

FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

386 (LXIV) indeks 35810X Nr 3 maj/czerwiec 2023 CENA 40,00 zł (w tym 8% VAT)

Podręczniki do fizyki

20 lat zmian i zamieszania

Za co Nobel 2022?

Kubity, stany Bella,
teleportacja

Lord Kelvin

– naukowiec,
który się nie urodził

„Fiat Lux”

25 lat wystaw
interaktywnych

Mechanika nieba

- Równanie Keplera
- Ograniczone kołowe zagadnienie trzech punktów materialnych

Magnetyzm Słońca

Astronomów fascynuje
aktywność słoneczna
od 2000 lat

FIZYKA U KARDIOLOGA



NOWE! WYDANIE SPECJALNE 1/2023

WERSJA ELEKTRONICZNA – PLIK PDF

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



Cena 20 zł
w tym 8% VAT



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

eprasa.pl 48cd047335

Drodzy Czytelnicy!

Mam zaszczyt przekazać Państwu do czytania wakacyjny numer „Fizyki w Szkole”. Prawdopodobnie, gdy ten numer trafi w Państwa ręce będą już wakacje. Wakacje większości z nas kojarzą się ze Słońcem. Słońce to główne źródło ciepła dla naszej planety. Z drugiej strony wysoka temperatura panująca w Słońcu powoduje, że większość tworzących je atomów jest zjonizowana. W związku z powyższym wewnątrz Słońca płyną strumienie prądu elektrycznego, a jak wiemy od osiemnastego wieku, przepływ prądu powoduje powstanie pola magnetycznego. W związku z tym Słońce jest źródłem silnego pola magnetycznego, dużo silniejszego i burzliwego niż pole ziemskie. Tym zjawiskom poświęcony jest artykuł Andrzeja Wasiaka pt. Magnetyzm Słońca.

Innym ujemnym efektem działania Słońca mogą być zaburzenia rytmu serca. W związku z powyższym konieczną może się okazać wizyta u kardiologa. Jeśli ktoś z Państwa chciałby się dowiedzieć co go tam czeka, to polecam artykuł Tomasza Kubiaka poświęcony dokładnie tej tematyce.

Poza tym w tym numerze kontynuujemy cykl artykułów związanych z ostatnią Nagrodą Nobla. Artykuł ten nie jest najłatwiejszy, ale z drugiej strony dotyczy on najbardziej fascynujących i będących „na topie”, zagadnień fizyki.

Oczywiście mamy nadzieję, że pozostałe artykuły również Państwa zainteresują. Kończąc życzę Państwu udanych wakacji.

W imieniu redakcji.

Zbigniew Wiśniewski

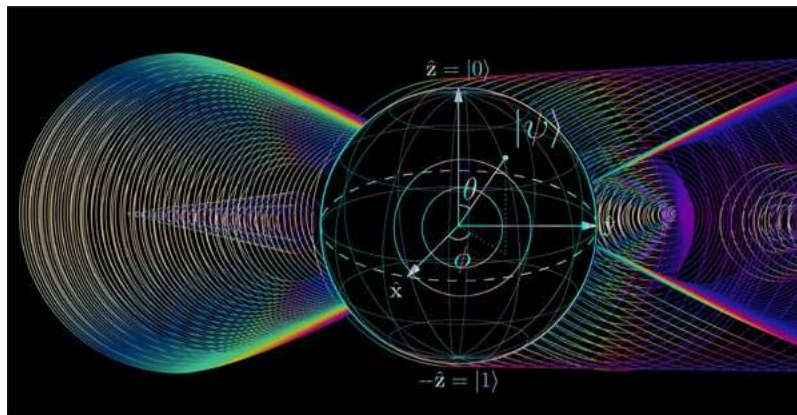
Fizyka wczoraj, dziś, jutro

4 Fizyka u kardiologa ■ Tomasz Kubiak

Serce, pomimo wielu symbolicznych znaczeń, stanowi dla przyrodników przede wszystkim kluczowy dla funkcjonowania organizmu narząd. Z kolei stosując terminologię techniczną, moglibyśmy przyrównać je do pompy zalewowo-tłoczącej.

12 Za co Nobel 2022? Część 3. Kubity, stany Bella, teleportacja ■ Jan Kurzyk

Istnienie natychmiastowej „wymiany informacji” między obiektami splątanego układu kwantowego od razu nasuwa myśl o wykorzystaniu tego do komunikacji z szybkością większą niż szybkość światła w próżni



33 Magnetyzm Słońca. Oddziaływanie plazmy z polem magnetycznym ■ Andrzej Wasiak

40 Leo Szilárd fizyk, który przewidział broń jądrową i sprzeciwił się jej użyciu – w 125 rocznicę urodzin i 90 rocznicę idei broni jądrowej ■ Kazimierz Mikulski

Z naszych lekcji

18 „Fiat Lux” – od Witelona do tomografu optycznego ■ Grzegorz Karwasz, Michał Kłosiński

Interaktywne wystawy z fizyki wkrótce będą obchodzić w Polsce 25 lat.

25 Dwadzieścia lat podręczników do fizyki ■ Jerzy Kuczyński

W ciągu ostatnich dwudziestu lat zostało wydane kilkadziesiąt podręczników do fizyki.

30 Żyoty fizyków. Lord Kelvin ■ Tomasz Wibig

Lord Kelvin jako taki nie urodził się w ogóle.



Astronomia dla każdego

43 Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba. Część III ■ Marcin Wesolowski

W trzeciej części rozważań związanych z mechaniką nieba przedstawione zostały dwa zagadnienia – równanie Keplera oraz ograniczone kołowe zagadnienie trzech punktów materialnych.



FIZYKA
w Szkole z Astronomią

NUMER 3 MAJ/CZERWIEC 2023
386 (LXIII) indeks 35810X ISSN 0426-3383

CENA 40,00 zł
(w tym 8% VAT)

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

Zdjęcie na okładce: Adobe Stock

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

Fizyka u kardiologa

Wizytę u kardiologa zapewne niewielu z nas łączy z fizyką. Praca lekarza specjalisty, który zajmuje się chorobami układu sercowo-naczyniowego, kojarzy się bowiem przede wszystkim z ordynowaniem specjalistycznych leków. Nie należy jednak zapominać, że do wykrywania i leczenia schorzeń kardiologicznych współcześnie wykorzystywana jest skomplikowana aparatura medyczna a sam opis funkcjonowania układu krwionośnego łączy w sobie aspekty elektryczne, mechaniczne, termodynamiczne oraz hydrauliczne. Warto zatem przybliżyć czytelnikom fizyczne aspekty diagnostyki i terapii zaburzeń pracy serca a także poznać podstawy działania wybranego sprzętu wykorzystywanego przez kardiologów.

Tomasz Kubiak

Fizjologia układu krążenia

Serce, pomimo wielu symbolicznych znaczeń, stanowi dla przyrodników przede wszystkim kluczowy dla funkcjonowania organizmu narząd. Z kolei stosując terminologię techniczną, moglibyśmy przyrównać je do pompy zalewowo-tłoczącej. Podczas skurczu grubościennnej lewej komory krew wyrzucana jest pod dużym ciśnieniem do aorty. Ze względu na obwodowy opór naczyniowy tylko część jej objętości przepływa bezpośrednio do tkanek, reszta natomiast zostaje zmagazynowana w rozdymającej się aorcie i dużych tętnicach dzięki sprężystym właściwościom ich ścian.

Z kolei podczas rozkurczu, gdy zastawka aortalna jest zamknięta, arterie kurczą się i oddają nadmiar krwi, dzięki czemu utrzymywana jest ciągłość przepływu bez nadmiernego spadku ciśnienia. Warto przypomnieć, że na łamach „Fizyki w Szkole” został już przedstawiany nieskomplikowany fizyczny model funkcjonowania układu

krwionośnego wraz z eksperymentem, który można wykonać w domu lub w szkole.¹

Wracając natomiast do uproszczonego opisu układu krążenia, należy wspomnieć, że tętnice rozgałęziają się, stopniowo zmniejszając swoją średnicę i elastyczność a dalej poprzez sieć naczyń włosowatych (gdzie krew odtlenia się i pobiera z tkanek ditlenek węgla oraz wymienia substancje odżywcze oraz metabolity) przechodzą w naczynia żyłne. Żyłami krew powraca do serca, trafiając do prawego przedsionka.

Oprócz opisanego przed chwilą krwioobiegu wielkiego (ogólnego) w organizmie wyróżniamy jeszcze krążenie płucne (małe), co schematycznie przedstawia rys. 1. Z prawej komory krew przez pień płucny i tętnice płucne trafia do płuc.² Tam w naczyniach włosowatych pobiera tlen i oddaje CO₂ (następuje wymiana gazowa oparta o zjawisko dyfuzji) i dalej wraca żyłami płucnymi do lewego przedsionka serca.

Mówiąc o układzie krwionośnym, musimy przede wszystkim uświadamiać sobie ogromną rolę, jaką spełnia w naszym życiu, będąc odpowiedzialnym nie tylko za

¹ T. Kubiak, Fizyczny opis układu tętniczego na przykładzie modelu powietrzni – teoria i eksperyment, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 5 (2016), s. 16-19.

² Zainteresowanych funkcjonowaniem układu oddechowego człowieka odsyłam do artykułu: T. Kubiak, Biofizyka układu oddechowego – od teorii do eksperymentu, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 1 (2018), s. 4-8.

transport gazów oddechowych, ale także ciepła, substancji odżywczych, produktów przemiany materii, hormonów itp. Prawidłowe krążenie jest zatem niezbędne w procesie utrzymania homeostazy, czyli wewnętrznej równowagi organizmu. Problemy pojawiają się, gdy pewne elementy układu krwionośnego przestają funkcjonować poprawnie. Przykładowo niewydolne serce nie zapewnia przepływu krwi, który pozwala sprostać zapotrzebowaniu tkanek na tlen i substancje odżywcze.

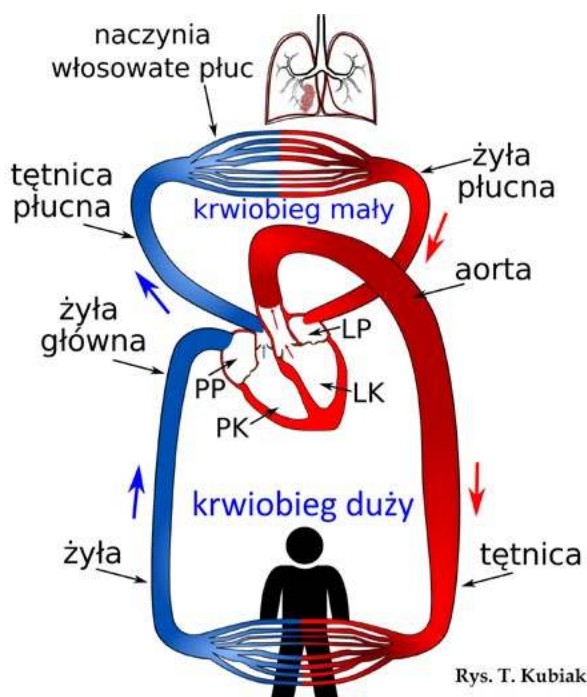
Co ciekawe, zaburzenia pracy serca bardzo często wiążą się z jego niedokrwieniem. Przyczyną jest przewężenie tętnic wieńcowych lub ich całkowite zablokowanie przez zakrzep wytworzony na powierzchni blaszki miażdżycowej. Z punktu widzenia fizyki natężenie przepływu krwi (objętość ΔV przepływająca w jednostce czasu Δt) przez tętnice wieńcowe jest wprost proporcjonalne do różnicy ciśnień Δp pomiędzy ich początkiem a końcem oraz odwrotnie proporcjonalne do sumy oporów R na całym ich przebiegu:

$$\dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta p}{R}$$

Wykorzystując prawo Hagena-Poiseuille'a opór R przeciwstawiający się przepływowi krwi możemy przybliżyć równaniem:³

$$R = \frac{8\eta l}{\pi r^4}$$

gdzie: η – współczynnik lepkości dynamicznej krwi, l – długość tętnicy, r – promień (wnętrza) tętnicy. Dla zainte-



Rys. 1. Uproszczony schemat układu krwionośnego człowieka. Skróty oznaczają odpowiednio: LP – lewy przedsionek, LK – lewa komora, PP – prawy przedsionek, PK – prawa komora serca.

resowanych warto dodać, że lepkość krwi zależy nie tylko od temperatury, ale także od wielu czynników, spośród których warto wspomnieć o hematokrycie. Wartość tego parametru, będącego stosunkiem objętości erytrocytów do objętości krwi pełnej,⁴ znaleźć możemy na wynikach badania morfologicznego krwi przy symbolu Ht lub Hct. Generalnie, im więcej erytrocytów we krwi, tym większa jest jej lepkość.

Należy wszakże pamiętać, że stosowanie prostych praw hydrauliki do układu biologicznego stanowi duże uproszczenie. Krew nie jest bowiem jednorodna, podczas jej przepływu powstają zawirowania a same krwinki mogą zmieniać swój kształt i objętość. Nie we wszystkich przypadkach potrzebujemy jednak skomplikowanego opisu matematycznego. Na potrzeby dydaktyki można spróbować posłużyć się modelem, bazującym na podstawowych równaniach, znanych z wykładu kursowego z fizyki. W układzie połączonych naczyń krwionośnych iloczyn całkowitego pola ich przekroju S i szybkości przepływającej krwi v jest stały:

$$S \cdot v = \text{const}$$

Z powyższego równania ciągłości wywnioskować możemy, że przy zwężeniu tętnicy (pod blaszką miażdżycową) szybkość przepływu wzrasta. Pociąga to za sobą spadek ciśnienia hydrostatycznego w bocznych odnogach naczyń. Zmiany w świetle tętnicy utrudniają zatem perfuzję do jej rozgałęzień, co oczywiście negatywnie wpływa na lokalne ukrwienie tkanek. Niedokrwienie serca niesie za sobą poważne konsekwencje w postaci niedotlenienia i uszkodzenia tego narządu. Jeśli pacjent odczuwa niepokojący ból lub inne objawy, powinien niezwłocznie udać się po pomoc do specjalisty.

Badanie fizykalne

Podczas wizyty kardiolog w pierwszej kolejności zbiera wywiad (informacje o odczuwalnych i obserwowalnych przez pacjenta objawach) oraz wykona kilka prostych badań, aby wstępnie ocenić stan chorego. Źródła historyczne wskazują, że prawdopodobnie najstarszym elementem badania przedmiotowego (fizykalnego) obwodowego układu krążenia jest palpacyjny pomiar tętna. W celach diagnostycznych przeprowadzano go już ponad dwa i pół tysiąca lat temu w Chinach.⁵

Przypomnijmy, że tętno to rytmiczne, sprężyste odkształcenie ścian naczyń tętniczych. Zależy ono nie tylko od częstotliwości rytmu serca (*ang. heart rate*), ale także m.in. od sztywności naczyń krwionośnych. Uznawane za prawidłowe, spoczynkowe wartości pulsu zależą także od wieku. Dla przykładu u noworodków zazwyczaj zawierają się w przedziale 130-140 uderzeń na min, a u dorosłych 60-80 uderzeń na min (u osób w bardzo dobrej kondycji fizycznej są niższe).

Powszechnie wiadomo, że ręczny pomiar tętna zazwyczaj przeprowadza się uciskając lekko opuszkami palców

³ Prawo sformułowali niezależnie: niemiecki fizyk i inżynier Gotthilf Hagen oraz francuski fizyk i fizjolog Jean Poiseuille na podstawie wyników prowadzonych przez siebie eksperymentów.

⁴ Krew pełna zawiera zarówno elementy morfotyczne (erytrocyty, leukocyty, trombocyty) jak i osocze.

⁵ Ciekawostki historyczne dotyczące pomiaru tętna znaleźć można w artykule: J. Krajewskiej, Teoria pulsu w starożytności, VOX PATRUM 78 (2021), 7-24.



Fot. 1. Na wyświetlaczu pulsoksymetru pokazane są wartości pulsu (PR bpm), wysycenia krwi tlenem (% SpO₂) oraz krzywa pletyzmograficzna.



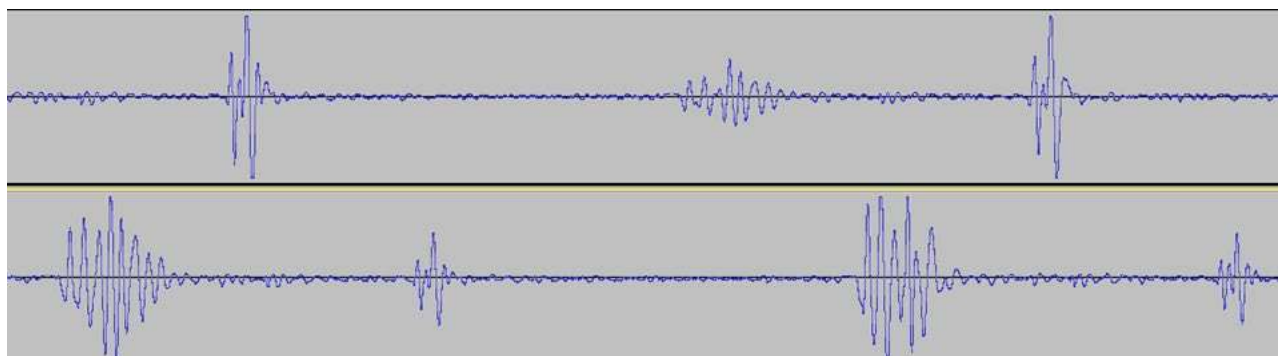
Fot. 2. Klasyczny stetoskop z dwustronną głowicą. Otwarty lejek, który dotyka ciała pacjenta jedynie obrzeżem, przeznaczony jest do słuchania tonów o niskiej częstotliwości, np. pochodzących od serca.

(nie kciukiem!)⁶ tętnicę promieniową w okolicy nadgarstka lub tętnicę szyjną. Oprócz określenia częstotliwości dokonuje się także oceny miarowości pulsu. Bardziej zaawansowana, wspomagana komputerem, analiza możliwa jest po zarejestrowaniu fali tętna, do czego współcześnie wykorzystuje się czujniki piezoelektryczne albo optyczne. Aby przekonać się, jak wygląda sygnał odzwierciedlający odkształcenia ścian naczyń tętniczych, nie zawsze musimy jednak posługiwać się skomplikowaną aparaturą medyczną, wystarczy spojrzeć na wyświetlacz pulsoksymetru.⁷ To proste urządzenie, które wielu z nas ma w swoich domach, oprócz wartości pulsu i wysycenia krwi tlenem (saturacji) pokazuje zazwyczaj również krzywą pletyzmograficzną (fot. 1). Parametry wyznaczone na podstawie analizy jej przebiegu mogą stanowić wskaźnik sztywności tętnic.

W kolejnych etapach badania przedmiotowego kardiolog przeprowadza nieinwazyjny pomiar ciśnienia krwi za pomocą sfigmomanometru oraz osłuchuje tzw. tony serca (odgłosy powstające w wyniku pracy zastawek) i szmery (dźwięki wywołane turbulentnymi przepływami krwi), przykładając do klatki piersiowej głowicę stetoskopu.⁸

Częstotliwości sygnałów bioakustycznych towarzyszących pracy serca zawierają się w przedziale 20 – 200 Hz. Przykładowo, jeśli na skutek zwężenia ujścia komory serca laminarny przepływ krwi zamieni się w burzliwy, to kardiolog powinien zarejestrować odpowiednie wrażenie słuchowe. Należy jednak mieć na uwadze, że poprawność diagnozy zależy nie tylko od jakości sprzętu medycznego, ale przede wszystkim od różnych czynników psychoakustycznych a także umiejętności i doświadczenia lekarza. Aby zminimalizować ryzyko popełnienia błędu coraz częściej klasyczne stetoskopy (przykładowy model ukazuje fot. 2) zastępuje się urządzeniami elektronicznymi, które umożliwiają zapis sygnału dźwiękowego. Dzięki temu możliwa jest nie tylko weryfikacja wyników badania przez innego specjalistę, ale również ich dogłębna analiza z wykorzystaniem profesjonalnego oprogramowania komputerowego.⁹

Co ciekawe, miłośnicy majsterkowania mogą sami zbudować prosty stetoskop elektroniczny, wykorzystując



Rys. 2. Graficzny zapis dźwięków towarzyszących pracy serca.

⁶ Przy mierzeniu pulsu nie używa się kciuka, żeby nie pomylić tętna badanego z własnym.

⁷ O fizycznych podstawach działania pulsoksymetru można przeczytać w artykule: T. Kubiak, Fizyka w karetce pogotowia, „Fizyka w Szkole” nr 6 (2014), s. 4-7.

⁸ Fizyczne podstawy działania sfigmomanometru oraz stetoskopu zostały opisane w artykule: T. Kubiak, Fizyka u internisty, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 2 (2018), s. 4-7.

⁹ Kluczowe zagadnienia związane z prawidłowym rejestrowaniem, przetwarzaniem i analizowaniem danych omówione zostały w artykule: T. Kubiak, Sygnały i obrazy, czyli fizyka w przetwarzaniu i analizie danych biomedycznych, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 3 (2020), s. 4-12.

w tym celu części z recyklingu, np. głowicę membranową od klasycznego stetoskopu (np. dołączonego w zestawie do ciśnieniomierza zegarowego), mikrofon elektretowy wymontowany ze starego telefonu komórkowego, przewód sygnałowy i wtyczkę minijack. Szczegóły techniczne można znaleźć w literaturze.¹⁰

W kontekście rejestracji fal akustycznych generowanych przez pracujące serce (rys. 2) warto wspomnieć, że istnieje również specjalna, stosunkowo rzadko dziś stosowana, metoda diagnostyczna nazywana fonokardiografią. Wynik takiego badania, nazwany fonokardiogramem i oznaczany skrótem FKG lub PCG (od ang. *phonocardiogram*), zapisany jest w formie pliku dźwiękowego. Ze względu na fakt, że ocena pozyskanego sygnału w domenie czasu może być utrudniona specjalności przeprowadzają czasami analizę widmową, opartą np. o metody fourierowskie.¹¹ Pozwala ona wyodrębnić składowe, charakteryzujące się określonymi częstotliwościami.

Generalnie podczas szczegółowej analizy sygnału można wyznaczyć kilkadziesiąt cech widma (np. moc średnią sygnału czy środek ciężkości widma), które pomagają zaklasyfikować fonokardiogram jako pochodzący od osoby zdrowej albo cierpiącej na określoną jednostkę chorobową. Mamy zatem do czynienia z oceną ilościową a nie tylko jakościową, jak w przypadku tradycyjnego osłuchiwania stetoskopem. Warto również wspomnieć, że rejestrację sygnału fonokardiograficznego zazwyczaj przeprowadza się równoległe z zapisem elektrokardiograficznym (czyli popularnym EKG), aby ustalić, w której fazie cyklu pracy serca pojawiają się charakterystyczne elementy FKG.

Badaniem obrazowym często wykonywanym przez kardiologów jest echokardiografia, nazywana potocznie przez pacjentów „echem serca”. Ta wykorzystująca fale ultradźwiękowe technika pozwala uwidoczniać anatomię serca, ocenić wielkość jego jam, funkcję zastawek oraz wykonać szereg pomiarów, np. frakcji wyrzutowej. Metodami ultrasonografii (także dopplerowskim badaniom przepływów krwi) poświęcono osobny artykuł w *Fizyce w Szkole*, do którego odsyłam zainteresowanych czytelników.¹²

Elektrokardiografia

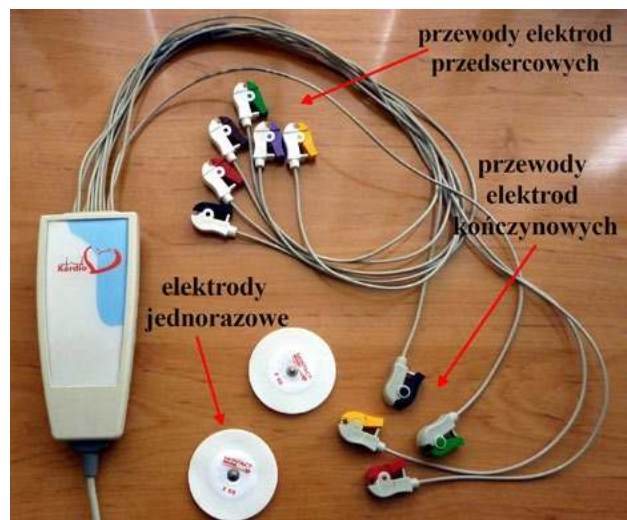
Gdy wspominamy o diagnostyce chorób serca, w pierwszej kolejności na myśl przychodzi nam zazwyczaj badanie EKG. Rejestrację elektrokardiogramu przeprowadza się zwykle rutynowo u pacjentów skarżących się na bóle w klatce piersiowej, uczucie kołatania serca czy duszność odczuwaną podczas wysiłku. Z punktu widzenia biofizyki zapis EKG w sposób pośredni odzwierciedla zjawiska elektryczne zachodzące w mięśniu sercowym. W tym miejscu warto przypomnieć, iż elektryczna aktywność serca wiąże się z procesami generowania oraz przewodzenia pobudze-

nia we włóknach mięśnia sercowego. Transport odpowiednich jonów przez błony komórkowe pozwala wzbudzać potencjał czynnościowy w kolejnych komórkach układu przewodzącego i dalej w włóknach roboczych.

