.	Lew	Leo
12.	Mały Lew	Leo Minor
13.	Mały Pies	Canis Minor
14.	Pompa	Antlia

Nr	Gwiazdozbiór nazwa polska	Gwiazdozbiór nazwa łacińska
15.	Puchar	Crater
16.	Rak	Cancer
17.	Rufa	Puppis
18.	Ryś	Lynx
19.	Sekstant	Sextans
20.	Wielki Pies	Canis Maior
21.	Żagiel	Vela
<b>Gwiazdozbiory wiosenne</b>		
22.	Centaur	Centaurus
23.	Herkules	Hercules
24.	Korona Północna	Corona Borealis
25.	Kruk	Corvus
26.	Ołtarz	Ara
27.	Panna	Virgo
28.	Psy Gończe	Canes Venatici
29.	Skorpion	Scorpius
30.	Waga	Libra
31.	Warkocz Bereniki	Coma Berenices
32.	Wąż	Serpens
33.	Węgielnica	Norma
34.	Wężownik	Ophiuchus
35.	Wilk	Lupus
36.	Wolarz	Bootes
<b>Gwiazdozbiory letnie</b>		
37.	Delfin	Delphinus
38.	Indianin	Indus
39.	Jaszczurka	Lacerta
40.	Korona Południowa	Corona Australis
41.	Koziorożec	Capricornus
42.	Lisek	Vulpecula
43.	Luneta	Telescopium
44.	Lutnia	Lyra
45.	Łabędź	Cygnus
46.	Mikroskop	Microscopium
47.	Orzeł	Aquila
48.	Pegaz	Pegasus
49.	Ryba Południowa	Piscis Austrinus
50.	Strzała	Sagitta
51.	Strzelec	Sagittarius
52.	Tarcza	Scutum
53.	Wodnik	Aquarius
54.	Żrebię	Equuleus
55.	Żuraw	Grus
<b>Gwiazdozbiory jesienne</b>		
56.	Andromeda	Andromeda
57.	Baran	Aries
58.	Byk	Taurus
59.	Erydan	Eridanus
60.	Feniks	Phoenix
61.	Gołąb	Columba
62.	Malarz	Pictor
63.	Orion	Orion
64.	Perseusz	Perseus
65.	Piec	Fornax
66.	Ryby	Pisces
67.	Rylec	Caelum
68.	Rzeźbiarz	Sculptor
69.	Trójkąt	Triangulum
70.	Wieloryb	Cetus
71.	Woznica	Auriga
72.	Zając	Lepus
73.	Zegar	Horologium
<b>Gwiazdozbiory okotobiegunowe południowe</b>		
74.	Cyrkiel	Circinus

Nr	Gwiazdozbiór nazwa polska	Gwiazdozbiór nazwa łacińska
75.	Góra Stołowa	Mensa
76.	Kameleon	Chamaeleon
77.	Kil	Carina
78.	Krzyż Południa	Cruce
79.	Mucha	Musca
80.	Oktant	Octans
81.	Paw	Pavo
82.	Ptaka Rajski	Apus
83.	Ryba Latająca	Volans
84.	Sieć	Reticulum
85.	Trójkąt Południowy	Triangulum Australe
86.	Tukan	Tucana
87.	Wąż Wodny	Hydrus
88.	Złota Ryba	Dorado

**Gwiazdy fizycznie podwójne** – układ dwóch gwiazd związanych siłami wzajemnej grawitacji krążących wokół wspólnego środka masy po orbitach eliptycznych. Rozróżniamy gwiazdy wizualnie, spektroskopowo i zaćmieniowo podwójne.

**Gwiazdy magnetyczne** – gwiazdy głównie typu A, w których istnieją stosunkowo silne pola magnetyczne. Natężenie pola magnetycznego większości gwiazd magnetycznych ulega zmianom nieregularnym lub periodycznym. Okres zmienności pola magnetycznego jest rzędu od kilku do kilkudziesięciu dni. Zmianom tym towarzyszą niewielkie zmiany jasności i natężeń linii widmowych. Periodyczność zmian pola magnetycznego dobrze tłumaczy model „skośnego rotatora”. Zakłada on, że oś magnetyczna gwiazdy jest nachylona pod pewnym kątem do osi rotacji gwiazdy co sprawia, że obserwujemy zmiany pola magnetycznego gwiazdy zgodne z okresem jej rotacji. Najlepiej poznaną gwiazdą magnetyczną o okresie zmian równym 5.469 doby jest gwiazda  $\alpha^2$  Canum Venaticorum.

**Gwiazdy metaliczne**, Am – gwiazdy ciągu głównego o temperaturze efektywnej od 7400 K do 10 200 K, które mają silne linie pierwiastków metalicznych (Fe, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ni, Cu, Zn, Sr) przy jednoczesnym osłabieniu w widmie linii Ca, Mg i Sc. Dwie charakterystyczne cechy gwiazd metalicznych to: 1) bardzo wolno rotują, 2) zdecydowana większość a być może wszystkie są składnikami układów podwójnych.