Trzeba również wiedzieć, że naturalnym rozrusznikiem serca jest węzeł zatokowo-przedsionkowy, a budujące go komórki bodźcotwórcze są zdolne do spontanicznego wytwarzania impulsów elektrycznych. Pobudzenie fizjologicznie biegnie dalej trzema szlakami międzywęzłowymi do węzła przedsionkowo – komorowego. Następnie poprzez pęczek Hisa i jego odnogi oraz włókna Purkiniego jest rozprowadzane w ścianach komór serca.¹³

Podczas badania EKG, z poziomu powierzchni klatki piersiowej pacjenta, rejestruje się zachodzące w czasie zmiany napięcia elektrycznego. W przypadku odprowadzeń dwubiegunowych mierzona jest różnica potencjałów pomiędzy dwoma wybranymi punktami. Odprowadzenia jednobiegunowe umożliwiają z kolei ustalenie potencjału w danym miejscu (w odniesieniu do średniego potencjału całego organizmu).

Rutynowo na ciele pacjenta umieszcza się 10 elektrod (fot. 3). Sześć z nich to tzw. elektrody przedsercowe (z reguły gruszkowe przyssawkowe albo jednorazowe), które lokuje się w ściśle określonych pozycjach na klatce piersiowej. Cztery pozostałe elektrody kończynowe (w formie klipsów) umieszcza się w okolicy kostek i nadgarstków albo alternatywnie w dołkach podobojczykowych i nad kolcami biodrowymi (wówczas stosowane są elektrody jednorazowe). Szczegóły techniczne i podstawy fizyczne działania aparatu EKG przedstawiono w *Fizyce w Szkole* w oddzielnym artykule, który gorąco polecam wszystkim czytelnikom.¹⁴



Fot. 3. Cyfrowy aparat EKG wraz z przewodami połączeniowymi i elektrodami jednorazowymi.

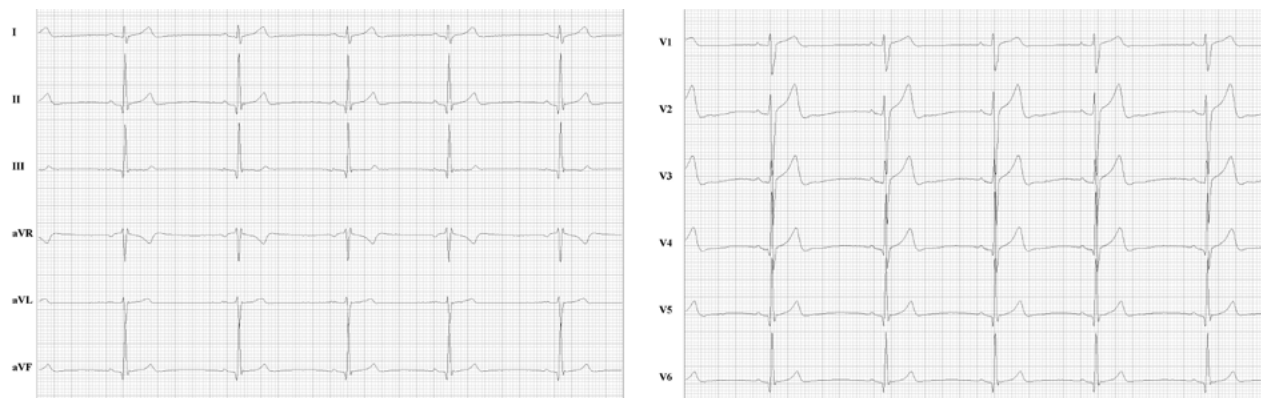
¹⁰ Miłośnikom majsterkowania i elektroniki polecam książkę Zaslawa Adamasza „Laboratorium w szufladzie. Anatomia człowieka”, PWN, Warszawa 2019.

¹¹ Nazwa upamiętnia Jeana Fouriera francuskiego fizyka i matematyka, który stworzył podwaliny analizy harmonicznej.

¹² T. Kubiak, Ultrasonografia, czyli fale akustyczne w służbie medycyny, „Fizyka w Szkole z Astronomią”, nr 5 (2017), s. 4-9.

¹³ Nazwy wspomnianych struktur anatomicznych upamiętniają odkrywców, czyli szwajcarskiego lekarza Wilhelma Hisa młodszego oraz czeskiego fizjologa Jana Evangelistę Purkiniego. Ostatniego z wymienionych naukowców stali czytelnicy kojarzyć mogą również z tzw. zjawiskiem Purkiniego (zmianą percepcji jasności barw przy słabym oświetleniu), które opisano w artykule: T. Kubiak, Od biofizyki układu wzrokowego do złudzeń optycznych, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 6 (2019), s. 4-10.

¹⁴ T. Kubiak, Fizyczne podstawy badania czynności bioelektrycznej serca, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 3 (2015), s. 47-50.



Rys. 3. Standardowy, 12-kanalowy zapis EKG zarejestrowany u młodego, zdrowego mężczyzny.

Wynikiem badania elektrokardiograficznego jest elektrokardiogram, czyli zestaw krzywych zbieranych standardowo z dwunastu odprowadzeń (rys. 3). Zapis ocenia się względem tzw. linii izoelektrycznej, czyli linii poziomej rejestrowanej, gdy w sercu nie stwierdza się pobudzenia. Dla ciekawostki warto dodać, że gdyby cały zapis EKG miał postać poziomej linii, mielibyśmy do czynienia z asystolią, czyli całkowitym zanikiem czynności elektrycznej serca a w konsekwencji zatrzymaniem jego skurczów. W większości przypadków taka sytuacja jest nieodwracalna i kończy się śmiercią pacjenta, tym bardziej, że wbrew temu, co pokazują niektóre seriale medyczne, asystolia nie jest podatna na defibrylację.¹⁵

Wróćmy jednak do analizy elementów prawidłowej krzywej EKG (rys. 4). W przypadku załamek, czyli wychyleń od linii izoelektrycznej w górę lub w dół, analizuje się ich amplitudę, kształt i czas trwania. Z kolei dla zawartych między nimi odcinków ocenia się przede wszystkim ich położenie względem linii podstawowej oraz czas trwania. Dla kardiologa bardzo istotny jest odcinek ST, gdyż jego uniesienie lub obniżenie w stosunku do linii izoelektrycznej wskazuje na niedokrwienie mięśnia sercowego. Dla przykładu świeży zawał serca charakteryzuje się tzw. falą Pardee¹⁶, czyli wypukłym ku górze uniesieniem odcinka ST (mówimy o tzw. STEMI, czyli ang. *ST Elevation Myocardial Infarction*).

Oczywiście analiza zapisu EKG pozwala na wykrycie innych patologii, w tym zaburzeń rytmu powstałych na skutek nieprawidłowego wytwarzania albo przewodzenia bodźców w obrębie mięśnia sercowego. Warto wspomnieć, że najgroźniejsze dla życia są zaburzenia rytmu o charakterze komorowym (częstoskurcz komorowy i migotanie komór), którym towarzyszy niestabilność hemodynamiczna a wystąpieniu sprzyja niedokrwienie mięśnia sercowego.

Niestety, EKG wykonane w spoczynku nie musi dawać niepokojących wyników nawet u osób cierpiących na chorobę niedokrwinną serca. Jeśli bowiem pacjent nie wykonuje żadnych ruchów, to zapotrzebowanie mięśnia na tlen może być jeszcze pokrywane a tym samym nie pojawia się

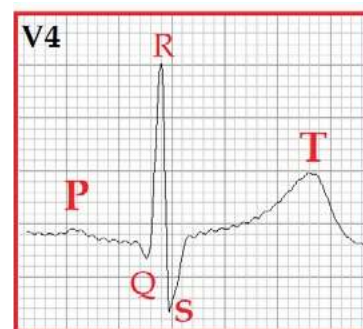
widoczne zmiany aktywności serca wywołane niedoborem tego pierwiastka. Oznak niedokrwienia należy spodziewać się jednak podczas wzmożonej aktywności fizycznej. Dlatego lekarz często zleca przeprowadzenie zapisu EKG w trakcie wysiłku.

Próba wysiłkowa

Podczas próby wysiłkowej pacjent podejmuje wzmożoną aktywność fizyczną z przyklejonymi do klatki piersiowej elektrodami, rejestrującymi w sposób ciągły sygnał EKG. Badanie odbywa się na ruchomej bieżni, której szybkość lub nachylenie są zwiększane, bądź na ergometrze rowerowym przy wzrastającym obciążeniu.¹⁷ Nietrudno domyślić się, że częstość akcji serca oraz skurczowe ciśnienie krwi prawidłowo wzrastają podczas wysiłku. W założeniu osoba bez dolegliwości natury kardiologicznej powinna bez problemów podjąć wysiłek do 85% tętna maksymalnego, charakterystycznego dla płci, wieku i masy ciała.¹⁸ Jeśli w stanie spoczynku zużycie tlenu wynosi 1 MET (od ang. *metabolic equivalent*, odpowiadający 3,5 ml tlenu/kg/min), to zdrowy 40-letni mężczyzna jest zdolny do wykonywania wysiłków fizycznych do 10 MET.

Przyjęto, iż 7 MET stanowi dolną granicę normy w przypadku aktywności na ruchomej bieżni. Jeśli zajdzie konieczność przerwania testu przy obciążeniu 5 MET lub mniej, oznacza to, że pacjent posiada istotnie zmniejszoną tolerancję na wysiłek. Większe zapotrzebowanie na tlen wymusza wzmożony przepływ krwi przez tętnice wieńcowe. Gdy ich drożność jest ograniczona, podaż tego pierwiastka nie jest wystarczająca i pojawiają się objawy niedokrwienia.

Podstawą do prawidłowego rozpoznania choroby wieńcowej są przede wszystkim charakterystyczne nieprawidłowości, widoczne w EKG podczas wysiłku lub zaraz po jego zakończeniu. Za kluczowe uznaje się ewentualne zmiany odcinka ST, a w szczególności jego obniżenie ($\geq 0,1$ mV)



Rys. 4. Fragment krzywej EKG z zaznaczonymi załamekami P, Q, R, S i T.

¹⁵ O defibrylatorze i innych urządzeniach do ratowania życia można przeczytać w artykule: T. Kubiak, Latające karetki, czyli o fizyce śmigłowców ratowniczych, „Fizyka w Szkole z Astronomią”, nr 4 (2019), s. 4-9.

¹⁶ Harold E.B. Pardee był amerykańskim kardiologiem, pionierem w zakresie badań elektrokardiograficznych.

¹⁷ Prototyp bieżni ruchomej skonstruował brytyjski inżynier William Cubitt (1785–1861) na potrzeby więźniów. Do badań wysiłkowych EKG po raz pierwszy wykorzystano ją w 1928 roku.

¹⁸ Najprostsze wyrażenie na tętno maksymalne, to: $(220 - \text{wiek pacjenta wyrażony w latach})$. Stosowany jest również wzór Tanaki $(208 - 0,7 \times \text{wiek})$ oraz szereg innych formuł.

poziome lub skośne ku dołowi w stosunku do linii izoelektrycznej. Jeśli zatem spełnione są wybrane kryteria dodatniej próby wysiłkowej, pojawia się konieczność prowadzenia dalszej diagnostyki, w tym badań inwazyjnych, o których będzie mowa w dalszej części tego artykułu.

EKG metodą Holtera

Standardowe, spoczynkowe EKG obejmuje zazwyczaj tylko około 10 sekund zapisu. Tak krótki czas badania sprawia, że część patologii, szczególnie tych przemijających, w ogóle może nie zostać zarejestrowana. Rozwiązaniem jest przeprowadzenie 24 lub 48-godzinnego ciągłego monitorowania EKG metodą Holtera.¹⁹ W zależności od modelu zasilany baterią rejestrator holterowski wyposażony jest w zestaw 3-12 elektrod, które przykleja się na klatce piersiowej pacjenta. Chory zabiera urządzenie do domu i podejmuje codzienne, normalne aktywności. Prowadzi też dzienniczek, gdzie zapisuje swoje subiektywne odczucia (np. kołatanie serca, czyli wrażenie szybkiej i nierównej pracy tego narządu). Lekarz może później skonfrontować zapiski pacjenta z zarejestrowanym zapisem EKG i sprawdzić, czy w rzeczywistości wystąpiły jakieś arytmie.

Generalnie podstawowym celem badania holterowskiego jest właśnie wykrycie oraz ocena nasilenia zaburzeń rytmu serca. Rutynowo przeprowadza się też analizę zmienności dobowej rytmu podstawowego. W tym miejscu warto przypomnieć, że fizjologicznie najszybsza czynność serca występuje rano, a najwolniejsza w nocy, w trakcie snu, gdy serce bije około 50/min, a u młodych, zdrowych sportowców może spowalniać nawet do 33/min. Oczywiście badanie holterowskie pozwala także wykryć objawy niedokrwienia (np. wspomniane wcześniej obniżenie odcinka ST), występujące podczas wysiłków podejmowanych przez pacjenta w ciągu dnia.

Z technicznego punktu widzenia całodobowy zapis EKG utrwalany jest na karcie pamięci, a po zgraniu danych na komputer interpretowany przy wykorzystaniu dedykowanego oprogramowania. Stosując opcję automatycznej

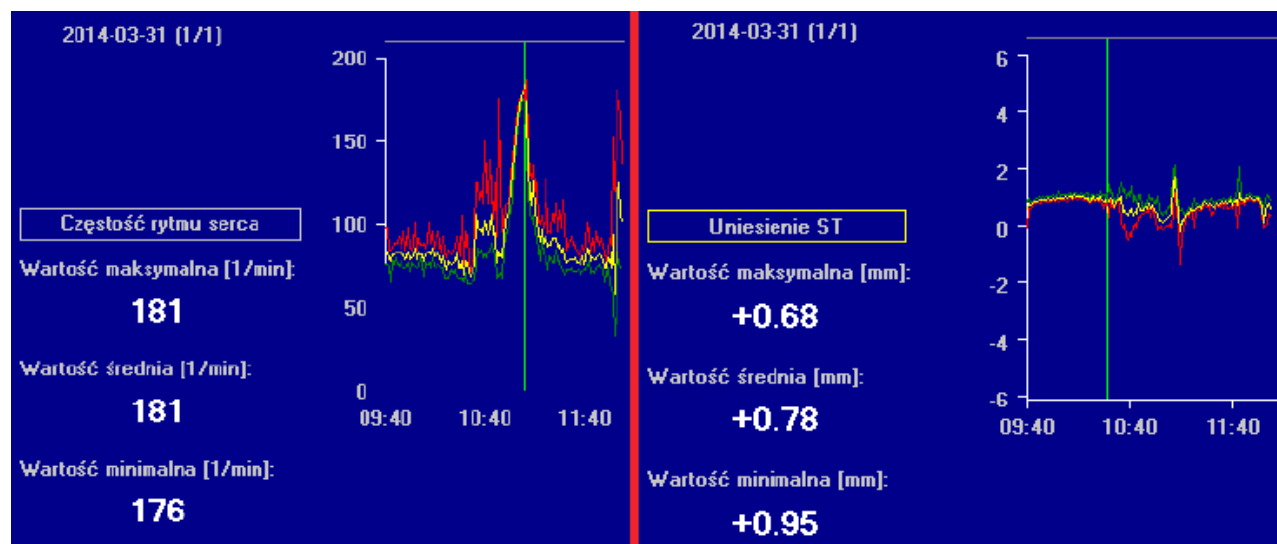


Rys. 5. Przykład pojedynczej ekstrasystolii komorowej, czyli nieprawidłowego pobudzenia, mającego swe źródło w komorze serca.

analizy, można otrzymać dane np. o liczbie zespołów QRS przypisanych do określonych wzorców, minimalnej, maksymalnej oraz średniej częstotliwości akcji serca, rodzajach i liczbie wykrytych arytmii komorowych (przykład nieprawidłowego pobudzenia obrazuje rys. 5) a także nadkomorowych (te ostatnie mają związek z nieprawidłowym wytwarzaniem lub przewodzeniem bodźców w strukturach powyżej pęczka Hisa) czy ewentualnych zmianach położenia odcinka ST względem linii podstawowej.

Oczywiście kardiolog musi zawsze zweryfikować wyniki automatycznej oceny, sprawdzając, czy nieprawidłowości rzeczywiście wystąpiły w zapisie EKG. Algorytm może bowiem błędnie zaklasyfikować artefakty (np. związane z przemieszczeniem się elektrody podczas gwałtownych ruchów pacjenta) jako patologiczne pobudzenia czy inne arytmie. Istotna jest też interpretacja otrzymanych wykresów, np. trendów zmian położenia odcinka ST w czasie czy dobowej zmienności rytmu serca (rys. 6).

Dla zainteresowanych warto wspomnieć jeszcze o aparatach typu „event monitor”. Mają one niewielkie rozmiary i mogą być noszone przez pacjenta nawet przez miesiąc, aby umożliwić wykrycie bardzo rzadko występujących arytmii. W starszych modelach rejestracja odbywała się po aktywacji urządzenia przez pacjenta, który poczuł niepokojące objawy. We współczesnych urządzeniach dane są buforowane w systemie ciągłym (w pętli), a ich zapis



Rys. 6. Fragmenty wykresów trendów częstości akcji serca oraz zmian odcinka ST na podstawie badania EKG metodą Holtera.

¹⁹ Nazwa pochodzi od wynalazcy metody, amerykańskiego biofizyka Normana Holtera.

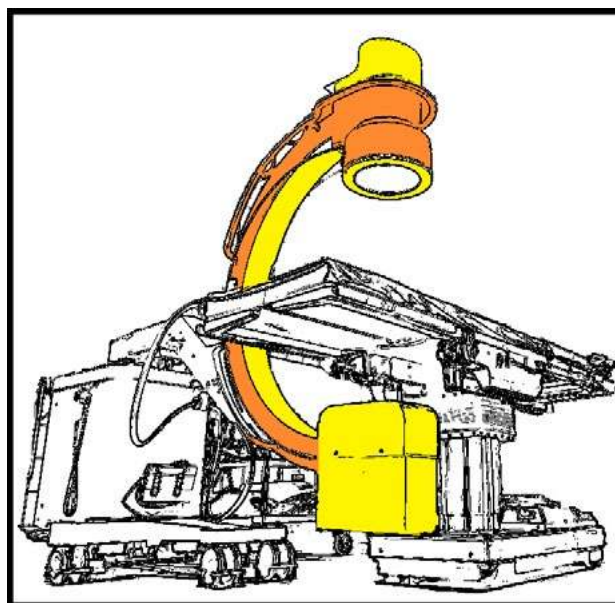
na karcie pamięci uruchamia się samoczynnie po wykryciu oznak nieprawidłowego rytmu serca. Dodatkowo bufor wsteczny pozwala zachować sygnał bezpośrednio poprzedzający incydent kardiologiczny. Ponadto opcja przesyłu sygnału EKG do centrum telemedycznego umożliwia jego szybką analizę i w razie konieczności wysłanie do chorego karetki pogotowia. Istnieją także wszczepiane rejestratory pętlowe (ILR od ang. *implantable loop recorder*) implantowane pod skórę klatki piersiowej pacjenta. Te złożone z dwóch elektrod, mikroczypa i baterii urządzenia pozwalają na jednokanałowe monitorowanie pracy serca nawet przez trzy lata.

Kardiologia interwencyjna

W przypadku pacjentów ze świeżym zawałem serca lub zaostrzeniem choroby wieńcowej konieczne jest ich natychmiastowe leczenie szpitalne. Współcześnie nie ogranicza się ono do farmakoterapii.²⁰ Zdecydowanie lepszy efekt daje bowiem mechaniczne udrażnianie przewężonych lub całkowicie zatkanych tętnic. Wstępem jest koronarografia, czyli inwazyjne badanie radiologiczne, pozwalające na dokładną ocenę stanu naczyń wieńcowych. Przeprowadza się je w pracowni hemodynamiki z wykorzystaniem angiografu, tj. urządzenia do obrazowania, którego podstawowym elementem jest tak zwane ramię C (rys. 7). Nietrudno domyślić się, że nazwa pochodzi od kształtu przypominającego wspomnianą literę. Po jednej stronie poruszającego się wokół pacjenta ramienia znajduje się lampa rentgenowska, natomiast po drugiej detektor. Oczywiście nowoczesne angiografy wyposażone są w systemy kolimacji wiązki promieniowania oraz redukcji dawki dla pacjenta i obsługi.²¹

W pierwszej kolejności u chorego wykonuje się wkłucie do tętnicy udowej w pachwinie albo punkcję tętnicy promieniowej na powierzchni dłoniowej przedramienia. Po założeniu koszulki naczyniowej do jednej ze wspomnianych tętnic wprowadza się specjalny cewnik, który przepycha się dalej przez aortę aż do serca. Gdy końcówka cewnika dotrze już do tętnicy wieńcowej, wstrzykiwane jest przez nią 5-8 ml niejonowego środka kontrastującego zawierającego jod.²² Dzięki obrazowaniu rentgenowskiemu²³ kardiolog śledzi na monitorze, jak środek ten rozprzestrzenia się w gałęziach naczyń wieńcowych (rys. 8). Zwężenia ich światła są wyraźnie widoczne, a całkowite zamknięcie sprawia, że kontrast nie przepływa dalej. Oczywiście zapis badania w postaci szeregu zdjęć rentgenowskich jest dostępny do analizy w postaci cyfrowej.

W przypadku techniki DSA (ang. *Digital Subtraction Angiography*) od poszczególnych zdjęć odejmuje się negatyw obrazu, który został zarejestrowany jeszcze przed podaniem kontrastu. Taka subtrakcja sprawia, iż tło zdjęć wynikowych jest szare, a wyraźnie uwidaczniają się na nich



Rys. 7. Ramię C jest podstawowym elementem angiografu.

tylko naczynia wypełnione kontrastem. Profesjonalnie wykonany koronarogram obejmuje obrazy tętnic wieńcowych (od ich ujścia aż do odgałęzień o średnicy ok. 300 μm), zarejestrowane w co najmniej 2 projekcjach. Lekarz ocenia m.in. stopień zwężenia naczyń, szybkość przepływu kontrastu oraz określa parametry zmian (długość, symetrię, zwapnienia). W przypadku chorych z ostrym zespołem wieńcowym (np. zawałem serca) od razu podejmuje się działania mające na celu odblokowanie światła naczyń.

Koronarografia jest zatem połączona z angioplastyką wieńcową. Procedura ta polega na wprowadzeniu w obręb przewężenia cewnika zakończonego balonem. Nadyma się go stopniowo pod ciśnieniem 3-12 barów, docelowo do objętości dopasowanej do średnicy nieobjętego zmianami naczynia. Tym samym pod wpływem nacisku wywieranego na złogi następuje ich miażdżenie (pęknięcie blaszki miażdżycowej i wgniecenie jej w ścianę naczynia) a tym samym przywrócenie wymaganego światła tętnicy wieńcowej.

W trakcie procedury może dochodzić również do kontrolowanego rozciągnięcia ściany tętnicy. Gdyby okazało się ono jednak nadmierne, mogłoby doprowadzić do uszkodzenia komórek mięśniowych błony środkowej a w konsekwencji do restenozy (ponownego zwężenia światła tętnicy). Dlatego podczas koronaroplastyki zakłada się biokompatybilne protezy wewnątrzwieńcowe, czyli stenty. Nie tylko chronią one przed niepożądanym zwężeniem światła tętnicy bezpośrednio po zabiegu, ale również przez dłuższy czas od jego zakończenia. Posiadają kształt cylindryczny, siateczkowatą strukturę a przede wszystkim dobre właściwości podporowe. Rozprężają się albo za pomocą cewnika balonowego, na którym są osadzone, albo samodzielnie (po usunięciu specjalnej membrany ochronnej).

²⁰ W celu rozpuszczenia zakrzepów wewnątrznaczyniowych czasami już w fazie przedszpitalnej podaje się tzw. leki trombolityczne, takie jak: alteplaza czy tenekteplaza.

²¹ O wpływie promieniowania jonizującego na organizmy żywe przeczytać można w artykule: T. Kubiak, Od naturalnej promieniotwórczości do medycyny nuklearnej, czyli człowiek a promieniowanie jonizujące, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 5 (2020), s. 4-11.

²² Środki niejonowe zachowują obojętność elektryczną po rozpuszczeniu w wodzie.

²³ O obrazowaniu z wykorzystaniem promieniowania X, ale w nieco innych zastosowaniach traktował tekst: T. Kubiak, Fizyczne podstawy badań rentgenowskich kości i stawów, *Fizyka w Szkole z Astronomią*, nr 6 (2021), s. 16-21.



Rys. 8. Podczas koronarografii środek kontrastowy rozprzestrzenia się w gałęziach naczyń wieńcowych.

Dodatkowo oprócz metalowych stentów konwencjonalnych stosuje się również polimerowe bądź pokrywane polimerem protezy wewnątrznacyniowe nowszej generacji. Są one zdolne do powolnego uwalniania leków hamujących proces podziału komórek śródbłonna oraz przeciwnaczyniowych. Po zakończeniu poszerzania naczynia i implantacji stentu balonik jest opróżniany i wyciągany wraz z cewnikiem z organizmu. Miłośników historii nauki na pewno zainteresuje fakt, że pierwszy udany zabieg przezskórnej angioplastyki balonowej tętnicy wieńcowej wykonał w 1977 roku w szwajcarskim Zurychu niemiecki lekarz Andreas Grüntzig, który do dziś uznawany jest za pioniera kardiologii inwazyjnej.²⁴

Warto wspomnieć, że oprócz angioplastyki balonowej istnieją jeszcze inne metody udrażniania tętnic. Do najważniejszych z nich należy ateryktomia, która może być przeprowadzana z wykorzystaniem różnorodnych rozwiązań technicznych. Urządzenie zwane ateryktomem kierunkowym wykorzystuje element tnący pracujący wzdłuż osi długiej naczynia. Ścina on złogi wpuklające się do światła tętnicy a odpady gromadzi w specjalnym stożkowatym zbiorniczku. Z kolei ateryktom ssący, dzięki obrotowej turbinie, rozdrabnia zmiany i przez mechanizm próżniowy zasysa ich resztki poza organizm. Innym rozwiązaniem jest rotator, który wirującym wiertłem z końcówką diamentową usuwa twarde złogi wapnia z tętnic wieńcowych. W tym przypadku starte w pył pozostałości usuwane są wraz z prądem krwi.

Od grudnia 2021 roku w Polsce stosuje się jeszcze nowszą technikę, czyli ateryktomię orbitalną. Bazuje ona na elemencie mechanicznym – wirującej z szybkością 80 – 120 tys. obrotów na minutę ekscentrycznie osadzonej koronie (o średnicy 1,25 mm) z diamentową powłoką. Pozwala ona usuwać nawet masywne zwapnienia w tętnicach wieńcowych.

Warto wspomnieć, iż istnieje także ateryktomia laserowa. W jej przypadku wysokoenergetyczne impulsy lasera

ekscymeryowego (XeCl) o długości fali 308 nm (ultrafiolet) i energii do 80 mJ/mm² przy współdziale powstającej fali akustycznej (wywołującej efekty kawitacyjne), powodują rozbijanie wiązań chemicznych a tym samym dezintegrację blaszki miażdżycowej. Oczywiście wszystkie opisane wcześniej zabiegi wykonuje się pod kontrolą obrazowania rentgenowskiego (fluoroskopii).

Należy mieć nadzieję, że po przeczytaniu tego artykułu czytelnicy „Fizyki w Szkole” nie będą mieli wątpliwości, iż dzięki zastosowaniu metod fizycznych i nowoczesnych zdobyczy techniki współczesna kardiologia może w sposób skuteczny ratować zdrowie i życie tysiącom pacjentów, którzy corocznie zapadają na choroby układu sercowo-naczyniowego.

dr Tomasz Kubiak
biofizyk i fizyk medyczny
Wydział Fizyki UAM w Poznaniu

LITERATURA:

- [1] Zarys kardiologii, pod. red. H. Chlebasa i W. Januszewicza, PZWL, Warszawa 1992.
- [2] Feliks Jaroszyk, Elektryczna, magnetyczna i mechaniczna aktywność serca. Metody badawcze [w:] Biofizyka pod red. F. Jaroszyka, PZWL, Warszawa 2008, s. 644-663.
- [3] B. Turczyński, Właściwości biomechaniczne i geometryczne naczyń krwionośnych [w:] Biofizyka pod red. F. Jaroszyka, PZWL, Warszawa 2008, s. 624-636.
- [4] T. H. Wierzbę, T. Zdrojewski, K. Narkiewicz, Czynniki kształtujące ciśnienie tętnicze Część II. Zastosowanie niektórych praw fizycznych w hemodynamice układu krążenia, *Arterial Hypertension* 8(1), 2004, s. 61-80.
- [5] W. Lejkowski i inni, Wieloaspektowa analiza spektralna sygnałów fonokardiograficznych, *Przegląd Elektrotechniczny* 10, 2017, 73-76.
- [6] T. Tomasik, A. Windak, A. Skalska, J. Kulczycka-Życzkowska, J. Kocemba, *Elektrokardiografia dla lekarza praktyka*, Uniwersyteckie Wydawnictwo Medyczne VESALIUS, Kraków 1998, s. 11-20.
- [7] J. Lach i inni, Jak prawidłowo wyliczyć tętno maksymalne? *Folia Cardiologica* 17 (5), 2022, 293-296.
- [8] Leczenie choroby niedokrwiennej serca, pod red. L. Giecy, *Via Medica*, Gdańsk 2000, s. 147-184.
- [9] M. A. Kośmicki, Inwazyjna i nieinwazyjna diagnostyka tętnic wieńcowych – koronarografia klasyczna i komputerowa oraz rezonans magnetyczny, *Kardiologia* 11(3), 2016, 29-32.
- [10] P. J. Waciński, B. Kondracki, Ateryktomia laserowa ELCA (excimer laser coronary atherectomy) - stan obecny i perspektywy, *Kardiologia Inwazyjna* 11(3), 2016, 29-32.
- [11] J.H. Lee, D.W. Seo, Development of ECG Monitoring System and Implantable Device with Wireless Charging, *Micromachines* 10(1), 2019, 38.
- [12] T. Pawłowski, R. J. Gil, Ateryktomia orbitalna jako metoda z wyboru u chorego po operacji pomostowania aortalno-wieńcowego, *Zeszyty Naukowe CSK MSWiA*, 1 (2022).

²⁴ Ciekawostki związane z opracowaniem cewnika z balonem i jego testowania w rodzinnej kuchni Gruentzigów znaleźć można w artykule: S. Stern, Andreas Gruentzig – życie i śmierć pioniera nauki, *Folia Cardiologica Excerpta* 1(1), 2006, 82-84.



Eksperymenty, które opisałem w drugiej części artykułu potwierdziły, że splątanie kwantowe jest faktem, a pomiar stanu jednego z obiektów układu splątanego wpływa natychmiastowo na stan drugiego z nich niezależnie od odległości między nimi. I choć nie wiadomo jak to się dzieje, to dziś już nikt tego nie podważa.

Jan Kurzyk

Istnienie natychmiastowej „wymiany informacji” między obiektami splątanego układu kwantowego od razu nasuwa myśl o wykorzystaniu tego do komunikacji z szybkością większą niż szybkość światła w próżni. Ale jak tłumaczyłem w poprzedniej części nie jest to możliwe. Nie oznacza to jednak, że splątania kwantowego nie da się wykorzystać. Znajduje ono coraz więcej spektakularnych zastosowań. Jednym z nich jest zjawisko teleportacji kwantowej, którą opiszę w tej części cyklu. W artykule będę posługiwał się pojęciami, które omówiłem w poprzednich częściach, dlatego osoby nieznające mechaniki kwantowej zachęcam do zapoznania się z tymi artykułami.

Kubit i kudit

Przypomnijmy uzasadnienie przyznania nagrody Nobla z fizyki w 2022 roku, czytamy w nim, że nagroda została przyznana „za eksperymenty ze splątanymi fotonami, ustalenie naruszenia nierówności Bella i pionierską naukę o informacji kwantowej”. Pierwsze eksperymenty ze splątanymi fotonami miały na celu eksperymentalne testowanie nierówności Bella. Opisałem to w dwóch poprzednich częściach cyklu [1,2]. Kiedy okazało się, że splątanie kwantowe jest realną cechą układów kwantowych,

a wynikające stąd korelacje kwantowe są silniejsze niż klasyczne szybko zdano sobie sprawę z ogromnego praktycznego potencjału jaki w tym tkwi. Zaczęła tworzyć się wymieniona w przytoczonym uzasadnieniu *nauka o informacji kwantowej*.

Podstawową jednostką informacji w informatyce klasycznej jest bit. Bit może przyjmować tylko dwie wartości 0 lub 1. W informatyce kwantowej informacje możemy kodować za pomocą stanów kwantowych dwustanowych obiektów, np. stanu spinowego cząstki o spinie $\frac{1}{2}$, stanu polaryzacji fotonu itp. Tego typu stany nazywamy *kubitami* (ang. qubit, skrót od quantum bit). Analogicznie jak klasyczny bit kubit może przyjmować dwa wyróżnione stany, które w notacji Diraca oznaczamy jako $|0\rangle$ i $|1\rangle$. Jednak w odróżnieniu od klasycznego bitu, kubit może znajdować się w stanie, który jest superpozycją tych dwóch stanów. W najogólniejszym przypadku stan kubitów przyjmuje postać

$$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle.$$

Stany $|0\rangle$ i $|1\rangle$ stanowią tzw. *standardową bazę obliczeniową*, a stałe α i β , nazywamy amplitudami prawdopodobieństwa. Jeśli dokonujemy pomiaru kubitów w bazie standardowej¹, to kwadrat modułu liczb α i β , zgodnie z regułą Borna, jest równy prawdopodobieństwu znalezienia się obiektu (po pomiarze) w danym stanie bazowym. Pomiar nieodwracalnie zmienia stan kubitów.

¹ O wyborze bazy pomiaru decyduje m.in. ustawienie aparatury pomiarowej, np. bramki Sterna-Gerlacha w przypadku pomiaru spinu, czy kierunku polaryzatora w przypadku pomiaru polaryzacji fotonu.

Jeśli suma prawdopodobieństw jest równa 1

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1,$$

to stan kubit nazywamy *stanem czystym*.

Możliwe stany pojedynczego kubit można zaprezentować za pomocą tzw. sfery Blocha. Stanom czystym kubitów można przypisać punkty na tej sferze jak na rysunku 1. Oś y układu współrzędnych na tym rysunku jest osią urojoną. W takiej reprezentacji klasycznemu bitowi odpowiadają tylko punkty na biegunach sfery Blocha.

Parametry α i β , przechowują w sobie nie tylko informację o prawdopodobieństwie wyniku pomiaru, ale również o fazie obu stanów. Przy czym ważna jest względna faza, czyli różnica obu faz². W reprezentacji Blocha parametry α i β możemy zapisać następująco

$$\alpha = \cos\left(\frac{\theta}{2}\right), \quad \beta = e^{i\varphi} \sin\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

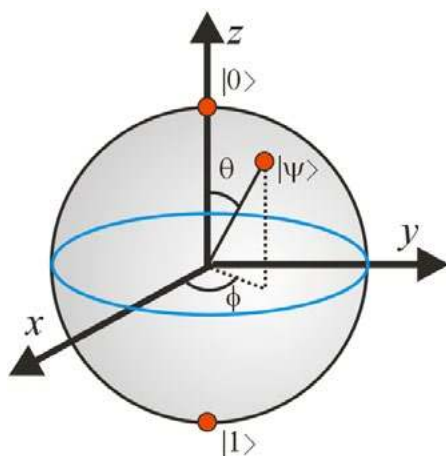
EkspONENTA $e^{i\varphi}$ przechowuje informację o wspomnianej względnej fazie. Zauważmy, że faza nie zmienia prawdopodobieństwa wyniku pomiaru.

Z punktu widzenia informacji kwantowej zależy nam na utrzymaniu kubitów w czystych stanach. Niestety skutek oddziaływań z otoczeniem kubit może przejść w *stan mieszany* będący statystyczną mieszaniną stanów czystych. Takim stanom odpowiadają punkty leżące wewnątrz sfery Blocha (w kuli Blocha).

Naturalnym uogólnieniem kubit na stany w d -wymiarowych przestrzeniach Hilberta jest kudit (ang. qudit). *Stopniem kudit* lub jego *liczbą stopni swobody* jest liczba wektorów bazowych. Dla czystego stanu kudit stopnia d mamy

$$|\psi\rangle = \sum_{i=0}^{d-1} \alpha_i |i\rangle, \quad \sum_{i=0}^{d-1} |\alpha_i|^2 = 1.$$

Kuditem stopnia d jest stan dowolnego obiektu kwantowego, który może występować w d stanach kwantowych. Np. kuditem trzeciego stopnia zwanym też kutritem może być stan spinowy cząstki o spinie 1.



Rysunek 1. Reprezentacja kubit za pomocą sfery Blocha. Oś y jest osią urojoną.

Stany Bella

Kubity mogą z sobą tworzyć stany splątane. Najprostszymi maksymalnie splątanymi stanami dwóch kubitów są tzw. *stany Bella*³ nazywane też *parami EPR*. Jest ich cztery i tworzą one bazę zwaną *bazą Bella* czterowymiarowej przestrzeni Hilberta dwóch kubitów:

$$|\Phi^+\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A |0\rangle_B + |1\rangle_A |1\rangle_B),$$

$$|\Phi^-\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A |0\rangle_B - |1\rangle_A |1\rangle_B),$$

$$|\Psi^+\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A |1\rangle_B + |1\rangle_A |0\rangle_B),$$

$$|\Psi^-\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A |1\rangle_B - |1\rangle_A |0\rangle_B).$$

Indeksy dolne opisują stany kubitów A i B odpowiednio. Gdyby odnieść powyższe stany do stanów spinowych układu dwóch cząstek o spinach $\frac{1}{2}$, to możemy przyjąć, że

$$|0\rangle \equiv |\uparrow\rangle \quad \text{ i } \quad |1\rangle \equiv |\downarrow\rangle.$$

Wówczas pierwsze dwa stany Bella odpowiadają układowi o spinie całkowitym równym 1, a dwa następne układowi singletowemu o spinie zerowym. Pomiar jednego z dwóch splątanych kubitów natychmiastowo (niezależnie od odległości) ustala stan drugiego z nich. W przypadku stanów Φ pomiary spinów A i B wykonane w tym samym kierunku dadzą ten sam wynik, a w przypadku stanów Ψ dostaniemy przeciwne wartości.

Gdyby stany Bella odnieść do stanu układu dwóch splątanych fotonów, to stan $|0\rangle$ możemy przypisać np. polaryzacji pionowej, a stan $|1\rangle$ polaryzacji poziomej

$$|0\rangle \equiv |\uparrow\rangle \quad \text{ i } \quad |1\rangle \equiv |\rightarrow\rangle.$$

Pomiar polaryzacji fotonów, wykaże te same polaryzacje, gdy układ kubitów był w jednym ze stanów Φ . W przypadku stanów Ψ , gdy pomiar wykaże polaryzację pionową jednego z fotonów, to drugi będzie miał polaryzację poziomą i *vice versa*.

Zrozumienie stanów Bella jest ważne w zrozumieniu między innymi zjawiska teleportacji kwantowej.

Teleportacja

Jednym z pierwszych artykułów poświęconych teleportacji kwantowej był artykuł Charlesa Bennetta i współpracowników z roku 1993. Początkowo autorzy chcieli opisać zjawisko nazwać teleferezą, ale Bennett nalegał, żeby nazwać je *teleportacją*. Bennett uważał, że taka nazwa będzie bardziej medialna i miał rację. Muszę jednak rozczarować fanów teleportacji jaką znamy z filmów science fiction takich jak np. Star Trek. Nie o taką teleportację tu chodzi. W teleportacji kwantowej nie mamy do czynienia ze znikaniem obiektu w jednym miejscu i pojawianiem się w innym. Teleportacja kwantowa polega na przeniesieniu stanu kwantowego jednego obiektu na inny znajdujący się

² Względna faza odpowiada za interferencję kwantową na przykład w eksperymencie z dwiema szczelinami [3].

³ Nazwa jest hołdem złożonym fizykowi Johnowi Stewartowi Bellowi, tego od nierówności Bella [2]

w dowolnej odległości o pierwszego. Wykorzystuje się tu zjawisko splątania kwantowego.

W wielu dziedzinach inżynierskich i naukowych, gdy w opisie jakiegoś protokołu lub systemu pojawia się dwójka uczestników myślowego eksperymentu posługujemy się imionami *Alicja* i *Bob*. Po raz pierwszy te dwie fikcyjne postaci pojawiły w artykule Rona Rivesta, Adiego Shamira i Leonarda Adlemana z 1978 roku „*A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-key Cryptosystems*”. Przy większej liczbie uczestników dodaje się inne imiona. Listę tych imion można znaleźć np. w Wikipedii [4].

Żalóżmy, że Alicja, chce przeteleportować Bobowi kubit C (stan kwantowy cząstki C), który jest w jej dyspozycji. Aby tego dokonać musimy najpierw dokonać splątania kwantowego dwóch innych cząstek A i B. Następnie przesyłamy cząstkę A do Alicji, a cząstkę B do Boba. Teraz Alicja dokonuje splątania swoich cząstek A i C, a ponieważ cząstka A jest jednocześnie splątana z cząstką B, to otrzymujemy układ trzech splątanych cząstek. Sytuacja zmienia się, gdy Alicja wykona pomiar stanu cząstek A i C, ale nie pomiar indywidualnych cech każdej z nich tylko cechy wspólnej układu cząstek A i C, czyli ich stanu Bella.

W wyniku tego pomiaru stan cząstek A i C z jednakowym prawdopodobieństwem równym $\frac{1}{4}$ przejdzie w jeden z czterech stanów Bella ($|\Phi^+\rangle, |\Phi^-\rangle, |\Psi^+\rangle, |\Psi^-\rangle$). Jednocześnie, wykonanie tego pomiaru spowoduje natychmiastową zmianę stanu cząstki B jaką ma Bob. Cząstka Boba przestanie być w stanie splątanym z cząstką A i przyjmie teraz albo dokładnie ten stan, jaki miała cząstka C przed splątaniem jej z cząstką A, albo jeden z trzech innych możliwych stanów które łatwo można zmodyfikować, aby ostatecznie uzyskać stan, jaki wcześniej miała cząstka C. Teleportacja następuje natychmiastowo, ale Bob nie wie, która z czterech możliwości zaistniała. Musi poczekać na informację od Alicji, która poinformuje go, w którym z czterech możliwych stanów Bella znalazł się jej układ AC po pomiarze. Tę informację Alicja musi przesłać zwykłym kanałem informacyjnym. Dopiero po odebraniu tej informacji Bob będzie mógł wykonać odpowiednią transformację swojego kubitów B (lub w jednym przypadku na cztery nie wykonywać żadnej), aby jego kubit stał się kopią kubitów C sprzed operacji Alicji. Ponieważ ten etap procesu wymaga przesłania informacji tradycyjną drogą, to proces teleportacji kwantowej nie może być wykorzystany do przesyłania informacji z szybkością większą niż szybkość światła w próżni.

Zgodnie z mechaniką kwantową niemożliwe jest klonowanie nieznanego stanu kwantowego. Mówi o tym twierdzenie nazywane *twierdzeniem o zakazie klonowania* udowodnione w roku 1982 przez Williama Woottersa i Wojciecha Żurka z Los Alamos National Laboratory. Gdyby możliwe było klonowanie stanów kwantowych, moglibyśmy obejść zasadę nieoznaczoności Heisenberga. Zauważmy, że teleportacja kwantowa nie narusza twierdzenia o zakazie klonowania. Nie dostaliśmy dwóch identycznych kubitów. Co prawda po teleportacji cząstka B jest w stanie takim, jaki miała cząstka C na początku procesu, ale w wyniku pomiaru wykonanego przez Alicję stan układu AC został zrzucony na jeden z czterech

możliwych stanów Bella i obie cząstki znajdują się teraz w stanie maksymalnie splątanym. Cząstka C „zapomina” w jakim była stanie, teraz jest w nieokreślonym stanie podobnie jak cząstka A, z którą została splątana. Wiadomo tylko, że obie tworzą układ np. singletowy

Schemat teleportacji, jaki przedstawiłem powyżej nie jest jedynym możliwym. Bardzo często stosowany jest inny protokół. Tak samo jak poprzednio mamy trzy kubity: dwa kubity splątane A i B oraz kubit C, który chcemy skopiować. W tej wersji Alicja musi najpierw przygotować swoje kubity do pomiaru. W pierwszej fazie doprowadza do splątania kubitów A i C używając bramki CNOT (bramkami kwantowymi zajmę się w następnej części artykułu). W kolejnym kroku przepuszcza kubit C przez bramkę Hadamarda. Wreszcie przeprowadza pomiar, ale nie w bazie Bella, jak było w poprzedniej wersji, lecz w bazie standardowej. I tak jak poprzednio przesyła wynik swojego pomiaru Bobowi. A jej wynik pomiaru wskazuje na jeden z czterech stanów $|00\rangle, |01\rangle, |10\rangle$ lub $|11\rangle$.

Podkreślmy jeszcze raz, że cząstka Alicji nie jest fizycznie przesyłana do Boba, przenoszony jest jedynie stan z jednej cząstki na drugą. Nie towarzyszy temu ani transfer materii, ani energii.

Teleportacja (opis formalny)

Żalóżmy, że kubit, który Alicja chce przeteleportować do Boba znajduje się w stanie

$$|\psi\rangle_C = \alpha|0\rangle_C + \beta|1\rangle_C.$$

Żaś kubity A i B są w stanie maksymalnego splątania, który jest znany zarówno Alicji, jak i Bobowi. Może to być jeden z czterech możliwych stanów Bella. Żalóżmy, że jest to stan

$$|\Phi^+\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B).$$

Stan układu kubitów A, B, C jest iloczynem tensorowym

$$|\psi\rangle_C|\Phi^+\rangle_{AB} = (\alpha|0\rangle_C + \beta|1\rangle_C) \left(\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A|0\rangle_B + |1\rangle_A|1\rangle_B) \right).$$

Rozwińmy powyższe wyrażenie, a następnie zapiszmy iloczyn tensorowy stanów bazowych kubitów C i A w bazie Bella, korzystając z tego, że

$$|0\rangle_C|0\rangle_A = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Phi^+\rangle_{CA} + |\Phi^-\rangle_{CA}),$$

$$|0\rangle_C|1\rangle_A = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi^+\rangle_{CA} + |\Psi^-\rangle_{CA}),$$

$$|1\rangle_C|0\rangle_A = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Psi^+\rangle_{CA} - |\Psi^-\rangle_{CA}),$$

$$|1\rangle_C|1\rangle_A = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\Phi^+\rangle_{CA} - |\Phi^-\rangle_{CA}).$$

Po wykonaniu tych operacji stan kubitów A, B, C możemy zapisać w postaci

$$\begin{aligned}
|\psi\rangle_C |\Phi^+\rangle_{AB} &= \frac{1}{2} |\Phi^+\rangle_{CA} (\alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B) \\
&+ \frac{1}{2} |\Phi^-\rangle_{CA} (\alpha|0\rangle_B - \beta|1\rangle_B) \\
&+ \frac{1}{2} |\Psi^+\rangle_{CA} (\alpha|1\rangle_B + \beta|0\rangle_B) \\
&+ \frac{1}{2} |\Psi^-\rangle_{CA} (\alpha|1\rangle_B - \beta|0\rangle_B).
\end{aligned}$$

Podkreślmy, że na razie niczego nie zmieniliśmy, mamy ten sam stan co poprzednio tylko zapisany w innej bazie. Teleportacja kubitów A i C nastąpi wtedy, gdy Alicja dokona pomiaru stanu kubitów A i C w bazie Bella. W wyniku tego pomiaru stan kubitów A, B, C dozna kolapsu do jednego z czterech możliwych stanów:

$$\begin{aligned}
&|\Phi^+\rangle_{CA} (\alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B), \quad |\Phi^-\rangle_{CA} (\alpha|0\rangle_B - \beta|1\rangle_B), \\
&|\Psi^+\rangle_{CA} (\alpha|1\rangle_B + \beta|0\rangle_B), \quad |\Psi^-\rangle_{CA} (\alpha|1\rangle_B - \beta|0\rangle_B).
\end{aligned}$$

Prawdopodobieństwo każdej z tych czterech sytuacji jest jednakowe i wynosi $\frac{1}{4}$. Jak widzimy kubit Alicji A i C są teraz splątane, a pierwotne splątanie kubitów A i B zostało przerwane. Kubit B znajduje się w stanie, który jest albo dokładnie stanem kubit C sprzed teleportacji (pierwsza z powyższych sytuacji), albo w stanie, który Bob może łatwo przekształcić w stan początkowy kubit C. Ale Bob nie będzie wiedział co ma zrobić ze swoim kubitem, dopóki nie otrzyma od Alicji informacji o wyniku jej pomiaru. Tę informację Alicja musi wysłać klasycznym kanałem komunikacji. Jeśli Alicja przekaże Bobowi informację, że jej kubit po pomiarze znalazł się w stanie $|\Phi^+\rangle_{CA}$, to Bob nie musi niczego robić ze swoim kubitem. Jest on już w stanie początkowym kubit C. Jeśli Alicja wskaże, że jej wynik pomiaru to $|\Phi^-\rangle_{CA}$, Bob będzie musiał dokonać obrotu swojego kubit na sferze Blocha o kąt π wokół osi X. Gdy wiadomość Alicji wskazuje na stan $|\Psi^+\rangle_{CA}$, to Bob obróci kubit B na sferze Blocha o kąt π wokół osi Y. Wreszcie, gdy Alicja przekaże informację odpowiadającą stanowi $|\Psi^-\rangle_{CA}$, Bob obróci kubit B na sferze Blocha o kąt π wokół osi Z. Do tych operacji użyje odpowiednich bramek kwantowych.