**Gwiazdy optycznie podwójne** – układ dwóch gwiazd nie związanych ze sobą grawitacyjnie, znajdujących się w zupełnie różnych odległościach od Słońca, które jednak na sferze niebieskiej położone

są bardzo blisko siebie sprawiając wrażenie, że są ze sobą związane grawitacyjnie.

**Gwiazdy symbiotyczne** – układ podwójny gwiazd, z których jedna jest chłodnym nadolbrzymem lub olbrzymem typu G, K, lub M a drugą gwiazdą ciągu głównego o znacznie wyższej temperaturze efektywnej lub białym karłem. Wybuchy jasności o około 2 magnitudo związane są z przepływem materii z gwiazdy chłodniejszej na cieplejszą. Przykłady gwiazd symbiotycznych: Z Andromedae, CH Cygni, AG Draconis.

**Gwiazdy typu Wolfa-Rayeta** – bardzo jasne gwiazdy (jasność absolutna może być rzędu nawet -9 magnitudo) o wysokiej temperaturze powierzchni równej kilkudziesięciu tysięcy Kelvinów. Ich widma charakteryzują się silnymi szerokimi liniami emisyjnymi helu, węgla i azotu oraz niewielkim natężeniem lub brakiem linii wodoru. Taka charakterystyka widma może być wytłumaczona istnieniem bardzo dużej rozrzedzonej otoczki ekspandującej z dużą prędkością. Dawniej gwiazdy Wolfa-Rayeta zaliczano do typu widmowego O. Aktualnie wyodrębniono dla nich oddzielny typ W, który podzielono na podgrupy WC, WN i WO w zależności od tego czy intensywniej występują linie węgla, azotu czy tlenu.

**Gwiazdy wielokrotne** – układ co najmniej 3 gwiazd (i nie więcej niż 10) związanych ze sobą grawitacyjnie i krążących wokół wspólnego środka masy.

**Gwiazdy zmienne typu  $\delta$  Cephei** (cefeidy) – cefeidy długookresowe o okresie

1- 70 dni (u większości okres wynosi około 7 dni). Amplituda zmian jasności zawiera się w przedziale od 0.1 do 2.0 magnitudo. Są to nadolbrzymy typu F-G. W grupie cefeid wyróżnia się również grupę typu W Virginis o mniejszej mocy promieniowania.

**Gwiazdy zmienne typu RR Lyrae** – gwiazdy zmienne, olbrzymy typu widmowego A-F o okresach zmienności od 0.05 do 1.2 doby. Amplituda zmian jasności tego typu gwiazd zawiera się w przedziale od 0.5<sup>m</sup> do 2.0<sup>m</sup>.

**Gwiazdy zmienne typu T Tauri** – gwiazdy zmienne typu widmowego F-G wykazujące nieregularne zmiany jasności o amplitudzie rzędu nawet 3 mag. W okresach pomiędzy wybuchami jasność gwiazdy może być przez dłuższy czas stała. Linie absorpcyjne wykazują przesunięcie w kierunku czerwieni a linie emisyjne w kierunku fioletu. Jest to spowodowane gwałtownymi ruchami materii w atmosferze gwiazdy. Chłodne warstwy opadają na gwiazdę a gorące są wyrzucane na zewnątrz. Prawdopodobnie gwiazdy typu T Tauri należą do gwiazd bardzo młodych o nieustalonej równowadze wewnętrznej.

**Hadar (Beta Centauri,  $\beta$  Cen)** – druga co do blasku gwiazda w konstelacji Centaura, o obserwowanej wielkości gwiazdowej: 0,61<sup>m</sup> i wielkości absolutnej -4.78<sup>m</sup>. Odległa od Słońca o około 390 lat świetlnych. Jest to układ potrójny składający się z dwóch błękitnych olbrzymów o temperaturze powierzchni rzędu 25000K, typu widmowego B1 oraz trzeciej gwiazdy typu B.

**Heliosfera** – obszar wokół Słońca, w którym ciśnienie dynamiczne wiatru słonecznego przewyższa ciśnienie materii międzygwiazdowej.

**Heliopauza** – granica heliosfery, powierzchnia sferyczna otaczająca heliosferę o promieniu około 100 au, na której wiatr słoneczny zderza się ze strumieniem cząstek emitowanych przez Galaktykę.

**Horyzont astronomiczny** – linia powstała z przecięcia sfery niebieskiej płaszczyzną przechodzącą przez miejsce obserwacji i prostopadłą do kierunku pionu.

**Horyzontu astronomicznego płaszczyzna** – płaszczyzna przechodząca przez miejsce obserwacji i prostopadła do kierunku pionu.