Nie jest to jedyny przepis na teleportację. Częściej przedstawia się inną wersję protokołu teleportacji. Założmy jak poprzednio, że kubit, który Alicja chce przeteleportować do Boba znajduje się w stanie

$$|\psi\rangle_C = \alpha|0\rangle_C + \beta|1\rangle_C,$$

a splątane kubit A i B są w stanie danym wyrażeniem

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_A |0\rangle_B + |1\rangle_A |1\rangle_B).$$

Stan początkowy układu trzech kubitów A, B, C ma postać

$$\begin{aligned}
&\frac{\alpha}{\sqrt{2}} |0\rangle_C |0\rangle_A |0\rangle_B + \frac{\beta}{\sqrt{2}} |1\rangle_C |0\rangle_A |0\rangle_B \\
&+ \frac{\alpha}{\sqrt{2}} |0\rangle_C |1\rangle_A |1\rangle_B + \frac{\beta}{\sqrt{2}} |1\rangle_C |1\rangle_A |1\rangle_B.
\end{aligned}$$

Teraz Alicja tworzy splątanie kubitów A i C za pomocą bramki CNOT. Po tej operacji stan kubitów A, B, C będzie następujący

$$\begin{aligned}
&\frac{\alpha}{\sqrt{2}} |0\rangle_C |0\rangle_A |0\rangle_B + \frac{\beta}{\sqrt{2}} |1\rangle_C |1\rangle_A |0\rangle_B \\
&+ \frac{\alpha}{\sqrt{2}} |0\rangle_C |1\rangle_A |1\rangle_B + \frac{\beta}{\sqrt{2}} |1\rangle_C |0\rangle_A |1\rangle_B.
\end{aligned}$$

Kolejnym krokiem protokołu jest przekształcenie stanu kubit C za pomocą bramki Hadamarda. Po tej operacji stan kubitów A, B, C przyjmie postać

$$\begin{aligned}
&\frac{\alpha}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_C + |1\rangle_C) |0\rangle_A |0\rangle_B \\
&+ \frac{\beta}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_C - |1\rangle_C) |1\rangle_A |0\rangle_B \\
&+ \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_C + |1\rangle_C) |1\rangle_A |1\rangle_B \\
&+ \frac{\beta}{\sqrt{2}} \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_C - |1\rangle_C) |0\rangle_A |1\rangle_B.
\end{aligned}$$

Powyższe wyrażenie możemy przekształcić do następującej postaci

$$\begin{aligned}
&\frac{1}{2} |0\rangle_C |0\rangle_A (\alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B) + \frac{1}{2} |0\rangle_C |1\rangle_A (\alpha|1\rangle_B + \beta|0\rangle_B) \\
&+ \frac{1}{2} |1\rangle_C |0\rangle_A (\alpha|0\rangle_B - \beta|1\rangle_B) + \frac{1}{2} |1\rangle_C |1\rangle_A (\alpha|1\rangle_B - \beta|0\rangle_B).
\end{aligned}$$

Po takim przygotowaniu swoich kubitów A i C Alicja wykonuje pomiar ich stanu, ale tym razem nie w bazie Bella, jak było w poprzedniej wersji, lecz w bazie standardowej ($|0\rangle_C |0\rangle_A, |0\rangle_C |1\rangle_A, |1\rangle_C |0\rangle_A, |1\rangle_C |1\rangle_A$). W wyniku tego pomiaru stan układu A, B, C kolapsuje do jednego z czterech możliwych stanów

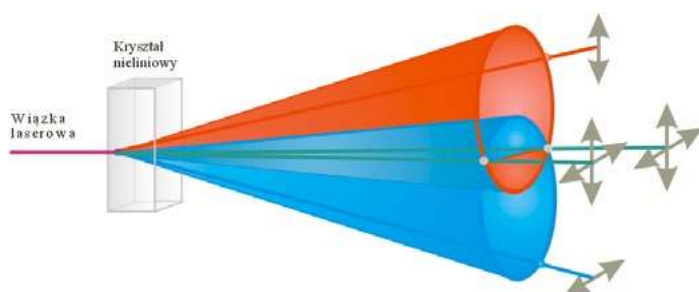
$$\begin{aligned}
&|0\rangle_C |0\rangle_A (\alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B), \\
&|0\rangle_C |1\rangle_A (\alpha|1\rangle_B + \beta|0\rangle_B), \\
&|1\rangle_C |0\rangle_A (\alpha|0\rangle_B - \beta|1\rangle_B), \\
&|1\rangle_C |1\rangle_A (\alpha|1\rangle_B - \beta|0\rangle_B).
\end{aligned}$$

Dalsza procedura jest taka jak poprzednio: Alicja przesyła Bobowi informację o stanie kubitów A i C, a Bob wykonuje odpowiednią operację na swoim kubicie lub nie wykonuje żadnej operacji, jeśli dostanie od Alicji wynik $|0\rangle_C |0\rangle_A$.

Eksperyment grupy Zeilingera

Pierwszej teleportacji kwantowej dokonała grupa austriackich fizyków pod kierunkiem Antona Zeilingera w 1997 roku [5]. Dokonali oni teleportacji stanu polaryzacji fotonu według pierwszego z dwóch przepisów opisanych powyżej. W pierwszym kroku przygotowywana była para splątanych fotonów A i B, z których pierwszy był przesyłany do Alicji, a drugi do Boba.

W poprzedniej części cyklu opisywałem doświadczenie Aspecta ze splątanymi fotonami. W tamtym



Rysunek 2. Przemiana fotonu ultrafioletowego na dwa fotony o mniejszej energii na kryształ nieliniowym. Fotony mają przeciwną polaryzację – pionową (czerwony stożek) i poziomą (niebieski stożek). Jeśli fotony poruszają się wzdłuż linii przecięcia stożków (zielone linie) to żaden z nich nie ma określonej polaryzacji, ale ich względne polaryzacje są wzajemnie prostopadłe. Fotony są wówczas splątane. Kolory na rysunku nie odpowiadają kolorom światła a tym samym energiiom fotonów.

doświadczeniu splątane fotony otrzymywano wykorzystując tzw. kaskadową emisję fotonów emitowanych przez odpowiednio przygotowywane atomy wapnia. Zeilinger użył innej metody wytwarzania par splątanych fotonów. Wykorzystał własności kryształu beta boranu baru. Kryształ ten należy do tzw. kryształów nieliniowych. Oświetlając taki kryształ światłem ultrafioletowym od czasu do czasu obserwuje się zjawisko przemiany fotonu ultrafioletowego w dwa fotony o niższej energii (mniejszej częstotliwości). Jeden z nich jest spolaryzowany pionowo, a drugi poziomo. Mogą one biec po powierzchniach stożków pokazanych na rysunku 2.

Jeśli oba poruszają się wzdłuż linii przecięcia stożków, to stają się nierozróżnialne i ich polaryzacja przestaje być określona. Wiadomo jedynie, że ich polaryzacje są wzajemnie prostopadłe (komplementarne). Dostajemy w ten sposób parę splątanych fotonów w stanie Bella $|\Psi^+\rangle_{AB}$ lub $|\Psi^-\rangle_{AB}$. Kryształ beta boranu baru jest oświetlany krótkim impulsem światła ultrafioletowego. Te z fotonów impulsu, które nie przemieniły się w fotony o niższej energii odbijają się od zwierciadła i padają z powrotem na kryształ. I znowu może dojść do przemiany na dwa fotony C i D o niższej energii. Foton C trafia do detektora. Impuls tego detektora sygnalizuje, że foton D jest gotowy do teleportacji. Kierujemy go na polaryzator, który możemy dowolnie zorientować i otrzymujemy w ten sposób foton, którego stan przeteleportujemy do Boba. Jego stan jest inny niż przed przejściem przez polaryzator, dlatego zmienimy jego nazwę, nazwijmy go fotonem X. Teraz pojawia się problem, musimy dokonać splątania fotonów A i X i zmierzyć ich stan, ale nie mierząc oddzielnie ich stanów polaryzacji, lecz ich stan Bella. Po tej operacji fotony A i B przestaną być splątane, splątane zostaną fotony A i X, a stan polaryzacji fotonu X sprzed tego pomiaru przeniesie się na foton B w $\frac{1}{4}$ przypadków (lub w jeden z trzech innych stanów, jak opisywałem wyżej).

Do splątania fotonów A i X Zeilinger i jego współpracownicy wykorzystali zwierciadło półprzepuszczalne, które w 50% przepuszcza światło, a w 50% odbija je. Jeśli pojedynczy foton pada na to zwierciadło, to nie jest tak jak podpowiada nam intuicja, że foton albo się odbije, albo przejdzie przez zwierciadło. Foton nie wybiera jednej konkretnej drogi, lecz wchodzi w stan superpozycji

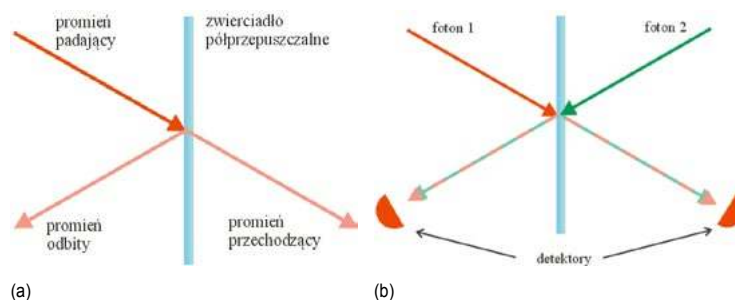
z oboma stanami – stanem po przejściu i stanem po odbiciu (patrz rysunek 3 (a), wróć do tego w następnej części cyklu). Fotony A i X kierowano na przeciwległe strony zwierciadła w taki sposób, żeby kierunek fotonu odbitego pokrywał się z kierunkiem fotonu przechodzącego i odwrotnie (patrz rysunek 3 (b)).

Jeśli oba fotony są nierozróżnialne i docierają do zwierciadła (po jego obu stronach) jednocześnie, to dochodzi do kwantowej interferencji. Niektóre spośród stanów końcowych znoszą się i nie występują wcale, a inne wzmacniają się i występują częściej. Wskutek zaistniałej interferencji fotony mają tylko 25% szansy, aby dotrzeć do obu detektorów (rysunek 3 (b)) i nie jesteśmy w stanie stwierdzić, czy oba przeszły przez zwierciadło, czy oba się odbiły. Odpowiada to jednemu z czterech stanów Bella.

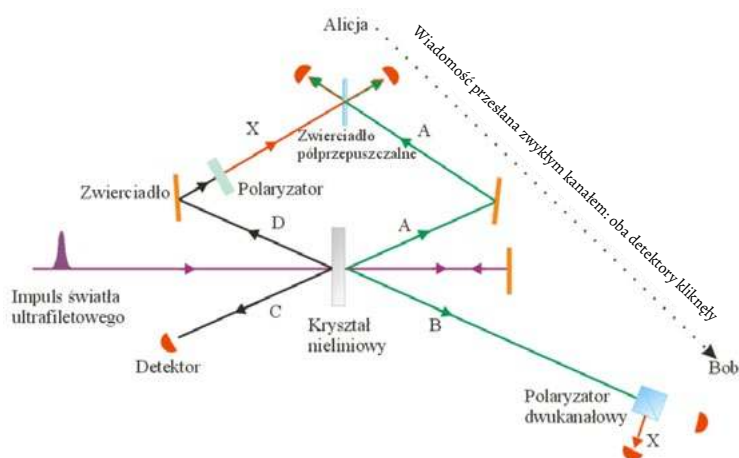
W pozostałych 75% przypadków fotony trafiają tylko do jednego z detektorów, co odpowiada trzem pozostałym stanom Bella, ale niestety nie da się ich odróżnić. Ponieważ w tych przypadkach nie jesteśmy w stanie wskazać, któremu z trzech pozostałych stanów Bella odpowiada te przypadki, to Bob nie będzie wiedział co zrobić ze swoim fotonem, żeby zmienić stan swojego fotonu na stan fotonu X. Dlatego w tym doświadczeniu o skutecznej teleportacji możemy mówić jedynie wtedy, gdy oba detektory Alicji zarejestrują fotony. Gdy Alicja poinformuje Boba, że taka sytuacja miała miejsce, to Bob może sprawdzić polaryzację swojego fotonu i przekonać się, że jest ona taka, jaką miał foton X (po przejściu przez polaryzator). Schemat eksperymentu Zeilingera przedstawia rysunek 4.

Pierwsze doświadczenia Zeilingera i jego grupy nie były doskonałe, taką samą polaryzację obu fotonów odnotowano w 80% przypadków, ale zauważmy, że bez teleportacji polaryzacja fotonów byłaby jednakowa tylko w 50% przypadków. Doświadczenie powtarzano wielokrotnie dla różnych polaryzacji: pionowej, poziomej, liniowej z kątem 45° , a nawet polaryzacji kołowej. Za każdym razem potwierdzano, że doszło do teleportacji.

Jak pisze Zeilinger [5], najtrudniejszym aspektem doświadczenia było uczynienie fotonów A i X nierozróżnialnymi. Zauważmy, że nawet czas przybycia fotonów mógłby je odróżnić. Aby maksymalnie wymazać tę informację skorzystano z pomysłu zaproponowanego przez polskiego fizyka Marka Żurkowskiego z Uniwersytetu Gdańskiego.



Rysunek 3. (a) Zwierciadło półprzepuszczalne. 50% światła przechodzi, a 50% odbija się. (b) Dwa fotony padają z obu stron zwierciadła półprzepuszczalnego w tym samym czasie. Każdy z fotonów jest w superpozycji stanów „przejście”, „odbicie”. Odbita i przepuszczona część obu fotonów interferują ze sobą i fotony tracą tożsamość – tworzą parę splątanych fotonów. W 25% przypadków oba detektory zarejestrują fotony, ale nie jesteśmy w stanie stwierdzić, czy oba zostały odbite, czy oba przeszły.



Rysunek 4. Schemat eksperymentu grupy Zeilingera (teleportacja stanu fotonu X).

Fotony przechodziły przez filtry, które przepuszczały fale w bardzo wąskim zakresie częstotliwości, a tym samym energii. Zgodnie z zasadą nieoznaczoności Heisenberga $\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar / 2$. A zatem skoro energia fotonów była określona bardzo dokładnie, to fotony ulegały rozmyciu w czasie.

Niektóre inne eksperymenty

Stopniowo zwiększano odległość, na której dokonywano teleportacji. W 2004 roku w Wiedniu przeprowadzono teleportację z wykorzystaniem światłowodu na odległość 600 metrów przez Dunaj. Następne rekordy odległości wynosiły: 16 kilometrów w wolnej przestrzeni (chiński zespół fizyków w 2010 roku), a potem 97 kilometrów. W 2012 roku grupa Zeilingera przeprowadziła udaną teleportację pomiędzy dwoma obserwatoriami astronomicznymi na Wyspach Kanaryjskich oddalonymi od siebie o 143 kilometry.

W 2017 roku chińskim fizykom udało się przeprowadzić teleportację stanu fotonu między laboratorium Ngari w Tybecie do satelity Micius. Satelita krąży na wysokości 500 km od powierzchni Ziemi i jego odległość od laboratorium zmienia się w zakresie od 500 km do 1400 km (biorąc pod uwagę pozycję, z których jest „widoczny” z laboratorium). Uzyskana wierność teleportacji wyniosła 0,80 z odchyleniem standardowym wynoszącym 0,01. Ten eksperyment stanowi poważny krok w kierunku budowy globalnego internetu kwantowego.

W 2004 roku, 7 lat po pierwszym eksperymencie Zeilingera z teleportacją stanu fotonów, po raz pierwszy dokonano teleportacji stanu kwantowego z jednego atomu na drugi [6]. Aktualnie fizycy potrafią już wykorzystywać teleportację kwantową do przesyłania informacji między chmurami atomów gazu, czyli makroskopowymi zespołami atomowymi [7]. W 2015 roku chińskim fizykom z uniwersytetu w Hefei pod kierownictwem Chao-Yang Lu i Jian-Wei Pan udało się przeteleportować za pomocą splątanych fotonów informacje z zespołu atomów rubidu do innego zespołu atomów rubidu na odległość 150 metrów [8].

Kluczowym wyzwaniem dla technologii i informatyki kwantowej jest realizacja niezawodnego transferu informacji kwantowych między rejestrami kubitów o jak

najdłuższym czasie życia. W 2014 roku holenderscy naukowcy ogłosili, że udało im się opracować niezawodny sposób przesyłania danych za pomocą teleportacji kwantowej [9]. Naukowcy wykorzystali dwa defekty w diamentach oddalonych od siebie o 3 m. Za pośrednictwem splątanych fotonów teleportowali stan spinowy jednego z tych defektów do drugiego. Pomiar stanu Bella w eksperymencie był w pełni deterministyczny. Oznacza to, że w każdej próbie osiągnęto teleportację, a średnia wierność przekazywanego stanu przekraczała klasyczną granicę. Przypomnę, że w opisanym wyżej doświadczeniu Zeilingera, tylko jeden z czterech stanów Bella mógł być określony, więc o skutecznej teleportacji można było mówić statystycznie w jednej próbie na cztery.

W 2018 roku w USA rozpoczęto instalację i uruchamianie testowego stanowiska FQNET (FermiLab Quantum NETwork). Lustrzane stanowisko testowe CQNET (Caltech Quantum NETwork) działa w Kalifornijskim Instytucie Technologicznym (Caltech). Celem badań jest stworzenie w pełni funkcjonalnej sieci kwantowej. W grudniu 2020 roku naukowcy pracujący w ramach projektu FQNET osiągnęli teleportację kwantową na łączną odległość 44 kilometrów z dokładnością przekraczającą 90% [10].

Podstawowymi elementami konstrukcyjnymi wszelkich urządzeń przetwarzających informacje począwszy od prostych maszyn, a skończywszy na komputerach są tzw. bramki logiczne. Realizują one proste funkcje logiczne np. alternatywę (OR), koniunkcję (AND), czy negację (NOT). Bramki logiczne operują na bitach i zwracają wartość również w postaci bitu. Informacja kwantowa zapisywana jest w postaci kubitów, potrzebujemy zatem zupełnie innego typu bramek logicznych – bramek operujących na kubitach i zwracających wartość w formie kubit. Takie bramki nazywamy bramkami kwantowymi. W opisie protokołu teleportacji wymieniałem nazwy dwóch z nich: bramka CNOT i bramka Hadamarda. Są to bramki niemające swoich odpowiedników w postaci klasycznych bramek logicznych. Bramkami kwantowymi zajmę się w następnej części artykułu.

dr Jan Kurzyk

Katedra Fizyki Politechniki Krakowskiej

LITERATURA

- [1] J. Kurzyk, *Za co Nobel. Część 1. Fizyka w Szkole* nr 1, 2023.
- [2] J. Kurzyk, *Za co Nobel. Część 2. Fizyka w Szkole* nr 2, 2023.
- [3] https://pl.wikipedia.org/wiki/Do%C5%9Bwiadczenie_Younga [Dostęp 30.03.2023].
- [4] https://pl.wikipedia.org/wiki/Alicja_i_Bob (dostęp 14.03.2023).
- [5] A. Kwantowa teleportacja, *Świat Nauki* nr 33, 2000 (tłum. Marek Demiański).
- [6] M. Riebe, H. Häffner, C. F. Roos, W. Hansel, i inni. *Deterministic quantum teleportation with atoms*. Nature. 429 (6993), s. 734–737, 2004.
- [7] <https://phys.org/news/2013-06-quantum-teleportation-atomic-distances.html> [Dostęp 07.04.2023].
- [8] Xi-Lin Wang, Cai Xin-Dong, Su Zu-En, Chen Ming-Cheng i inni. *Quantum teleportation of multiple degrees of freedom of a single photon*. Nature 518 (7540): 516–519.
- [9] W. Pfaff, B. J. Hensen, H. Bernien, S. B. Van Dam, M. S. Blok i inni. *Unconditional quantum teleportation between distant solid-state quantum bits*. Science 2014, vol. 345, Issue 6196 pp. 532–535.
- [10] Raju Valivarthi, Samantha I. Davis, Cristián Peña i inni *Teleportation Systems Toward a Quantum Internet*. PRX Quantum. 2020, 1 (2).

„Fiat Lux”

– od Witelona do tomografu optycznego

Interaktywne wystawy, głównie z fizyki, ale też z historii i ze sztuki mają wiele odmian [1]. Przedstawiamy Państwu naszą przedsięwzięcie, z trzech dziedzin łącznie. „Fiat Lux”, wystawa zasadniczo z optyki, ale też historii nauki i sztuki, powstała w Toruniu w 2008 roku, miała 20 edycji regionalnych i około 100 tysięcy zwiedzających. Czym zachwycała widzów, opisujemy w tekście.

Grzegorz Karwasz, Michał Kłosiński

Strzał w dziesiątkę

Interaktywne wystawy z fizyki wkrótce będą obchodzić w Polsce 25 lat. Nieco anegdotycznie opowiadamy (GK), że pierwsza przyjechała z Trydentu do Słupska w bagażniku prywatnego samochodu, zawierała 44 prostych eksponatów [2] i że na dwóch edycjach, w Warszawie i Słupsku zwiedziło ją w ciągu paru tygodni 10 tys. osób. Wystawa, zrealizowana we współpracy z ówczesnymi studentami Wyższej Szkoły Pedagogicznej w Słupsku doczekała się niezliczonych replik, kopii i klonów i stała się zaczątkiem interaktywnych muzeów nauki, jak Centrum Nauki Kopernik, które w pierwszym roku przyjęło milion zwiedzających [1]. Jak się to mówi - „strzał w dziesiątkę” a raczej właściwe rozeznanie bieżących potrzeb edukacyjnych. W samym tylko Słupsku powstało kilka prac magisterskich i licencjackich (i mnóstwo w innych ośrodkach) i dwa doktoraty z dydaktyki fizyki. Były one

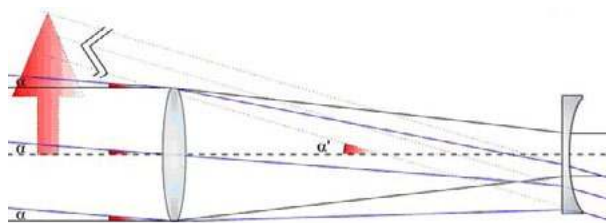
możliwe dzięki nowym treściom i formom jakie interaktywne wystawy z fizyki przyniosły.

W 2007 roku, już w Toruniu, powstała wystawa-tunel dydaktyczny „Z górki na pazurki”, czyli wariacje na temat równi Galileusza, opisana w poprzednim artykule [3]. Ale Toruń, miasto rodzinne Kopernika, domagało się wystawy na pograniczu astronomii, fizyki i historii nauki. Tematem przewodnim stała się optyka, wówczas jedna z wiodących specjalności naukowych Instytutu Fizyki UMK. I tak, we współpracy z Muzeum Okręgowym w Toruniu powstała wystawa „Fiat Lux! – czyli zabawy ze światłem”. Podtytuł mówił: „Od Witelona do tomografu optycznego” i nawiązywał do dzieła średniowiecznego uczonego, Witelona. Jego traktat z optyki, „Perspektywy” używany był jeszcze przez Keplera. W ten sposób, mogliśmy nawiązać i do Kopernika, który nie używał jeszcze lunety, i do Newtona, który zbudował teleskop z wklęsłego zwierciadła, jak to używane w domowej łazience do oglądania własnej twarzy.

Ta podwójna forma wystawy – zasadniczo składająca się z eksponatów, z bardzo krótkimi opisami, ale wzbogacona



Fot. 1. Stosunkowo niewielka ale wyjątkowa w swym wnętrzu, sala Ratusza Staromiejskiego w Toruniu była miejscem powstania wystawy „Fiat Lux”. Część eksponatów interaktywnych była udostępniona na stołach, inne, te do oglądania z właściwej strony – zamknięte w szklanych prostopadłościanach i szafach. Na stojaku umieściliśmy „trójwymiarowe” pocztówki. W centrum teleskop Newtona celujący w wiszący pod sufitem obraz Księżyca oraz astrolabium Kopernika, jako element dekoracji. Po prawej stronie dwie duże soczewki na ławie optycznej, dla zabaw (i nauki) z oglądaniem twarzy kolegów (eksponat wzorowany na Science Museum w Londynie, tylko że tańszy). Foto K. Służewski (ZDF UMK).



Fot. 2. (a) Wyplatanka indiańska z Brazylii, oddająca siedem kolorów tęczy, ale w pomylonej kolejności. (b) Bieg promieni w lunecie Galileusza: luneta daje obraz pozorny, o powiększonych rozmiarach kątowych.

plakatai z dłuższymi wyjaśnieniami i dygresjami historycznymi, stanowiła o bogactwie dydaktycznym tego przedsięwzięcia. Wystawę, w ciągu pięciu lat i dwudziestu edycji w różnych muzeach regionalnych w Polsce zwiedziło około 100 tysięcy widzów. W skali wielkich centrów nauki może nie jest to wiele, ale „Fiat Lux” w Sosnowcu, Jarocinie, Rogoźnie, Pleszce była czymś niezwykłym.

Kurs optyki

Wystawa, mimo swej interdyscyplinarności – fizyka, historia nauki i sztuka, oddaje wszystkie treści niezbędne w kursie optyki, nawet tej na poziomie uniwersyteckim. I tak, już w pierwszym wydaniu, w Sali Ratusza Staromiejskiego w Toruniu, ustawiliśmy eksponaty w „gniazdach” tematycznych: optyka geometryczna, optyka falowa i zjawiska chromatyczne, czyli optyka kolorów. W tym ostatnim temacie, znalazły się nawet skarpetki w kolorowe paski, oddające niby tęczę, ale bardziej fantazję tkacza. Bo prawdziwą tęczę, choć nieco przestawioną, kupiliśmy, za jednego dolara, w formie wyplatanki, od starej Indianki na targu w Campinas, w Brazylii, fot. 2a.

Optyki geometrycznej możemy uczyć co najmniej w trojaki sposób: poprzez wykreślenie promieni charakterystycznych, poprzez równanie Newtona (ale trzeba pamiętać, kiedy obraz jest w odległości dodatniej, a kiedy w ujemnej) i poprzez doświadczenie: przysunąć do oka lupę, a następnie ją odsuwać i obserwować, jak zmienia się obraz. Ba! To właśnie codzienne doświadczenie pozwala „zakotwiczyć” w umyśle wiedzę, która w bez tego pozostaje czysto-teoretyczna, czyli jałowa. Dla doświad-

czeń z soczewkami ustawiliśmy ławę optyczną, zob. fot. 1, a także położyliśmy, niby „znieca” lupy na stołach z rekwizytami. Młodzież sama rozumie, do czego one służą.

Dydaktycznie prostsze jest zwierciadło niż soczewka. Wszyscy widzieli lusterko samochodowe (to zewnętrzne, fot. 3a) i wypukłe zwierciadła na skrzyżowaniach ciasnych uliczek (fot. 3b). Są one, jak już zauważyliśmy, wypukłe. A obraz domów czy innych samochodów nie może być nigdy odwrócony (jakieś by to miało konsekwencje dla ruchu ulicznego!). Ale lusterko, jak żartujemy, starszej siostry lub mamy w łazience już tak prosto nie działa: jeśli odsuniemy je na długość ramienia, obraz naszego nosa będzie odwrócony. Analogia między soczewką wypukłą a zwierciadłem wklęsłym jest natychmiastowa. A w szkolnej klasie na pewno któryś z uczniów jest krótkowidzem: jego okulary „pomniejszają” obraz.

Celowo zaczynamy konstruktywistyczne poznawanie od pojęcia nie-podręcznikowego. Bo to, podręcznikowe, jest właściwe, aby wychować kolejnych Newtonów, dając im kompetencje spójnej aksjomatycznie wiedzy, a nie kierowców samochodu, dając im kompetencje społeczne, że lusterko zewnętrzne „oddala” samochody nadjeżdżające z tyłu. Napis „Objects in this mirror are closer than they appear” przeczytaliśmy na lusterku, jadąc taksówką na lotnisko w Canberze, fot. 3a.

Kompetencje społeczne

W tzw. „sylabusach” (czyli programach nauczania), szczególnie na poziomie uniwersyteckim, pojawiły się tzw. kompetencje społeczne – w wielu przypadkach jako



Fot. 3. Fizyka jako umiejętność obserwacji świata: (a) lusterko samochodowe w taksówce w Australii. Napis ostrzega, że zwierciadło „pomniejsza” obiekty, lub innymi słowami czyni je pozornie dalszymi, niż są w rzeczywistości: fizyka uczy kompetencji społecznych. (b) Podobne zwierciadło wypukłe na skrzyżowaniu ulic w Sopocie. Nie jest ono dokładnie sferyczne, co widać po zniekształceniu obrazu w dolnym lewym rogu. Foto M. Karwasz.

przeczytane, przetłumaczone, ale bez zrozumienia. Pisa-
liśmy już o tym, nieco ironicznie: 1) wiedza – uczeń zna
prawa Newtona, 2) umiejętności – uczeń rozumie prawa
Newtona, 3) kompetencje społeczne – uczeń stosuje prawa
Newtona (oczywiście, bo jak by nie stosował np. prawa
tarcia, to by ani jednego kroku własną nogą nie uczynił!).
Takie podejście oczywiście, deprecjonuje fizykę i znie-
chęca ucznia: jak pisał już Komeński w 1657 roku, należy
uczyć tylko tego, co jest pożyteczne. Innymi słowy – do-
póki uczeń nie będzie przekonany, że określonej wiedzy
on sam potrzebuje, nie ma co próbować zaczynać tematu.

Kawałkami stopionego szkła na pewno bawiły się już
dzieci w starożytnym Egipcie (tam nauczono się doda-
wać popiół do piasku, aby obniżyć temperaturę topnienia
tego rodzaju mieszaniny). Ale do skonstruowania lunety
przez Galileusza (i chyba jednocześnie kilku innych jego
naukowych konkurentów) a mikroskopu przez Antoniego
Leeuwenhoek¹ minęły tysiąclecia. I znów dygresja: dy-
daktyka to nie jest nauka o nauczaniu, jak tautologicznie
tłumaczą z greki podręczniki, ale umiejętność identyfika-
cji zasadniczych punktów – trudności w procesie dydak-
tycznym.



Fot. 4. Interdyscyplinarny plakat pt. „Witelon” (autor MK): życiorys uczonego, Paryż i Wrocław w XIV wieku, odkrycia, prace filozoficzne, rysunek anatomiczny oka, kopia pierwszego wydania drukiem (1535 r.) „Perspektywy” a w dolnym lewym rogu, foto prof. Bielskiego, który prace Witelona przybliżył współczesnemu czytelnikowi.

¹ Historycy nauki przypisują pierwszy mikroskop innemu Holendrowi, Jansenowi, około 1570 roku. Leeuwenhoek był bogatym kupcem, który zabawił się nauką. Kiedyś postanowił sprawdzić, dlaczego pieprz piecze: podejrzewał, że ma on małe haczyki, które wczepiają się w język. Rozrobił pieprz w wodzie, ale inne obowiązki uniemożliwiły mu obserwację. Kiedy po paru dniach spojrział w mikroskop, ujrzał mnóstwo małych żyłtek – bakterii. Tak zaczęła się mikro-biologia. A haczyki w pieprzu, dodajemy (GK) żartobliwie, nadal czekają na odkrywcę.

Lunety można konstruować na różne (zasadniczo dwa)
sposoby: te do oglądania statków na morzu nie mogą od-
wracać obrazu. I tak Galileusz zarobił fortunę, sprzedając
weneckim dożom nadzwyczajne urządzenie do obserwa-
cji floty wroga (Uniwersytet w Padwie, gdzie w 1600 roku
Galileusz objął katedrę matematyki, przynależał do Re-
publiki Weneckiej). Luneta składała się z jednej soczew-
ki wypukłej i drugiej, tej przy oku – wklęsłej, ryc. 2b.
Soczewkę przy oku podręczniki nazywają „okulem”,
prawda? Luneta nie musi dawać obrazu rzeczywistego,
jako że oglądamy własnym okiem: ona powiększa roz-
miary *kątowe*.

Luneta do obserwacji gwiazd może obraz odwracać, tak
więc Kepler zastosował dwie soczewki wypukłe. A He-
weliusz, Gdańszczanin, którego mapy Księżyca wyko-
rzystywano jeszcze w trakcie przygotowań do lądowania
Apollo, zbudował lunetę ° długości, podobno, 30 metrów.
Znajomość szczegółowa biegu promieni w lunecie nie jest
niezbędna w życiu codziennym, ale wspomniana własność
lusterka samochodowego (ale tylko tego zewnętrznego)
do „oddalania” obiektów – jest już kompetencją społeczną
(po to, aby nie wejść w kolizję z innym kierowcą).



Fot. 5. Plakat „Kopernik, Galileusz, Kepler, Newton” przypomina różne konstrukcje
lunet, a przy okazji pokazuje piękne zdjęcia astronomiczne z teleskopu Hubble’a.
W górnym rogu dwie (prawie) oryginalne lunety Galileusza, z Muzeum Nauki we Flo-
rencji. Autorka: Grażyna Drązkowska (UMK)



Fot. 6. (a) Portret fotoreporterki wystawy, zamknięty w sześcianie ze szkła: niezależnie, czy oglądany z przodu czy z tyłu, robi wrażenie trójwymiarowej twarzy. (b) Kot Schrödingera: trochę z profilu, trochę en face. Foto K. Służewski, IV 2008, Toruń.

Ni historyczna

Podwójny charakter – fizyczno-historyczny pozwolił na dwojaką organizację wystawy. W środku sali w postaci „gniazd tematycznych”: kwadratowych stołów z eksponatami ilustrującymi poszczególne działy optyki. Na ścianach – plakaty z historią odkryć, poczynając od dzieła Witelona (ok. 1237 - ok. 1300). Witelon (Vitelio, jak piszą Włosi), urodzony w Legnicy, deklarował się jako „syn Turynków i Polaków”; studiował w Paryżu i w Padwie a przebywał na dworze papieskim w Viterbo. Na dziedzińcu Uniwersytetu w Padwie jego wyimaginowany portret (powstały w 1944 roku) znajduje się wśród czterdziestu innych wybitnych uczonych. W „Perspektywie” Vitelio opisał prawa odbicia światła, podał schemat budowy oka, konstrukcję peryskopu. Wśród eksponatów, które odtworzyliśmy według wskazówek z jego dzieła są zwierciadła płaskie, sferyczne i cylindryczne, przyrząd do badania kątów rozchodzenia się światła i „cyrkiel” do kreślenia elips, zob. na ryc. 4.

Kolejne plakaty, oddające sens prac Witelona dotyczyły widzenia trójwymiarowego, ryc. 5, optycznych zjawisk w atmosferze oraz złudzeń optycznych. Każdy widz mógł znaleźć plakat zgodny z jego poziomem wiedzy i percepcji. Pisząc o lunetach – Galileusza, Keplera i Newtona, szkoda było pominąć Kopernika. Pomógł nam w tym młody Mickiewicz, pisząc „mędrca szkiełko i oko”. O właśnie! Kopernik nie używał lunety (pomyliło się to samemu Matejce, który w szkicu do swego obrazu rysował tę lunetę, ryc. 5), ale na Uniwersytecie w Wilnie, gdzie wykładowcami byli bracia Śniadeccy, luneta na pewno była na wyposażeniu tamtejszego Obserwatorium.

Trójwymiarowy kozioł

Eksponat dydaktyczny, nie tylko w nauczaniu fizyki, powstaje na dwa alternatywne sposoby: poszukujemy czegoś, co pozwoli nam na nauczanie określonej koncepcji, wzoru lub zjawiska. Dla spadku swobodnego będzie to

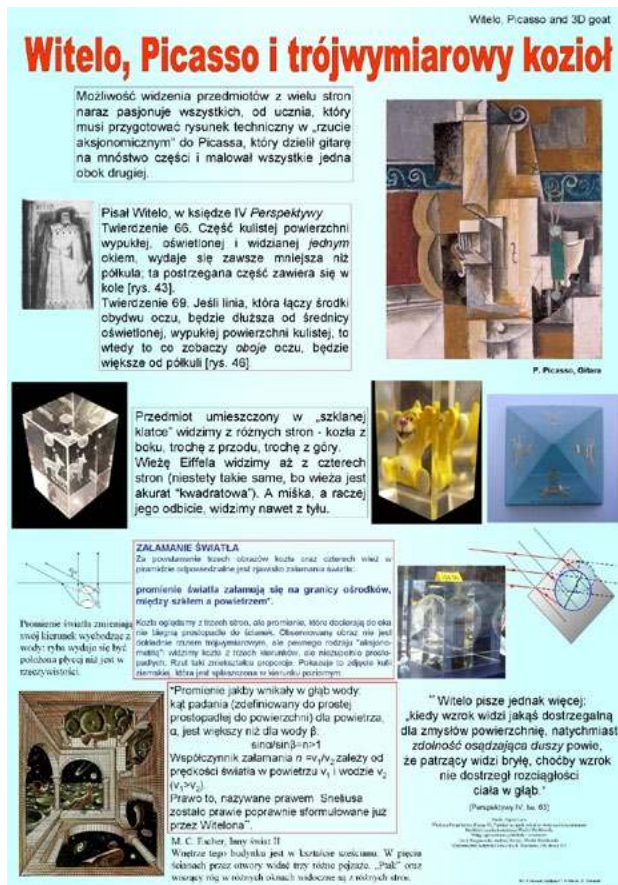
piłeczka kauczukowa i ping-pongowa, papierowe kubki z wodą, foremki z bibułki do wypieku ciasteczek, kartka zwinięta w formę spadochronu, dwa wózki o różnej masie na pochyłym stole itd.

Druga droga zaczyna się od obiektu. Lat temu kilkanaście narodziły się lasery dużej mocy (tzw. ekscymery), które pozwoliły na tworzenie we wnętrzu szklanych sześcianów trójwymiarowych wypalek. W Berlinie, za 55 euro, można było zamówić trójwymiarowy portret własnej twarzy. Kamery pod trzema różnymi kątami, po czym parę minut pracy komputera, a później cyk-cyk, seria impulsów laserowych i portret gotowy, ryc. 6a.

Zdumienie, które budzi ten eksponat wynika z faktu, że niezależnie, czy patrzymy z „właściwej” strony, czyli oglądamy wypukły profil twarzy, czy „do tyłu” – czyli widząc twarz wklęsłą, mamy wrażenie, że osoba wodzi za nas oczyma. Opisał to we fraszce wykładowej „Uśmiech kota bez kota” [4].

W sklepach z pamiątkami jest nadal mnóstwo tego rodzaju trójwymiarowych obrazów zamkniętych w bryle szkła, fot. 7. Czy można coś pokazać na lekcji fizyki? Bardzo dużo, i to skomplikowanych pojęć. Przede wszystkim zauważamy natychmiast, że kozła widać w trzech stron – poprzez trzy ściany prostopadłościanu. Tak! jest to wspinały przykład prawa załamania światła, a przy tym lekcja rysunku technicznego. Na każdej ścianie widzimy rzut trójwymiarowej bryły zamkniętej w szkło na tę ścianę: coś, co jest zmurą (a raczej było, przed powstaniem współczesnych programów komputerowych) studentów architektury.

Coś więcej? Tak! mechanika kwantowa. Każdy pomiar, nie tylko w świecie kwantów, jest „rzutowaniem” jakiejś skomplikowanej, wielowymiarowej rzeczywistości fizycznej na nasz układ pomiarowy. I tak, w zależności od eksperymentu, elektron jest cząstką, gdy kreśli obraz na ekranie kineskopu, albo falą w dyfrakcji w mikroskopie elektronowym Hitachi. Daleko idąca analogia z kotem Schrodingera zamkniętym w bryle szkła? To kolejna



Ryc. 7. Plakat „Trójwymiarowy kozioł” nawiązuje do Picassa i Witelona, ale jego tematem jest prawo załamania. Kozła widać z trzech projekcji, wieżę Eiffla w szklanej piramidzie z czterech stron, a miśka nawet z tyłu (obraz odbity od tylnej ścianki). Niektóre obiekty, kluczowe dla narracji dydaktycznej, jak kula ziemską zamkniętą w szklanym sześcianie są za drogą, więc pozostaje nam tylko ich zdjęcie, z wystawy w witrynie sklepowej w Mediolanie. Autor plakatu GK, współpraca dr Tomasz Wróblewski (Escher, *Inny świat II*)

potęgą myślenia kategoriami fizyka: wyobraźnia rzeczy niewyobrażalnych.

Coś więcej? Oczywiście! Pomost w kierunku sztuki. Dokładnie w okresie, kiedy powstawała mechanika kwantowa narodził się kubizm i dzieła Picassa. Przyglądając się jego „Gitarze”, ryc. 7, staje się jasne, że i on szukał przedstawienia na płaskim obrazie trójwymiarowego obiektu. Ta świadomość pomoże również w podziwianiu kubizmu: oglądamy gitarę kawałek po kawałku i w naszym umyśle tworzymy bryłę 3D.

I dalej? Bynajmniej! Witelon ujął to najpiękniej: „Kiedy oko nasze ogląda trójwymiarowy obiekt, to zdolność oceniająca duszy mówi nam, że jest to bryła, mimo że jej w całości nie widzimy”. Pięknie to ujmowano w średniowiecznej filozofii (od Anzelm z Canterbury): „zdolność wyobrażająca duszy”, a nie „złudzenie optyczne mózgu”. Oj, staliśmy się w międzyczasie strasznymi materialistami, nawet jeśli mówimy o ludzkiej osobowości.

Wrażliwość oka, nie tylko fizyka, na załamanie, odbicie, rozszczepienie światła czyni spacer przed witrynami sklepowymi intelektualną przygodą. Ciekawych obiektów jest nieskończenie wiele, nawet w sklepach z dewocjonaliami, fot. 8a.

Świat przez różowe okulary

Kolory okazały się szczególnie wdzięcznym tematem na wystawie „Fiat Lux”: jej interdyscyplinarny charakter pozwolił nam na szereg „wariacji”: każda z edycji wymagała innych aranżacji, a przez to też stwarzała nowe możliwości. Średniowieczna piwnica w Toruniu podkreślała tajemniczość dawnych wieków. W Gdańsku, w nowo-powstającym Centrum Nauki „Hevelianum” znaleźliśmy pełnię światła. Tak więc można było pokazać w całej krasie berlińskie wazy z rubinowego szkła „ekscytonowego” (tzn. zawierającego nanocząstki złota), kręcące się baki, obrazy post-impresjonistów, obok, wspomnianych już kolorowych skarpetek, foto 9.

Ale kolory równie dobrze można pokazać w ciemności, jak to ilustruje aranżacja z Legnicy, foto 10. Tam, w Muzeum Miedzi, dawnym kolegium dla szlachty protestanckiej, uczyniliśmy narrację bardziej dydaktyczną – pokazując w „szkolny” sposób syntezę kolorów: w TV poprzez sumowanie RGB, w druku – przez odejmowanie CMYK. Koncepcję kolorowych cieni, z wykorzystaniem trzech lamp RGB skopiowaliśmy (GK) z Science Museum w Canberrze.



Fot. 8. (a) Kolejne zabawy z prawem załamania: (chińska) Ostatnia Wieczera zamknięta w pół-pół-kuli szkła. Powierzchnia przednia jest wklęsła, więc oglądamy apostołów w pomniejszeniu, część górna – wypukła, więc twarze biesiadników są powiększone. (b) Zwierciadło sferyczne wypukłe nie odwraca obrazu, ale napisy są w nim „zwierciadlane”, jak w zwierciadle płaskim. Grudziądz, XII 2010, foto Maria Karwasz.

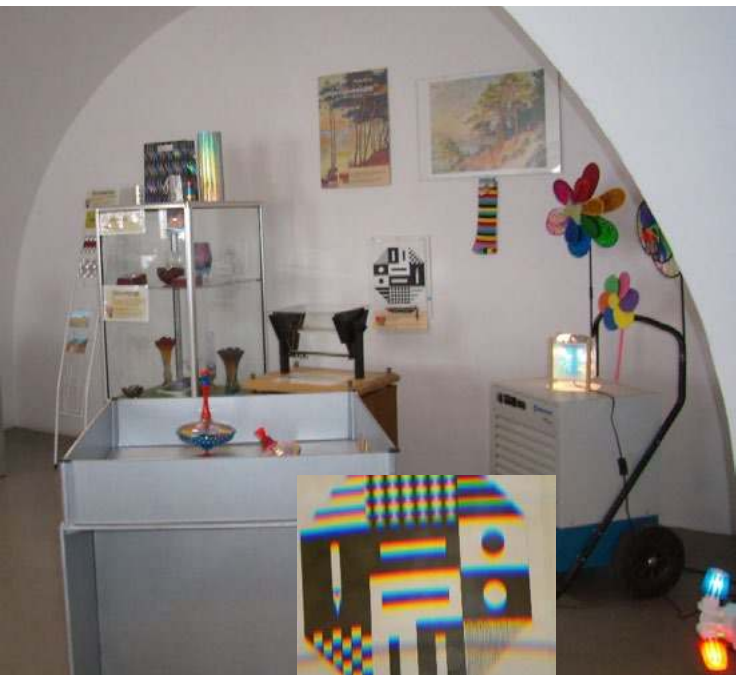


Foto 9. Pełnia światła w Centrum Nauki Hewelianum w Gdańsku pozwoliła na festiwal kolorów (od lewej): w wazach z berlińskiego, rubinowego szkła (z nanocząstkami złota), Goethego kolorowej „walce” czarnego z białym, obrazach impresjonistów, kolorowych skarpetkach, aż po trzy lampy RGB (w prawym dolnym rogu). Nasylenie kolorów oglądanych przez wodny pryzmat Goethego (wstawka na dole obrazu) zostało sztucznie powiększone. Pryzmat Goethego – eksponat dr J. Turlo. Foto Maria Karwasz.

Aż się w oczach kręci!

Wystawa było opowieścią historyczną i jednocześnie kursem optyki. Leczn jej adresatem była nie wycieczka szkolna, ale lokalny widz. Z tego też powodu musieliśmy tego widza zadziwić, zachwycić, oczarować. Aranżacje eksponatów były więc za każdym razem inne, w zależności od wielkości sal, oświetlenia, stołów i postumentów do dyspozycji.

Zbiory, gromadzone przez kilka lat, zawierały wszystko, co nam, w różnych miejscach świata „wpadło w oko”. W Berlinie, w barze w Muzeum Pergamonu zobaczyliśmy kubki z grubego, przezroczystego, kolorowego plastiku, oświetlone z boku, które wydawały się świecić na brzegach. Tak! Tak rzeczywiście działa światłowód: prowadzi światło do swojego (cienkiego) końca. Kubków berliń-

Fot. 11. (a) Zadany temat: światłowody. Oprócz gotowej „fontanny” ze światłowodów, uważny obserwator znajdzie mnóstwo ciekawych obiektów: etui CD, kubki, butelki, patyczki do koktajli. Efekt potęguje świetlówka UV. Foto w ciemności, z konieczności nieostry. Legnica, IX 2009. (b) Zabawy z kolorami powstającymi w bryłach Swarovskiego oglądanych pod różnymi kątami. W centrum mały kolorowy wazonik ze Słowenii. Edycja w Gdańsku, X 2008. Foto Maria Karwasz.