Foto. 9. Fragment Horyzontu ziemskiego, który był widoczny z promu kosmicznego Endeavour w 2002 roku (Foto. NASA).

dr Marcin Wesołowski<sup>1,2</sup>,  
dr hab. Piotr Gronkowski<sup>1,2</sup>, prof. senior UR  
<sup>1</sup>Kolegium Nauk Przyrodniczych,  
Instytut Nauk Fizycznych, Uniwersytet Rzeszowski,  
<sup>2</sup>Centrum Innowacji  
i Transferu Wiedzy Techniczno-Przyrodniczej  
Uniwersytetu Rzeszowskiego.

**I. PRENUMERATĘ NA 2021 ROK MOŻNA ZAMÓWIĆ BEZPOŚREDNIO U WYDAWCY**

- **Przez internet:** zakładka *Prenumerata 2021* na stronie [www.aspress.com.pl](http://www.aspress.com.pl) i wypełniając formularz zamówienia na podstronie prenumeraty
- **e-mail:** [szewczyk24@gmail.com](mailto:szewczyk24@gmail.com) ■ **telefonicznie:** 606 201 244 ■ **listownie:** Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa

**Cena prenumeraty w 2021 roku**

Tytuł	Liczba wydań (I i II półrocze)	Cena egzemplarzowa	Cena prenumeraty rocznej	Cena prenumeraty w II półroczu
<b>Dwumiesięczniki</b>				
Chemia w Szkole	6 (3+3)	30,00	180,00	90,00
Geografia w Szkole	6 (3+3)	30,00	180,00	90,00
<b>Fizyka w Szkole z Astronomią</b>	<b>6 (3+3)</b>	<b>30,00</b>	<b>180,00</b>	<b>90,00</b>
Wiadomości Historyczne z WOS	6 (3+3)	30,00	180,00	90,00

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

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

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

**Zamów prenumeratę przez Internet**  
**[www.aspress.com.pl/prenumerata-2021/](http://www.aspress.com.pl/prenumerata-2021/)**

**WYDANIE SPECJALNE „Fizyki w Szkole” 1/2021**

**WERSJA ELEKTRONICZNA – PLIK PDF**



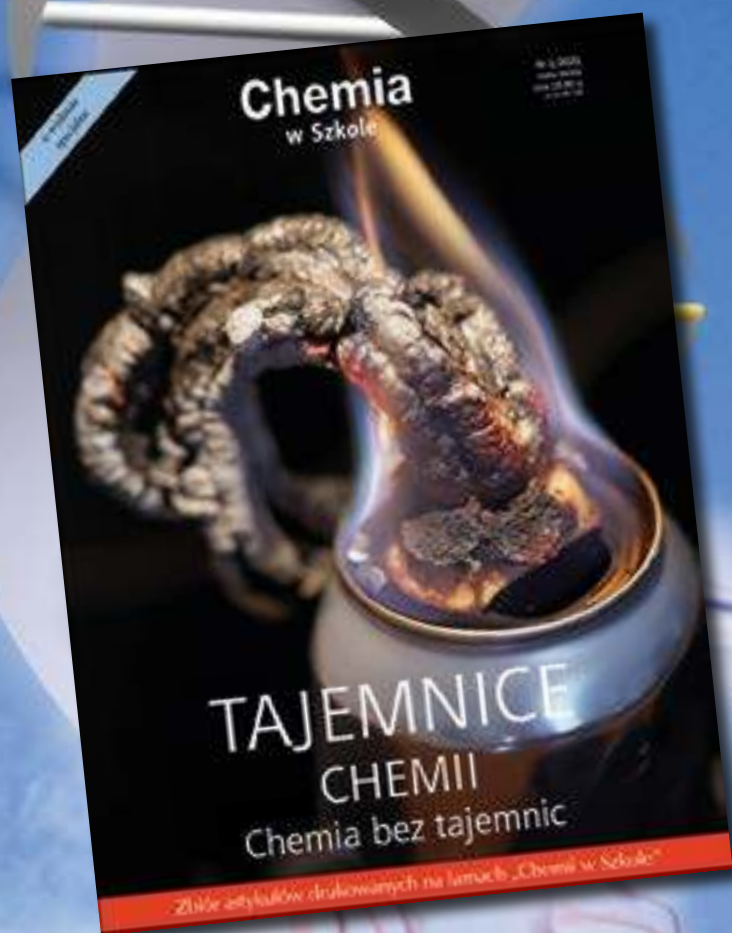
**16** artykułów  
z „Fizyki w Szkole”  
z ostatnich lat

**Cena 15 zł**  
w tym 8% VAT

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

eprasa.pl 95a838c450

**WYDANIE SPECJALNE „Chemii w Szkole” 1/2021**  
**WERSJA ELEKTRONICZNA – pliki PDF**



**Wybór  
najciekawszych  
artykułów  
z ostatnich lat**

**Cena 15 zł**  
w tym 8% VAT

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