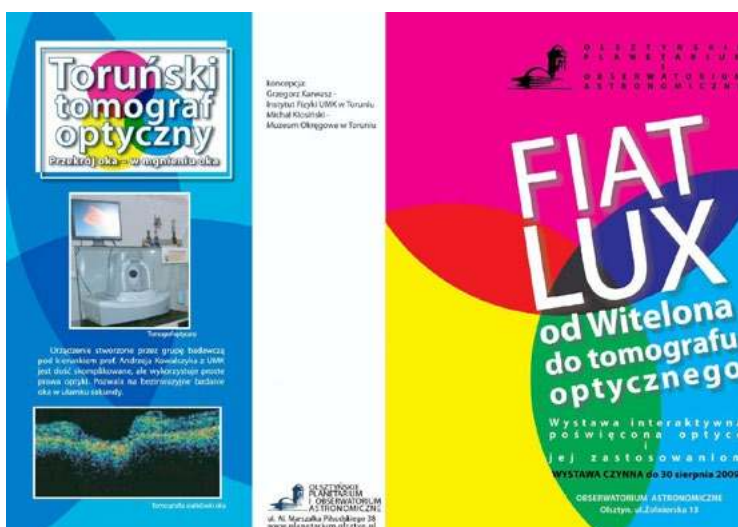


Fot. 10. Synteza kolorów. Sposób w 100% dydaktyczny to rzutnik do wykładów, z dwoma zestawami filtrów – do sumowania kolorów (obraz z lewej strony, wyżej) i ich odejmowania (obraz niżej). Po prawej o góry – kolorowe cienie – papugi wiszące pod sufitem a oświetlonej trzema kolorowymi lampami. W rogu pokoju „fontanna” światłowodów (powiększenie pokazane na wklejce) oraz figury Lisajoux z małego, laserowego rzutnika. Opisy umieszczono w ramach na ścianie. Legnica, wrzesień 2009, foto M. Karwasz.

skich nie udało się odkupić, ale „po drodze” do wystawy, znaleźliśmy wiele podobnych eksponatów: połamaną podstawkę pod opis ceny we Włoszech, kolorowe etui na CD, zielony kubek, itd., zob. fot. 11a. Dodatkowo, polistyren użyty do ich wytworzenia został zabarwiony kolorami „fluorescencyjnymi”, tzn. takimi, które absorbują w szerokim zakresie widma a emitują określony kolor (jak w samochodowych kamizelkach). Kubki i etui oświetlone z boku, odświeglają na brzegach.

„Wynalazkiem” optycznym ostatnich lat jest też tzw. biżuteria Swarovskiego. W Wenecji można kupić duże piramidy lub wielopłaszczyznowe quasi-kule. Kolor brązowy, wiśniowy, różowy, widoczne w piramidach „Swarovskiego” nie mogą powstawać w wyniku prostego załamania światła: są one wynikiem sumowania





Fot. 12.

dwóch lub trzech kolorów odbitych od (interferencyjnego) zwierciadła na spodzie piramidy, zob. szczegółowy opis [5]. Te i inne zabawy dały nam najlepszą recenzję „Fiat Lux!”. Starszy, prosto ubrany mężczyzna zaczął nas wychodząc z wystawy w Gdańsku: „Panie! Tam to się aż w oczach kręci!”

Z Witelonem po kraju

Wystawa miała, jak wspomniano, 20 edycji, poczynając od Muzeum Okręgowego w Toruniu, Planetarium w Olsztynie i Centrum Nauki „Hevelianum” w Gdańsku. Ale prawdziwym odkryciem okazała się „eksploatacja” powiatowych miasteczek z ich regionalnymi muzeami. W Sosnowcu znaleźliśmy unikalne na skalę światową muzeum wzornictwa szkła, którego nie powstydziliby się Wenecja: za czasów „gospodarki planowej” wszelkie prototypy szklanych wazonów, kielichów, misek trafiały do tamtejszego byłego dworku niemieckiego przemysłowca Schoena. Kolekcja unikalna na skalę światową.

W Legnicy odkryliśmy niedoszłą stolicę Polski, z nagrobkiem ostatniego Piasta, Jerzego Wilhelma IV, który w wieku 15 lat zginął w czasie polowania, w 1675 roku. Nie uczą nas tego w podręcznikach historii, bo był on kalwinistą (i pewno używał niemieckiego). Podobnie nie doceniamy znaczenia bitwy z 1241 roku, która zamknęła hordom tatarskim drogę do Paryża. Zginął Henryk II Pobożny, bo jego kuzyn, też Piast, Mieszko II Otyły czmychnął z swym hufcem za mury miasta. A sama nazwa „Legnica”, według niesprawdzonej hipotezy autora

(GK) pochodzi od relikwii drzewa świętego (drewno = legno, po włosku). Jeżeli relikwie Krzyża rzeczywiście były w Legnicy, wiadomo, dlaczego tak jej broniono.

Tak! Fizyka jest szkołą poszukiwania przyczyn, związków i punktów zasadniczych. Jest szkołą analitycznego i syntetycznego myślenia. W Belgii (w części francuskojęzycznej) nauczyciele fizyki zdobywają równoległe kompetencje do nauczania i historii i religii.

Optyczny tomograf

I wreszcie, zamykający wystawę optyczny tomograf. Grecki rdzeń „tomos” odnajdujemy w określeniu „a-tomos”, czyli niepodzielny. Różnego rodzaju medyczne „tomografie” oznaczają więc techniki wirtualnego „cięcia”, czyli analizowania warstwa po warstwie. Tomografia rentgenowska (uwaga! wiążąca się z pochłonięciem sporej dawki promieniowania X) ma charakter takiej analizy. Dziś, jest spora szansa spotkania w gabinecie okulistycznym aparatu do tzw. OCT, czyli *optical coherence tomography*. Wynalazek toruńsko-wiedeński, stanowi przewrót w diagnostyce oka. Wystarczy „mgnienie oka” (mniej niż 2 sekundy) aby dokonać skanu siatkówki lub rogówki. Zdjęcie (atrapy) OCT i (prawdziwy) obraz wirtualnego przekroju siatkówki, otrzymany za pomocą tego instrumentu, pokazujemy na ulotce wystawy, fot. 12. Szczegółowy plan wystawy z jej pierwszej, toruńskiej edycji znajdzie Czytelnik na stronach internetowych Katedry Dydaktyki Fizyki UMK [6].

Tłumaczenie „Perspektywy” Witelona na język polski zostało podjęte z inicjatywy prof. Romana Ingardena, dyrektora Instytut Fizyki UMK w latach 1968-78, a dokonane przez trójkę naukowców: profesora Andrzeja Bielskiego (fizyka), profesora Witolda Wróblewskiego (łacinnika) i prof. Lecha Bieganowskiego (okulisty).

Grzegorz Karwasz
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Michał Kłosiński
Muzeum Okręgowe w Toruniu

BIBLIOGRAFIA:

- [1] G. Karwasz, J. Kruk, *Idee i realizacje dydaktyki interaktywnej*, Wyd. Nauk. UMK, 2012.
- [2] <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki/files/archiw/Warszawa/index.html>
- [3] G. Karwasz, A. Karbowski, *Z górki na pazurki, czyli jak interaktywnie uczyć o energii mechanicznej*, „Fizyka w Szkole”, 2/2023, str. 18.
- [4] G. Karwasz, *Uśmiech kota bez kota*, Żart dydaktyczny, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/FIAT_LUX/Pliki/Usmiech_kota_09a.pps
- [5] *Jakiego koloru jest różowa lampka*, Sekwencja dydaktyczna http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pliki/Rozowa_lampka.pdf
- [6] <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/optyka/swarowski-pl.html>
- [6] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/FIAT_LUX/html/

W następnych wydaniach polecamy m.in.

- Fizyczne elementy w super nowoczesnym wytwarzaniu energii elektrycznej
- Kolejne duże prędkości – czym są, charakterystyka, historia
- Fizyka szkolna na cenzurowanym – jakie zmiany są potrzebne
- Badanie właściwości ładunków elektrycznych, pól i sił z wykorzystaniem symulacji



Dwadzieścia lat podręczników do fizyki

W ciągu ostatnich dwudziestu lat zostało wydane kilkadziesiąt podręczników do fizyki. Tak wielka ich ilość wynika z dwu faktów. Po pierwsze dopuszczono do użytku po kilka równoległe występujących „serii podręczników”. Drugi powód tej obfitości to regularnie powtarzające się „reformy” powodujące, że dotychczas obowiązujące podręczniki formalnie przestają być „legalne”.

Jerzy Kuczyński¹

Formalnie, bo obserwowano się procedurę, że zmiany do nowej „Podstawy Programowej”² polegały na zaznaczeniu na stronie tytułowej „Do nowej Podstawy Programowej”, nie zmieniając wiele wewnątrz podręcznika.

Tu nie sposób nie zauważyć poglądu mego poprzednika³, że zmiana treści już dopuszczonego podręcznika jest skrajnie trudna, a z tego co twierdził Profesor wynikało, że nawet poprawienie błędu ortograficznego wymagałoby powtórnej ministerialnej procedury dopuszczającej podręcznik do użytku szkolnego, wraz koniecznością poniesienia odpowiednich kosztów. Być może Profesor trochę przesadzał, ale na pewno miał sporo racji. Dlatego warto

by przyrzeć się jak podręczniki szkolne do fizyki są konstruowane i jaka jest ich zawartość.

Podręczniki i recenzenci

Przed wszystkim podręczniki „są przykrawane” do odpowiedniego dokumentu ministerialnego. Stąd dość rygorystyczne przestrzeganie by wszystkie hasła Podstawy były zrealizowane i by było ... możliwie niewiele ponad tę Podstawę. Prowadziło to do niekiedy zupełnie kuriozalnych sytuacji, gdy np. było omawiane II prawo Kirchhoffa przy braku omawiania pierwszego. Dodatkowo pierwsze podręczniki wydawane około roku 2000 charakteryzowały się sporą, żeby nie powiedzieć szaloną ilością błędów i niedoróbek. Po prostu zarówno autorzy jak i redakcje wydawnictw nie miały doświadczenia a za pisanie

¹ Autor dość przypadkowo (zaproszono go do współudziału w ocenianiu podręczników do fizyki; trudno byłoby odmówić biorąc pod uwagę, że wówczas w skład Komisji wchodził Członkowie Akademii, profesorowie Krzysztof Fiałkowski, Andrzej Staruszkiewicz i Marek Zralek) został związany z Komisją ds. podręczników szkolnych Polskiej Akademii Umiejętności. W tej chwili już trzecią kadencję pełni obowiązki wiceprzewodniczącego ds. przedmiotów przyrodniczych tej Komisji. Stąd też i jego pewna, choć na pewno niepełna wiedza o podręcznikach szkolnych. Warto dodać nie tylko do fizyki, jako że wysłuchał liczne recenzje podręczników do niemal wszystkich szkolnych przedmiotów. Niniejszy tekst ma w dużej mierze charakter wspomnieniowy stąd dość sporo nazwisk, głównie jego Mistrzów, którzy przewinęli się przez Komisję.

² Tak będę ten dokument nazywał choć jego nazwa i zawartość treściowa ulegała zmianom.

³ Profesora Krzysztofa Fiałkowskiego. M. in. współautora serii szkolnych podręczników.

podręczników często brali się ludzie o umiarkowanych kompetencjach w zakresie fizyki.

Niestety chyba to samo można powiedzieć o ministerialnych opiniodawcach⁴. Po paru latach problem w znacznej mierze zniknął. Doświadczenie zdobyte przez wydawnictwa i autorów spowodowało, że jak to się kiedyś wyraził prof. Staruszkiewicz „wydawane podręczniki przestały być skandalem” – częściowo z powodu wzrostu fachowości, częściowo z powodu „niewidzialnej ręki rynku” eliminującej mało udane dzieła. Niektóre, szczególnie odpowiedzialne, wydawnictwa zaczęły zatrudniać „wewnętrznych recenzentów”, czyli fachowców czytających podręczniki przed zaoferowaniem ich Ministerstwu.

Tu warto zwrócić uwagę, że wewnętrzny recenzent ma bez porównania większy wpływ na dzieło wydawnicze od recenzenta ministerialnego. Może bowiem proponować zmiany i dyskutować z autorami i redaktorami⁵. Oczywiście uzyskany konsensus powoduje bez porównania lepszą jakość podręcznika. Warto bowiem zwrócić uwagę na to, że własnych błędów z zasady się nie widzi. I nawet nie tylko dlatego, że żyje się w jakimś błędnym przekonaniu. To wprawdzie też się zdarza⁶, ale na poziomie szkolnej wiedzy to raczej margines. Zwykle problem polega na sformułowaniu – czytając to co się samemu napisało widzi się to co się chciało napisać a nie to co się napisało. Inne spojrzenie ujawnia, że można to sformułowanie zrozumieć zupełnie inaczej. A możliwość błędnego rozumienia w szkolnym podręczniku należy uznać za poważny błąd. Dlatego poleganie tylko na własnej koncepcji nie powinno być dopuszczalne w podręcznikach szkolnych, często w praktyce szkolnej, podlegających egzegezie jak „święte księgi”⁷.

Warto podkreślić, że fizyka nie jest monolitem i poglądy panujące w jednym ośrodku mogą być w innym oceniane jako błędne. W przypadku podręczników szkolnych, mających służyć do użytku w całej Polsce trzeba się takich regionalizmów pilnie wystrzegać. Warto dodać, z zasady mających marginalne znaczenie.

Związki fizyki z innymi przedmiotami

Dużo poważniejsze znaczenie ma związek z innymi przedmiotami. Profesor Jerzy Kreiner (wówczas rektor, już nie wiem jeszcze WSP czy już Akademii Pedagogicznej

w Krakowie) kiedyś przejrzał podręcznik historii⁸. Wynik był porażający – Profesor znalazł ogromną ilość błędów związanych z astronomią. Po wygłoszeniu referatu zauważył istotną rzecz. W podręcznikach szkolnych są bardzo liczne błędy dotyczące innych od tytułowej dziedzin. Po prostu autorzy podręczników na poboczne tematy mają z zasady bardzo nikłą wiedzę. Co gorsza wiedza pochodząca „z nasłuchu” ma tendencje do „panoszenia się” i często przypadkowo zasłyszane informacje uważamy za absolutne prawdy.

Niestety to samo można powiedzieć o wiedzy szkolnej – często zupełnie marginalne wypowiedziane uwagi nauczyciela czy zdania z podręcznika zapadają w pamięć i w późniejszym życiu ... trafiają do pisanego podręcznika. Dlatego Profesor postulował, by podręczniki szkolne czytali i oceniali również specjaliści od zupełnie innych dziedzin (sam później zrecenzował inny podręcznik do historii). Niestety z moich doświadczeń wynika, że to prawda. Podręczniki szkolne są pełne błędów dotyczących innych dziedzin. Najczęściej błędy wynikają z innego znaczenia słów w różnych dziedzinach.

Typowym przykładem, co gorsza pochodzącym z zakresu fizyki, jest użycie słowa „regularny” w odniesieniu do sieci krystalicznych. W krystalografii, a ogólniej w fizyce ciała stałego, to słowo oznacza sieć kubiczną (sześcienną) natomiast autorzy podręczników używają tego słowa w sensie „sieć periodyczna przestrzennie” czyli jak by to powiedział krystalograf, „charakteryzująca się uporządkowaniem dalekiego zasięgu”.

Tego typu pomyłek mamy w podręcznikach sporo. Wystarczy kontakt z nieco inną gałęzią nauki by pojawiły się kolizje nazewnicze. Np. w astronomii metalami nazywa się wszystkie pierwiastki o liczbie porządkowej większej od dwu. I tak typowymi „astronomicznie” metalami są tlen, węgiel, siarka a nawet neon czy argon. Oczywiście reakcja chemika na tę informację jest warta zobaczenia. Ale nie ma co się dziwić. Mnie kiedyś zaszokowała informacja (od polonisty prof. D. Rotta z Uniwersytetu Śląskiego), że strony w książkach się „liczbuje”. Na mój protest, że liczby porządkowe są „numerami” inny polonista przywołał mnie do porządku cytując odpowiednią uchwałę „kompetentnego polonistycznego gremium”. Pozostało tylko przyznać *dura lex sed lex*⁹.

⁴ Tu Autor ma dość mieszane uczucia. Z jednej strony często słyszał opinie o istnieniu recenzentów, którzy są skłonni wszystko przepuścić, a z drugiej zna przypadek, gdy książkę opiniował znany mu osobiście człowiek, o którym wie, że by nie przepuścił pewnych rzeczy a które w tekście podręcznika znajdował. Inna sprawa, że człowiek ten opiniował podręcznik od razu „dwa razy” czyli „pierwszy i ostatni” twierdząc, że już nigdy w czymś takim nie weźmie udziału. Zgadza się to z opinią prof. Fiałkowskiego, że procedura dopuszczania podręczników do użytku szkolnego była skandaliczna. Jak jest teraz (Profesor zmarł 8 lat temu) nie wiem i staram się unikać tego tematu w rozmowach ze znanymi mi opiniodawcami Ministerstwa.

⁵ Z pewnymi ograniczeniami. Autor po stwierdzeniu, że pewne dzieło nie nadaje się nawet do poprawy przestał otrzymywać tego typu zlecenia.

⁶ Mając sporo lat i niezłą pamięć pamiętam trochę własnych błędnych przekonań. Jednak w tym przypadku problemem jest raczej to, że zauważywszy własny błąd ma się tendencję do misjonarstwa, czyli próby uświadamiania innym błędności tego poglądu (zwykle taki błędny pogląd jest dość powszechny! W końcu w jakiś sposób go nabyliśmy). Nie budzi to zwykle entuzjazmu.

⁷ Pamiętam wieloletnie dyskusje ze skądinąd rozsądnym fachowcem od astronomii na temat pojęcia „ciało doskonale czarne”. Kością niezgody było słowo „ciało”. Wg mnie to tylko słowo a chodzi o charakterystykę powierzchni. Według mego adwersarza to ciało, a więc bryła promieniująca we wszystkich kierunkach. Nie trudno się domyśleć, że chodziło o obiekty astronomiczne i ich chłodzenie przez promieniowanie – dla mnie oczywiste jest, że kawałek planetoidy może być opisany ciałem doskonale czarnym a obok charakterystyka może być zupełnie inna. Wydaje się oczywiste, jednak nie potrafiliśmy dojść do porozumienia.

⁸ Prace Komisji do Oceny Podręczników Szkolnych t.1 s. 29 (2002). Prawie wszystkie tu zamieszczone informacje można znaleźć w roczniku PAU, który w ciągu dwudziestu lat zmieniał swój tytuł (ostatnio „Opinie Edukacyjne PAU”) zachowując ciągłość numeracji. W większości przypadków moich recenzji nie cytuję, tym bardziej, że staram się podać fakty, które powtarzają się w wielu, czasem nawet w większości, podręczników szkolnych. Zachęcam do zapoznania się z naszym rocznikiem.

⁹ „Twarde prawo, ale prawo”. Zdarzenie opisałem w V tomie Rocznika s.173, tłumacząc cytat w sposób zasłyszany gdzieś w telewizji „durne prawo, aale prawo” (podwójne „a” i „l” usunęła redaktorka językowa).



Jak z tego wynika problem dotyka nie tylko nas i niekoniecznie zawsze jesteśmy skłonni zgodzić się z opinią fachowca. Nie zmienia to konkluzji prof. Kreinera. Podręczniki szkolne powinni recenzować fachowcy od wszystkich podstawowych dziedzin. Podejrzewam bowiem, że znaczna część owych uzyskanych „z nasłuchu” błędnych przekonań pochodzi z podręczników szkolnych tylko, że dotyczących innych niż znajdująca się na okładce podręcznika dziedzin. A pierwotną przyczyną jest mało poprawny sposób dopuszczania podręczników do użytku.

Oczywiście rozumiem tendencje oszczędnościowe i komercyjny, a więc nastawiony na zysk charakter wydawnictw edukacyjnych tym niemniej powinno się mieć realistyczną hierarchię wartości. W tym przypadku najważniejsza powinna być jakość ostatecznego produktu, czyli jakość wykształcenia uczniów¹⁰.

Przez chwilę się zastanowiłem nad powyższym stwierdzeniem. Bo z drugiej strony, gdyby pełne błędów i niekonsekwencji podręczniki potraktować jako ćwiczenie w wyszukiwaniu błędów to być może udałoby się uzyskać dzięki tym błędom dużo cenniejszy rezultat dydaktyczny – udałoby się wykształcić krytycznie nastawionych do świata obywateli¹¹. Jednak w sumie należałoby jakoś zreformować system opiniowania podręczników by wyeliminować co grubsze pomyłki związane z innymi naukami.

Jak na razie prócz opinii fachowców od danej dziedziny Ministerstwo wymaga jedynie opinii językoznawcy. Akurat ta opinia w przypadku nauk przyrodniczych wydaje mi się mało istotna – w końcu rodowity Polak zna wystarczająco dobrze język polski by zauważyć niezgrabności – słyszę w Komisji regularnie uwagi dotyczące języka recenzowanych książek. I uwagi te z rzadka pochodzą od polonistów. Zgłaszają je specjaliści opiniujący książki od strony fachowej. Jednak dużo częściej zdarzają się „z sali” uwagi merytoryczne dotyczące błędów zauważonych w trakcie referatu. Czyli zauważonych w czasie kilku minutowego przeglądania książki. Oczywiście najczęściej dotyczących dziedzin z których specjalistami są słuchacze

a nie z dziedziny, której dotyczy podręcznik. Biorąc pod uwagę jak łatwo te błędy się wychwytyje wymóg przejrzenia podręcznika przez dodatkowych 4-5 fachowców z różnych dziedzin, byłby uzasadniony a koszt powinien być w miarę niewielki, a nawet nie związany z finansami. Mogłoby to być np. kilka punktów do dorobku¹².

Konkrety – astronomia sprzed pół wieku

Po tych ogólnych uwagach trzeba przejść do konkretnych i mojej dziedziny. W zasadzie jestem fizykiem, ale przez ponad trzydzieści lat pracowałem jako astronom. Stąd pewna fachowość w tej dziedzinie¹³. Dlatego czytając podręczniki zwracam szczególną uwagę na treści astronomiczne. Albo może lepiej powiedzieć, że one zwracają moją uwagę. I niestety w sposób opisany powyżej, czyli błędnymi stwierdzeniami.

Z mojego punktu widzenia astronomiczne części podręczników szkolnych wydają mi się najgorzej napisane. Trochę szokujące, bo właśnie astronomia to najszybciej rozwijająca się a jednocześnie najlepiej spopularyzowana gałąź nauk fizycznych. Od pół wieku to w ramach tej gałęzi nauk fizycznych mamy powodź odkryć trafiających na pierwsze strony gazet a w księgarniach na każdą książkę popularyzującą inne niż astronomia dziedziny nauk fizycznych przypada kilka na temat szeroko pojętej astronomii. Jest więc co czytać i ponieważ sam sporo czytam mogę z czystym sumieniem powiedzieć, że większość tej literatury jest bardzo dobrej jakości. Oczywiście zdarzają się błędy i pomyłki, ale chyba jest ich mniej niż w szkolnych podręcznikach i trochę czytając, bez trudu można uzyskać obraz współczesnej astronomii.

Niestety w podręcznikach króluje astronomia z przełomu lat sześćdziesiątych i siedemdziesiątych, a więc sprzed pół wieku. Szczytem niekompetencji było zadanie maturalne z hasłem „brązowy karzeł” w znaczeniu nieużywanym od pół wieku (de facto nigdy!). Niestety zaglądnięcie do Podstawy Programowej potwierdza konstatację o nikłej znajomości tej dziedziny wśród twórców Podstawy. Prawdopodobnie jej twórcy nie przeglądali literatury od czasu swojej matury i uważają, że od tego czasu niewiele się zmieniło. Może z jednym wyjątkiem – zauważono odkrycie planet pozasłonecznych. Ale już ciemna materia i ciemna energia są im głęboko obce. Podobnie jak fakt, że obecnie mierzy się obiekty o przesunięciu ku czerwieni około 7 i „prawo Hubble’a” nie ma tu zastosowania.

Podobne uwagi można byłoby poczynić w kwestii astronomii gwiazdowej czy planetarnej. Co najdziwniejsze dotyczy to nawet problemów ustalonych od kilkuset lat i jak się okazuje, niektórzy autorzy podręczników zdają się nie znać pojęć gwiazdozbioru czy roku myląc np. rok gwiazdowy ze zwrotnikowym. To ostatnie wskazuje na to, że konstrukcja kalendarza jest im głęboko obca¹⁴.

¹⁰ To pogląd, który usłyszałem od innego z moich Nauczycieli docenta Witolda Kleinera z U.J.

¹¹ Wątpię czy ten pogląd byłby popularny wśród nauczycieli. Znam przypadek, gdy reakcją na niezbyt pochlebną recenzję podręcznika był protest Autorki motywowany tym, że „jest laureatką Nagrody Ministra” i nie można podrywać jej autorytetu.

¹² Tu ujawnia się niska sensowność obecnego systemu punktowego. Oczywiście 4 „sloty” na cztery lata wykluczają tego typu rozwiązania.

¹³ I jak się zdaje astronomowie uważają mnie za astronoma.

¹⁴ Warto dodać, że dotyczy to nie tylko fizyki. Pamiętam przypadek, gdy historyk pomylił Grzegorza XIII z Grzegorzem I Wielkim – drobiażdżek około tysiąclecia różnicy w okresie życia.

Jak z tego widać byłoby wskazane głęboko przekonstruować Podstawę Programową, uwspółcześniając i konkretyzując jej hasła. Bo głównym wskazaniem dla autorów i redaktorów są hasła w niej zawarte. Mówiąc bez eufemizmów podręcznik wg. większości użytkowników ma nie tyle uczyć i budować obraz świata co umożliwić wysoką zdawalność na maturze.

Powyższe uwagi można podciągnąć pod omawianą powyżej własność słabej znajomości tematów „pobocznych”. Oczywiście nieco lepiej jest ze strictly fizycznymi treściami. Tu błędów jest bez porównania mniej a omawiana hasła wydają się nie budzić zbyt poważnych oporów. Oczywiście znajdziemy sporo wątpliwych czy wręcz błędnych stwierdzeń, ale jak kiedyś usłyszałem od prof. Staruszkiewicza „jeszcze nie udało się wydać Biblii bez usterek”. Tym samym, w znacznie bardziej ulotnych drukach jakimi są szkolne podręczniki ideału nie ma co oczekiwać.

Poważniejszą sprawą i niestety powracającą do Podstawy Programowej jest to czego dotyczy fizyka szkolna. Otóż niestety zatrzymuje się na osiągnięciach z pierwszej połowy XX wieku. Tu warto zauważyć, że np. biolodzy twierdzą, że w ich nauce są widoczne osiągnięcia z ostatnich kilkunastu a może nawet i kilku lat. Fizyka jak się zdaje zatrzymała się na latach pięćdziesiątych. Być może to wynik traumy spowodowanej użyciem broni jądrowej. Potwierdza tę koncepcję fakt podawania wyraźnie zawyżonych strat wynikających z użycia tej broni przy pełnym ignorowaniu skutków klasycznych bombardowań powodującej i większe straty i będące znacznie bardziej niehumanitarne – śmierć od wybuchu jądrowego w porównaniu ze śmiercią w pożarach czy w wyniku zasypania w piwnicach jest jednak statystycznie mniej bolesna.

Ignorowanie osiągnięć

Jakby jednak nie było fizyka szkolna ignoruje osiągnięcia dokonane w ciągu ostatniego półwiecza. Oznacza to m.in. to, że uczeń nie widzi związku tej nauki ze współczesnym życiem. A to, pomijając omówioną już astronomię, to przede wszystkim ciało stałe i klimat¹⁵.

Zacniemy od tego drugiego problemu. I w zasadzie w kilku najnowszych podręcznikach ten temat jest dość obszernie omawiany. Niestety przyjrzenie się temu co autorzy podręczników piszą na temat zjawiska cieplarnianego pokazuje, że nie jest to fizyka. W rozdziałach o zjawisku cieplarnianym znajdziemy dość obszerne, ale typowo „geograficzne” (i zdecydowanie publicystyczne!) opisy zjawiska nie odwołujące się do wiedzy fizycznej. To tym bardziej dziwne, że z punktu widzenia fizyki zjawisko jest łatwe do bardzo klarownego opisu.

Kilka (naście?) lat temu w Olimpiadzie Astronomicznej było zadanie zaprojektowania na Marsie atmosfery skut-



kującej średnią temperaturą planety wynoszącą 300 kelwinów, a więc wyższą od tej jaką mamy na Ziemi. O ile pamiętam okazało się dość łatwe. Jeżeli więc zdolny uczeń (w końcu Olimpiada) potrafi takie zadanie wykonać samodzielnie to nie powinno być trudne takie przemyślenie tematu by na kilku stronach jasno i precyzyjnie pokazać przeciętnemu uczniowi fizykę tego zjawiska¹⁶, wskazując, że mamy tu do czynienia z prostą i zrozumiałą fizyką.

I w końcu ostatnia rzecz, czyli problem fizyki ciała stałego. To najbardziej „praktyczna” dziedzina fizyki. Zmieniła życie codzienne, zwłaszcza młodego pokolenia. Zacniemy od wymienienia kilku urządzeń stworzonych przez ten dział fizyki. A więc komputer, smartfon, odtwarzacz (płyty, filmów, gier). To urządzenia bez których współczesny młody człowiek nie wyobraża sobie życia a których zupełnie nie kojarzy z fizyką. I znowu warto przypomnieć – których z fizyką nie kojarzą Autorzy Podstawy Programowej. Można by złośliwie zauważyć, pewnie uważają bombę jądrową za coś bardziej użytecznego od odtwarzacza muzyki.

Miałem zamiar napisać o podręcznikach szkolnych. Jednak przyglądając się temu co napisałem powyżej widzę, że napisałem raczej o urzędnikach Ministerstwa. I nie bez powodu. Po prostu właśnie oni mają przeważający wpływ na zawartość podręczników. Niestety nie rozumiem sposobu rozumowania tych ludzi. Jeżeli jeszcze potrafię zrozumieć naciski na zawartość historyczno-patriotyczną a zupełnie oczywiste wydają mi się wymagania ideologiczno-etyczne w stosunku do szkolnej nauki¹⁷. Stąd nie budzą mojego oporu cukierkowe i kompletnie nierzeczywiste obrazy historii. Natomiast braki w zupełnie światopoglądowo obojętnych treściach nauczania fizyki są dla mnie zupełnie niezrozumiałe¹⁸. Tym bardziej, że oficjalnie wyznaje się ideę o konieczności stworzenia nowoczesnej, innowacyjnej gospodarki. Oczywiście porządne nauczanie fizyki to dobry krok w tym kierunku, dodatkowo nie mający żadnych obciążeń ideologicznych.

¹⁵ Przynajmniej ja tak to widzę. Być może za kilkadziesiąt lat ktoś zobaczy to inaczej.

¹⁶ Być może nieco przesadzam – w końcu mam za sobą trochę przemyśleń i tekstów na ten temat (m. in. autorstwo wspomnianego zadania). Na pewno jednak jest to możliwe.

¹⁷ Co nie oznacza, że uważam je za godne poparcia. Po prostu jako przyrodnik nie zwykłem stawiać wymagań rzeczywistości, a z historii wiem, że szkoła zawsze była narzędziem ideologizacji młodego pokolenia więc nie wydaje mi się by można to było zmienić. Problem sprowadza się jedynie do tego czy prócz treści ideologicznych szkoła przekazuje również użyteczną wiedzę o świecie.

¹⁸ Niezupełnie. Do pewnego stopnia rozumiem tę tendencję. Jest bardzo istotny powód, dla którego politycy w demokratycznym kraju nie przyłożą ręki do porządnej edukacji p. np. mój tekst w „Opinie Edukacyjne t. XVII & XVIII” s. 21.

Powtarzające się błędy

Pozostaje mi jeszcze spróbować omówić najczęściej powtarzające się błędy merytoryczne w podręcznikach fizyki. Dla mnie chyba najbardziej denerwujące jest nieodróżnianie konwencji od faktów przyrodniczych. Powtarza się to niemal we wszystkich podręcznikach. Ktoś mógłby powiedzieć, że to na poziomie szkolnym trudny do realizacji drobiazg. Nie zgadzam się z tym. Uznawanie konwencji za rzeczywistość jest próbą tworzeniem realności, czyli mówiąc prosto wstępem do magii. Niestety fizyka szkolna ma niemały udział w tej działalności. A by tego uniknąć, wystarczy przedstawić w paru zdaniach czym jest konwencja a potem w miarę konsekwentnie zwracać uwagę na konwencjonalną składową wiedzy fizycznej.

Spotykane w szkole konwencje to przede wszystkim nazwy i jednostki. Wystarczy więc proste stwierdzenie „fizyka od nazw i jednostek nie zależy” by większość tego typu problemów zniknęła. Oczywisty dowód tego faktu wynika z tego, że fizyka uprawiana w krajach nie używających polskiego języka i układu SI jest całkowicie poprawna. Inna rzecz, że w ten sposób znika okazja do wielu pytań. Pytań ważnych dla nauczyciela, bo umożliwiających „wyciągnięcie” na pozytywną ocenę¹⁹. Inne konwencje, o których w szkolnej fizyce się nie mówi to np. problem znaku ładunku czy kierunku przepływu prądu. Przy okazji warto zauważyć, że aby konwencja była poprawna nie może wpływać na rzeczywistość, bo w przeciwnym wypadku mamy do czynienia z magią. Przedstawienie tego faktu uczniowi byłoby pewnie mocniejszym uderzeniem w magiczny obraz świata od setek haseł propagandowych. Dlatego omawianie sensu konwencji w nauce miałoby spory wpływ na ograniczenie popularności magii.

Innym powszechnie występującym błędem jest twierdzenie, że warunkiem przepływu prądu elektrycznego jest napięcie. Błąd wydawałoby się bardzo specyficzny, ale mi przypominający stwierdzenie przeczytane w Postęпах Fizyki (niestety nie pamiętam w którym numerze, a w grę wchodzi ponad 20 roczników), że nawet wykwalifikowani fizycy myślą na co dzień kategoriami fizyki Arystotelesa. W tym przypadku wygląda na to, że rzecz dotyczy przede wszystkim elektrodynamiki. Do pewnego stopnia to jest zrozumiałe, bo w końcu transformacja Lorentza jest dość skomplikowana. Tym niemniej wypadłoby przynajmniej zauważyć, że ruch mechaniczny naładowanego ciała to też prąd a zgodnie z transformacją Galileusza nie wymaga siły (co się przenosi do STW).

Bardzo blisko z tym jest związany problem wytwarzania fal elektromagnetycznych, czyli przyspieszania ładunku. Niestety tego dość zasadniczego problemu zdaje się, część autorów podręczników, nie rozumieć a to wg mnie jeden z najważniejszych problemów całej fizyki.

W szczególności często w podręcznikach spotykamy obszerne omówienie przedbohrowskich modeli atomu bez słowa komentarza, dlaczego te modele tak właśnie tworzone. Do dość częstych, choć może mało istotnych, błędów zaliczyłbym twierdzenie, że wszystkie substan-

cje występują w trzech stanach skupienia. Widząc takie stwierdzenie proponowałem zwykle wskazanie „płynnego drewna”.

Podobnym błędem jest twierdzenie, że „ciało tracące energię” zmniejsza swoją temperaturę. W jednym przypadku to stwierdzenie doprowadziło mnie do paroksyzmów śmiechu, bo obok niego był rysunek płonącej zapalniczki. A ogólna, bardzo częsta postać tego błędu, to nadmiar konkretności powodujący, że twierdzenia, z którymi można się zgodzić, opatrzone w konkretyzujące przymiotniki, są po prostu błędne. Jako przykłady można by tu podać wspomniany wyżej rok zwrotnikowy czy to, że igła magnetyczna wskazuje biegun geograficzny.

Innych tego typu przykładów znaleźlibyśmy sporo. Do najprostszych należy twierdzenie, że prąd elektryczny to ruch elektronów zapominając o innych ładunkach. Nie są to może poważne błędy, ale mimo wszystko świadczą o braku przemyśleń. Innym dość mnie denerwującym błędem jest utożsamianie błędu (niepewności pomiaru) z najmniejszą działką przyrządu. We współczesnych elektronicznych przyrządach tę wielkość można po prostu zmierzyć włączając przyrząd na odpowiedni zakres – zmiany odczytu wskażą wartość niepewności.

Jeszcze innym błędem są powtarzane dość bezmyślnie legendy. Tu na czoło wybija się pogląd, iż system kopernikański był bardziej precyzyjny od ptolemejskiego. Oczywiście nieprawda choćby dlatego, że system geocentryczny był złożony z większej ilości kół, a więc mówiąc współczesnym językiem, odpowiadał wyższemu stopniowi rozwinięcia fourierowskiego. Niestety tego typu twierdzeń, często umykających recenzentowi w podręcznikach znajdziemy sporo.

W praktyce okazuje się, że fizyka szkolna w dużej mierze nie jest nauką ilościową. Tu dobitnym przykładem jest II zasada dynamiki. W praktyce każdy wie, że pojazdy pod wpływem stałej siły poruszają się ruchem jednostajnym (p. uwaga o fizyce Arystotelesa). Do tej samej kategorii uchybień należałoby zaliczyć dane liczbowe w przykładach, które często b. znacznie odbiegają od rzeczywistości. W szkolnych podręcznikach znajdziemy, głównie wśród proponowanych zadań, ale nie tylko sporą ilość danych liczbowych urągającym znanym z codziennego doświadczenia wartościom. Nie warto ich może wyliczać, ale warto zauważyć – gdyby podręcznik przed publikacją czytało więcej krytycznych czytelników to te proste do poprawy błędy by zniknęły.

Pora na podsumowanie.

Główną przyczyną niskiej jakości podręczników szkolnych wydaje się mało przemyślany system ich dopuszczania do użytku i zupełnie nieprzemyślana Podstawa Programowa. I na tym trzeba zakończyć, bo na te sprawy nie mamy żadnego wpływu. A dyskusja o tym na co nie mamy wpływu jest mało owocna.

Jerzy Kuczyński
Akademia Śląska

¹⁹ I to wpisuje się w tendencję do „generowania rzeczywistości”

Żywoty fizyków

Lord Kelvin

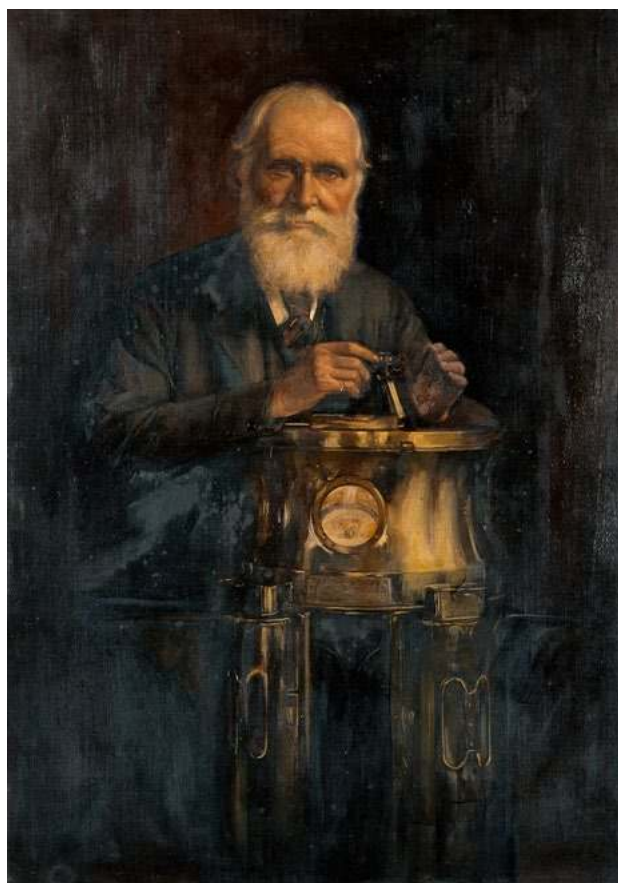
ku pouczeniu i pokrzepieniu serc
wraz z przykładami dla ćwiczenia się w nauce
i zdobywania mądrości

Tadeusz Wibig

Lord Kelvin OM, GCVO, PC, FRS, FRSE (1824 – 1907) jako taki nie urodził się w ogóle. W roku 1825 profesorowi matematyki w *Royal Academeical Institution* w Belfaście Jamesowi Thomsonowi urodził się prześlizgnięty chłopczyk. Dano mu na imię Wiliam. Osiem lat później jego ojciec otrzymał stanowisko profesorem matematyki na Uniwersytecie w Glasgow i rodzina opuściła Zieloną Wyspę. Gdy Wiliam osiągnął wiek lat ośmiu, otrzymał oficjalne pozwolenie na uczęszczanie jako wolny słuchacz na uniwersyteckie zajęcia z matematyki. Zauważono wtedy jego nieprzeciętne zdolności i po dwóch latach wciągnięto go na oficjalną listę studentów. Miał lat dziesięć. Może nas to dziwić, ale w tamtym czasie nie było to nic nadzwyczajnego, uniwersytety dbały wtedy o zdolnych młodych i bardzo młodych ludzi.

Jego talent ewoluował w kierunkach ścisłych powoli. W wieku 12 lat zdobył nagrodę za przetłumaczenie *Dialogów o bogach* Lucjana z Samosaty ze starożytnej greki na angielski. W roku akademickim 1839/1840 otrzymał nagrodę za *Essay on the figure of the Earth*, coś już bardziej fizycznego, a podczas wakacji rok później napisał swą trzecią, już bardzo poważną pracę *On the uniform motion of heat in homogeneous solid bodies, and its connection with the mathematical theory of electricity* (*O jednostajnym przepływie ciepła w jednorodnych ciałach stałych i jego związku z matematyczną teorią elektryczności*). Tytuł mówi sam za siebie.

W międzyczasie odbył podróże na kontynent. Podczas dwumiesięcznych wakacji spędzanych we Frankfurcie studiował dla przyjemności wyrafinowane najnowsze matematyczne prace **Jeana Baptiste’a Josepha Fouriera**. Jesienią następnego roku William nie skończywszy z premedytacją studiów w Glasgow wstąpił na Uniwersytet w Cambridge. Tamże zainteresował się odkrytą zupełnie niedawno przez **Michaela Faradaya** indukcją, ale dalsze badania w tym kierunku mimo początkowych sukcesów przerwała mu nieoczekiwana, a może oczekiwana właśnie, ale nie aż tak wcześnie, propozycja objęcia katedry filozofii naturalnej na Uniwersytecie w Glasgow. Przyjął ją oczywiście i w wieku 22 lat wdział togę profesora jednego z najstarszych uniwersytetów w Królestwie, którego kilka lat temu sam był jeszcze studentem. I tak mu już zostało, na tej posadzie trwał przez ponad pół wieku.



Zaraz na początku swej kariery w Szkocji wdał się w naukowy spór pomiędzy grupą naukowców kontynentalnych z **Émilem Clapeyronem** rozwijających teorię silnika cieplnego **Nicolasa Leonarda Sadiego Carnota** (*„Réflexions sur la puissance motrice du feu”*; *Uwagi nad siłą napędową ognia*) i jego modelu „wodospadu” i **Jamesem Joulem** uważającym, że ciepło i praca mechaniczna są w zasadzie wymienne i jedno można zamieniać w drugie, jeśli się tylko chce.

Thomson początkowo wziął stronę eleganckiej teorii Clapeyrona, poglądom Joule’a brakowało dostatecznie wyrafinowanych podstaw matematycznych. Teoria „siły napędowej ciepła” Carnota opierała się na założeniu istnienia szczególnej niewidzialnej i nieważkiej substancji, którą przepływając między grzejnikiem, a chłodnicą powodować mogła ruch tłoka w cylindrze, czyli mogła potencjalnie wykonać jakąś użyteczną pracę. Substancja ta przepływała zawsze od ciała cieplejszego do zimniejszego („z góry na dół” - stąd wodospad Carnota). Dziś wiemy, że model ten jest z gruntu błędny, ale niektóre płynące zeń rozwiązania pozostają słuszne, choćby wzór na sprawność idealnego silnika $\eta = (T_g - T_{ch}) / T_g$. Wzór ten najprawdopodobniej pierwszy zapisał Thomson. Występujące w nim temperatury grzejnika i chłodnicy należy wyrażać w skali bezwzględnej, którą na potrzeby termodynamiki Thomson też musiał sam wymyślić.

„Charakterystyczną właściwością skali, którą teraz proponuję, jest to, że wszystkie stopnie mają tę samą wartość; to znaczy, że jednostka ciepła zstępująca z ciała A w temperaturze T tej skali, do ciała B w temperaturze (T - 1), dałaby ten sam efekt mechaniczny,

niezależnie od tego, jaka byłaby liczba T. Można to słusznie nazwać skalą absolutną, ponieważ jej cecha jest zupełnie niezależna od fizycznych właściwości jakiejkolwiek konkretnej substancji.”

Teoretyczne koncepcje Thomson poparł wynikami precyzyjnych doświadczeń nad rozprężaniem powietrza i pary wodnej. Zgodnie z tą teorią ciepła musiała istnieć tak niska temperatura, najniższa możliwa, że nie ma żadnej możliwości, aby z ciała o tej temperaturze pobrać choć trochę ciepła.

Dużo wcześniej niejaki **Guillaume Amontons** francuski fizyk i wynalazca, o którym warto by powiedzieć więcej, badając ciśnienie ogrzewanych i chłodzonych gazów, wyprzedzając mniej więcej o 100 lat swojego rodaka **Josepha Louisa Gay-Lussaca** zauważył, że można by tak ochłodzić gaz, aby ciśnienie spadło do zera. Dalej spadać by nie mogło, więc osiągnięta tak temperatura byłaby zerem bezwzględny. Szacował jej wielkość na -240°C . Niektórzy znajdują w rozprawie „*Réflexions sur la puissance motrice du feu*” samego Carnota, wartość -267°C , ale to chyba nieporozumienie.

W międzyczasie Joule badał zmienną ciepła i energii mechanicznej kręcąc korbką swojego genialnego młynka, a Thomson, ciągle jeszcze zwolennik koncepcji Carnota i Clapeyrona, w swoim opisie koncepcji temperatury absolutnej opublikowanym w Philosophical Magazine w 1848 roku „*On an Absolute Thermometric Scale founded on Carnot's Theory of the Motive Power of Heat, and calculated from Regnault's Observations*” (O bezwzględnej skali termometrycznej opartej na teorii siły napędowej ciepła Carnota i obliczonej na podstawie obserwacji Regnaulta) napisał, że „*zamiana ciepła (lub kalorii) na efekt mechaniczny jest prawdopodobnie niemożliwa, z pewnością nieodkryta*” – Philosophical Magazine, (1848) W. Thomson, Mathematical and Physical Papers, 1, 100 (Cambridge University Press, 1882), ale w przypisie zasygnalizował swoje pierwsze wątpliwości, co do teorii kalorycznej, odwołując się do „*bardzo niezwykłych odkryć*” Joule’a.

Warto tu zauważyć, że to co miał na myśli Thomson (ciepło w kalorycznym modelu „wodospadu”) nie było tym samym, co badał Joule i może stąd to nieporozumienie i nasze jego niezrozumienie. W roku 1851 Thomson pisał już, że istnieją dwie podstawowe koncepcje „siły napędowej ciepła” i nie wyróżniał żadnej z nich. Wymiana myśli i dyskusje nad pracami doświadczalnymi Joule’a doprowadziły, poza wykryciem efektu zwanego **efektem Joule’a-Thomsona**, do powstania i późniejszego tryumfu kinetycznej teorii ciepła. Jednym z kamieni milowych do drogi do niego było sformułowanie przez niego **Drugiej Zasady Termodynamiki** w roku 1851:

„Niemożliwe jest, za pomocą nieożywionego pośrednictwa materialnego, wyprowadzenie efektu mechanicznego z jakiegokolwiek porcji materii poprzez schłodzenie jej poniżej temperatury najzimniejszego z otaczających ją przedmiotów”.

[„*On the Dynamical Theory of Heat, with numerical results deduced from Mr Joule's equivalent of a Ther-*

mal Unit, and M. Regnault's Observations on Steam”. Transactions of the Royal Society of Edinburgh. XX (part II) 261; 289; <http://https://archive.org/details/londonedinburghp04maga/page/8/mode/2up>].

W roku 1854 niemiecki fizyk **Rudolf Julius Emanuel Clausius** (urodzony w Koszalinie!) wyraził to samo prościej:

„Ciepło nigdy nie może przejść z ciała zimniejszego do cieplejszego bez jakiejś innej, związanej z nim zmiany, zachodzącej w tym samym czasie.”

[Clausius, R. (1854). „*Ueber eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie*”. Annalen der Physik und Chemie. 93 (12): 481. doi:10.1002/andp.18541691202.]

co później doprowadziło go do wymyślenia entropii i najkrótszego chyba sformułowania Drugiej Zasady Termodynamiki:

„Entropia Wszechświata dąży do maksimum”

[Clausius, R. (1867). „*The Mechanical Theory of Heat – with its Applications to the Steam Engine and to Physical Properties of Bodies*”. <https://archive.org/details/mechanicaltheor04claugoog/page/n5/mode/2up>]

W sumie tak czy inaczej rozumiana zasada ta pociąga za sobą nieodwołalnie katastrofalne skutki. Oczywiście nie tylko dla Clausiusa, czy Thomsona, ale dla całego świata: Wszechświat nie może trwać i trwać. Musi skończyć się, tak czy inaczej i niewątpliwie na końcu czeka go **termodynamiczna śmierć**. Wszelkie źródła ciepła (w tym i nasze Słońce) oddając swoje ciepło chłodniejszemu otoczeniu muszą doprowadzić do tego, że temperatury wszystkiego wyrównają się. Nastąpi ogólnowszechświatowa równowaga termodynamiczna wszystkiego ze wszystkim i nie będzie już niczego, co zapewniłoby jakikolwiek ruch (silnikom ciepłym – i w sumie także nam samym). Te przykre konsekwencje Thomson ogłosił w roku 1862 i nazwano je **paradoksem termodynamicznym**

Poza wskazanymi wyżej wybitnymi osiągnięciami w budowaniu obowiązującej dziś kinetycznej teorii ciepła Thomson był aktywny na wielu polach, na których nawet krótkie omówienie brakuje już miejsca. Wspomnijmy tu jedynie tytuły honorowe, jakie pojawiły się na samym początku tego tekstu przy jego nazwisku:

- OM, „Order of Merit” nagroda brytyjskiego Monarchy, ciekawostką jest, że liczba żyjących odznaczonych jest ograniczona z zasady do 24.
- RVO, „Royal Victorian Order”, order ustanowiony przez (oczywiście) Królową Wiktorię przyznawany za wybitne zasługi zasadniczo dla Monarchy i jego najbliższego otoczenia.
- PC, „Privy Council” tytuł oznaczający przynależność do honorowego grona najwyższych prywatnych doradców jej Królewskiej Mości.
- FRS, „Fellowship of the Royal Society” odznaczenie przyznawane przez członków Towarzystwa

Królewskiego osobom, które wniosły znaczący wkład w poszerzenie wiedzy przyrodniczej.

- FRSE, „Fellowship of the Royal Society of Edinburgh”, jak wyżej, z tym, że przyznaje je szkockie Towarzystwo Królewskie z Edynburga.

No a poza tym William Thomson otrzymał w roku 1882 tytuł **Pierwszego Barona Kelvin** i jako pierwszy naukowiec został z tego tytułu członkiem Izby Lordów. Dziś pamiętamy go jako Lorda Kelvina z Largs w hrabstwie Ayr.

Od roku 1968 jednostką temperatury w układzie SI jest oficjalnie zgodnie z uchwałą nr 4 XIII Ogólnej Konferencji Miar (*General Conference on Weights and Measures*) najwyższych władz Międzynarodowego Biura Miar i Wag (*International Bureau of Weights and Measures*), **kelwin** nie stopień kelvina, tylko po prostu kelwin, (**K**)

Zgodnie z uchwałą numer 5 tej samej XIII Ogólnej Konferencji Miar

Kelwin to jednostka temperatury termodynamicznej, równa ułmkowi $1/273,16$ temperatury termodynamicznej punktu potrójnego wody.

Na XXVI Ogólnej Konferencji Miar przededefiniowano **kelwina** i jego aktualna (od 20 maja 2019 roku) definicja wynika z przyjętej jako bezwzględnie dokładną wartością stałej Boltzmanna

$$k = 1.380649 \times 10^{-23} \text{ J/K.}$$

Przy tej definicji temperatura punktu potrójnego wody to **273.1600±0.0001 K**. Praktycznie nic się nie zmieniło.

A Kelvin to tak naprawdę nazwa rzeczki przepływającej opodal laboratorium Wiliama Thomsona na Uniwersytecie w Glasgow.

Doświadczenie domowe:

Zero bezwzględne

A. Potrzebne materiały

1. Duża strzykawka z podziałką.



B. Narzędzia: termometr elektroniczny, suszarka do włosów, kubek z zimną wodą.

C. Kolejność czynności:

1. Wyciągnąć tłoczek ze strzykawki.
2. Włączyć suszarkę do włosów i używając termometru sprawdzić, jaką temperaturę ma wylatujące zeń powietrze.

3. Używając suszarki do włosów dmuchać do otwartej strzykawki gorącym powietrzem przez jakiś czas (co najmniej minutę).
4. Szybko włożyć tłoczek do strzykawki niezbyt głęboko i zanotować jego położenie używając podziałki na strzykawce.
5. Szybko zanurzyć otwarty koniec strzykawki w kubku z zimną wodą.
6. Począkać, aż powietrze w strzykawce ochłodzi się do temperatury pokojowej (takiej jaką ma woda w kubku).
7. Wyjąć strzykawkę z kubka i szybko odwrócić.
8. Odczytać na podziałce, ile wody się nalało (o tyle zmniejszyła się objętość powietrza w strzykawce jego po ochłodzeniu).
9. Pomiar powtórzyć dla pewności.

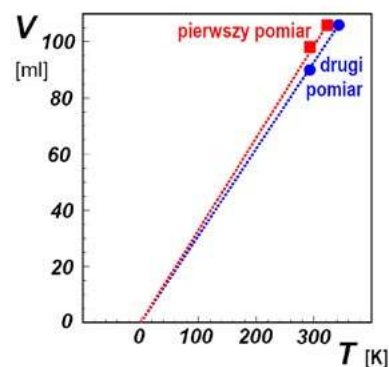
Przykładowe wyniki pomiarów pokazane są w tabelce:

Temperatura z powietrza suszarki (T_1)	T_1 w kelwinach	Temperatura powietrza po ochłodzeniu (T_2)	T_2 w kelwinach	Objętość początkowa (V_1)	Objętość wody jaka się dostała do strzykawki po ochłodzeniu	Objętość powietrza po ochłodzeniu (V_2)
50°C	323 K	20°C	293 K	106* ml	8 ml	98 ml
70°C	343 K	20°C	293 K	106 ml	16 ml	90ml

* te 6 ml to nasze oszacowanie objętości zawartej w „dziubku” (końcówce) strzykawki

Wyniki te można też przedstawić na wykresie.

Linie na rysunku łączą punkt ($V=0$, $T=0$) z punktem (V_1 , T_1). Jak widać punkty (T_2 , V_2) leżą prawie dokładnie na tych liniach, co w dużej mierze jest kwestią przypadku, bo pomiary z natury rzeczy były bardzo niedokładne i nie należy przywiązywać do nich dużej wagi.



Magnetyzm Słońca

Andrzej Wasiak

Oddziaływanie plazmy z polem magnetycznym

Gdy przeanalizujemy dwie wzajemnie powiązane reguły rządzące oddziaływaniem między polem a prądem, dostrzeżemy jak skomplikowane są warunki panujące w plazmie, którą możemy przemieszczać. Wszak jest ona cieczą lub gazem i nie powinniśmy mieć kłopotu z jej poruszeniem. Zwrócimy jednak uwagę na to, że plazma również przewodzi prąd. A zatem przesuwając plazmę, przesuwamy przewodnik względem pola magnetycznego. Oznacza to, że w przewodniku, a więc także w plazmie, powstaje prąd. Generuje on nowe pole magnetyczne, wnoszące dodatkowy wkład do pola już istniejącego. Gdy plazma się porusza, ma to wpływ na pole magnetyczne.

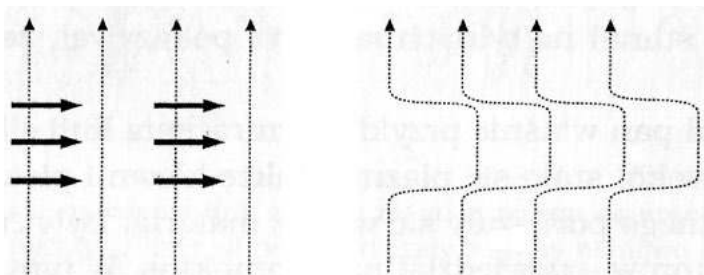
Na pierwszy rzut oka wydaje się, że nie da się przewidzieć, jak zmieni się pole magnetyczne. Istnieje jednak prosta reguła pozwalająca stwierdzić, nawet w przypadku splątanych pól magnetycznych i skomplikowanych prądów, jak zmieni się pole magnetyczne w plazmie. Pomoże to nam pojęcie linii sił pola magnetycznego. Najpierw uprościmy nasze rozważania przyjmując, że plazma jest nieskończenie dobrym przewodnikiem prądu elektrycznego.

Jak wiadomo, każdy przewodnik stawia określony opór przepływowi prądu elektrycznego. Zakładamy więc na wstępie, że nasza plazma jest dobrym przewodnikiem prądu.

Wmrożone linie pola magnetycznego

Zacznijmy od prostego przykładu z polem magnetycznym, którego linie sił przebiegają prostoliniowo z dołu do góry przez plazmę, będącą jednorodnym gazem przewodzącym prąd elektryczny. Przesuńmy w bok jedną z jej warstw, jak pokazano na rys. 1. Za pomocą poziomych, czarnych strzałek.

Jak już wiemy, w plazmie przepłyną wtedy prądy zmieniające pole magnetyczne. Jak to wygląda? Linie sił pola magnetycznego przesuwają się wraz z materią, tak jakby same były przesuwane. Linie sił pola są umocowane w plazmie! Dlatego noszą nazwę *wmrożonych* linii sił pola magnetycznego.

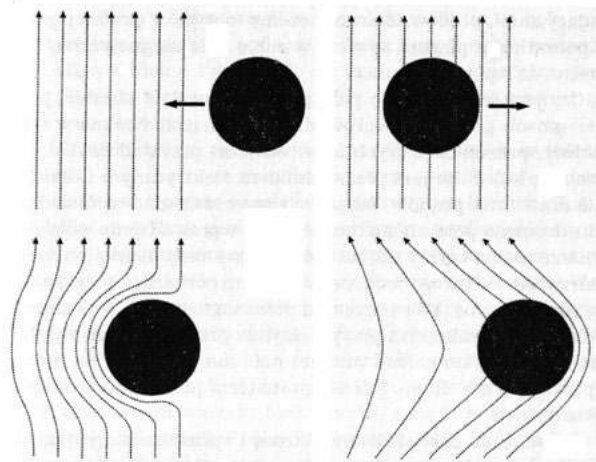


Rys. 1. Równoległe linie sił pola magnetycznego przebiegają przez plazmę. Nagle jej środkowa warstwa ulega przesunięciu w prawo (z lewej). Wmrożone w plazmie linie sił pola magnetycznego zostają wygięte w prawo przez przesuwającą się materię (z prawej).

Ścisłe wiąże się z tym inna cecha oddziaływania między plazmą a polem magnetycznym. Wyjaśnimy ją przeprowadzając kolejny eksperyment myślowy. Pomiedzy biegunami magnesu istnieje jednorodne pole magnetyczne. W pewnej odległości szybuje obłok plazmy, nieskończenie dobrze przewodzącej prąd elektryczny i praktycznie pozbawionej pola magnetycznego. Na lewej części rysunku 2. pokazano, co się wtedy stanie. Pole magnetyczne będzie wnikało do plazmy! Mówiąc bardziej przejrzyście, gdy przewodząca prąd elektryczny plazma zbliży się do pola magnetycznego, powstają w niej prądy generujące nowe pole magnetyczne, które oddziałując z pierwotnym polem, powoduje takie wygięcie linii sił pola magnetycznego, jakie przedstawiono na ilustracji.

Można to wyrazić bardziej poglądowo. Jeżeli początkowo w plazmie nie ma pola magnetycznego, to później nie można go do niej wprowadzić. Prawdziwa jest również przeciwna zasada. Jeśli początkowo w plazmie istnieje pole magnetyczne, wzbudzone w dowolny sposób, nie może ono z plazmy zniknąć. Gdyby na przykład pole z jakichś powodów osłabło, natychmiast w plazmie zaczęły płynąć prądy dążące do wzmocnienia pola. W nieskończenie dobrze przewodzącej plazmie nie istnieje żaden czynnik powodujący zanik prądów. Znowu możemy to wyrazić prościej, jeżeli początkowo plazma zawiera w sobie pole magnetyczne, nie można go usunąć.

Czy jest sens mówić o polu magnetycznym w plazmie, jeśli nie w sposób go do niej wprowadzić z zewnątrz? Nie ma w tym żadnej sprzeczności. Wyobraźmy sobie na przykład zwykłe powietrze, które nie jest przewodnikiem elektrycznym i dlatego nie ma w nim prądów, mogących przeciwdziałać wprowadzeniu do niego pola magnetycznego. Po wprowadzeniu pola można ogrzać powietrze tak silnie, że jego atomy ulegną jonizacji. Gdy przyjmiemy założenie w tej sytuacji, że powstała plazma jest doskonałym



Rys. 2. Zjawisko wmrożenia linii sił pola magnetycznego. Z lewej: przy próbie bąbła plazmy w pole magnetyczne linie sił ulegają wygięciu i omijają plazmę. Z prawej: przy próbie wyciągnięcia bąbła plazmy z pola magnetycznego linie sił pola podążają za plazmą, ponieważ są w niej wmrożone.

przewodnikiem prądu elektrycznego, pole magnetyczne nie może jej opuścić tak długo, jak materia pozostanie w stanie plazmowym.

Dotychczas poruszaliśmy plazmą i sprawdziliśmy, jak reaguje na to pole magnetyczne. Doprowadziło to nas do koncepcji wmrózonego pola magnetycznego. Jeżeli plazma się nie poruszała, linie sił pola zostały nienaruszone. Gdy plazma się poruszała, linie sił pola podążały za nią. Ponadto, jeżeli początkowo pole magnetyczne plazmy nie przenikało, nie mogło być one w nią wprowadzone.

Nieskończenie dobre przewodnictwo to idealizacja, zastosowana przez nas, by zapoznać się z najważniejszymi własnościami plazmy. Mimo to niektóre cechy takiej plazmy można odnaleźć, przynajmniej w pewnym zakresie, nawet w przewodnikach spotykanych w życiu codziennym.

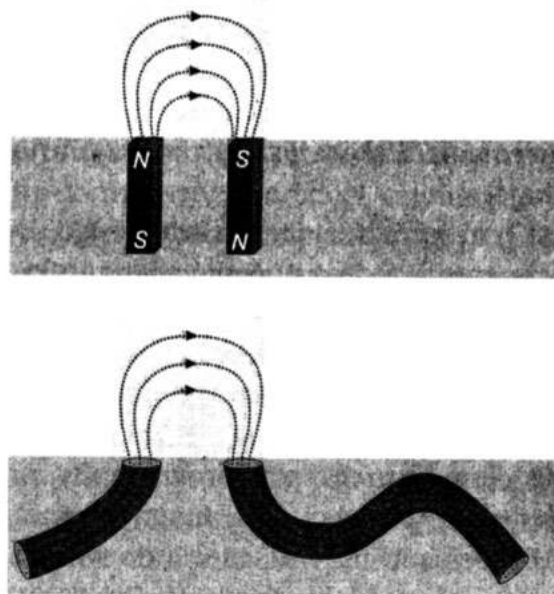
Gdy próbujemy umieścić miedziany sześciąt o boku długości 10 cm w silnym polu magnetycznym, linie sił pola magnetycznego, nie wnikają natychmiast do jego wnętrza. Przeciwdziałają temu pola magnetyczne prądów elektrycznych, które powstają w miedzi. Potrzeba około jednej sekundy, by te prądy zanikły i zewnętrzne pole przeniknęło do wnętrza sześciąt. Taka sama sytuacja zachodzi wtedy, gdy nagle wyjmujemy sześciąt z pola magnetycznego. Znowu powstają w nim prądy, tym samym dążące do wiązania pola magnetycznego w bryle. Kiedy chcemy nagle wyjąć blok miedziany z pola magnetycznego, linie sił pola podążają za nim i przez około jedną sekundę pozostają w bloku. Przez około sekundę pole magnetyczne jest wmrózone w sześciąt. Potem prądy podtrzymujące istnienie tego pola zanikają.

Efekt ten jest tym wyraźniejszy, im większego użyjemy bloku z miedzi. Gdy chcemy z grubsza ocenić czas zaniku pola, możemy zastosować prostą regułę: dwukrotne powiększenie boku sześciąt powoduje czterokrotne powiększenie czasu życia pola magnetycznego. Wyobraźmy sobie eksperyment przeprowadzony z blokiem o boku jednego metra. Pole magnetyczne potrzebować będzie około 100 sekund na wniknięcie do wnętrza i tyle samo sekund trzeba by pole w bloku zanikło. Sto sekund to niemal dwie minuty. Im większy jest blok miedzi, tym dłuższy jest czas wnikania i zaniku pola. Wyobraźmy sobie blok wielkości Ziemi. Odpowiadające temu czasy wynoszą ponad 100 milionów lat. Jak widać, prawa rządzące wmrózeniem linii sił pola są poprawne także w warunkach zwykłego przewodnictwa, jeżeli wchodzą w grę astronomiczne rozmiary.

Wmrózone pole magnetyczne w plamach słonecznych

Średnie przewodnictwo materii na Słońcu jest mniej więcej takie samo, jak w naszym bloku miedzianym. Ponieważ średnica Słońca wynosi około 1,4 miliona kilometrów, czas zaniku pól magnetycznych na Słońcu przekracza 4,6 miliarda lat, co odpowiada naszym ocenom jego wieku. Wszelkie dostrzeżone przez nas zmiany pól magnetycznych na Słońcu nie są w żadnym wypadku związane z polem magnetycznym obejmującym całe Słońce.

Stosując naszą regułę do plam słonecznych rozciągających się na stosunkowo niewielkich obszarach, możemy nauczyć się czegoś o czasach zaniku pól magnetycznych



Rys. 3. Tak można sobie wyobrazić pole magnetyczne pary plam słonecznych.

w plazmie. Duża plama słoneczna może mieć średnicę sięgającą 30 tysięcy km. Nawet znając jedynie w przybliżeniu wartość liczbową przewodnictwa elektrycznego, wyliczymy, że pole magnetyczne w plazmie plamy zanika najpóźniej w ciągu kilku lat. Plamy słoneczne pojawiają się i zanikają w krótszych okresach. Dlatego też musimy przyjąć, że pole magnetyczne w plamie słonecznej istnieje na długo przedtem, zanim plama zostanie widoczna, a także, że istnieje ono długo po zaniku plamy. Plama słoneczna musi być jedynie manifestacją znacznie dłużej istniejącej, niewidocznej struktury magnetycznej.

Jeśli pola magnetyczne plam słonecznych istnieje dłużej niż plamy, to gdzie znajdują się one przed powstaniem plam oraz ich zaniku? Z obserwacji Słońca wynika, że plamy słoneczne występują parami, oraz stwierdzono, że każda plama tworząca parę ma przeciwną polaryzację magnetyczną. Nasunęło to badaczom Słońca pomysł, że pola magnetyczne plam słonecznych przez większość czasu pozostają ukryte w horyzontalnie rozciągających się *sznurach* czy *rurach*, leżących pod powierzchnią Słońca. Przyjmijmy, że pod powierzchnią Słońca znajduje się pole magnetyczne, którego linie nie są jednorodnie rozłożone w plazmie, lecz skrzyły się w coś w rodzaju *sznura* magnetycznego (rys. 3.).

Gdy pętla sznura osiągnie powierzchnię Słońca, naturalnie wraz z zawartą w niej plazmą, linie sił pola mogą przebić tę powierzchnię i wejść w leżące wyżej warstwy atmosfery. Część materii zawartej w pętli spływa z powrotem wzdłuż linii sił pola. Samo zaś pole rozprzestrzenia się wysoko w atmosferę. Tam wypiera plazmę atmosferyczną, zastępując ją swoją własną plazmą, pochodzącą z głębszych warstw. W miejscach, gdzie sznur wychodzi z powierzchni Słońca i gdzie do niej powraca, widoczna jest para plam słonecznych o przeciwnych polaryzacjach, albo w jednym miejscu linie sił pola skierowane są na zewnątrz, a w drugim miejscu do wnętrza Słońca. To, że plamy słoneczne mogą się pojawiać parami, mając przeciwne polaryzacje, zgadza się z modelem sznura magnetycznego.

Dlaczego jednak plamy słoneczne wydają się ciemne? Otóż między polem magnetycznym i plazmą zachodzi pewne oddziaływanie, o którym dotychczas nie mówiliśmy.

Siła pola magnetycznego

Pomińmy na chwilę w lewej części rysunku 2. Usiłowaliśmy wprowadzić je w pole magnetyczne. Odczuwalismy przy tym opór, tak jakby pole magnetyczne odpychało obce ciało. Przyczyną tego jest siła wywierana przez pole magnetyczne. Właśnie dzięki tym siłom pola magnetyczne zostały odkryte.

Gdy pomyślimy, jak różne mogą być pola magnetyczne, niemal niemożliwe wydaje się przewidzenie kierunku, w którym pole pociągnie lub popcha plazmę. Na szczęście znowu istnieje prosta wskazówka.

Wyobraźmy sobie linie sił pola magnetycznego jako naciągnięte gumowe włókna, które chcą się skurczyć. Wyjaśnia to między innymi, dlaczego przyciągają się przeciwne bieguny magnetyczne. To jeszcze nie wszystko. Linie sił pola nie tylko usiłują się skrócić, lecz także wzajemnie się odpychają. Powróćmy do doświadczenia, w którym kula plazmowa poruszała się w polu magnetycznym. Na rys. 2. (lewa, dolna część) zaznaczono przebieg linii sił pola po wsunięciu plazmy w obszar występowania pola. Pole składa się teraz z nieodkształconego (liniowego) pola, oraz dodatkowego pola, wygenerowanego przez prądy powstałe w plazmie w momencie jej wsuwania. Wiemy już, dlaczego zachodzi takie zjawisko. Mówi o tym reguła wmrózenia linii sił pola. Ponieważ linie sił pola nie mogą wnikać do plazmy, owijają się wokół nieprzespionego intruza.

Na lewo od plazmy linie sił pola zagęszczają się. Z jednej strony dążą do zmniejszenia swojej długości, a z drugiej są odpychane od plazmy. Oba te czynniki wywołują siłę skierowaną w prawo i pole działa przeciwko ruchowi intruza. Korzystając z modelu rozciągniętych włókien gumowych, które dążą do skurczenia się, a jednocześnie wzajemnie się odpychają, możemy zupełnie dobrze przewidzieć siłę pola magnetycznego działającego na plazmę.

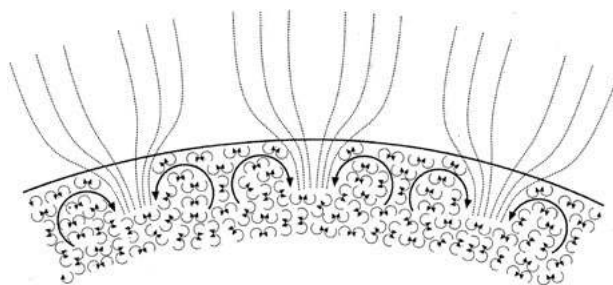
Siły magnetyczne w plamach słonecznych

Wiemy już, jak wmrózone pola magnetyczne podążają za materią oraz jak plazma określa sposób przekształcania pola magnetycznego. Oczywiście jest również to, że pola magnetyczne mogą za pośrednictwem swej siły decydować o ruchach materii. Co dominuje w plazmie: materia czy pole?

W zasadzie możliwe są dwie sytuacje. Gdy pole magnetyczne jest słabe, słaba jest również jego siła. Materia podnosi się niezależnie od pola magnetycznego, a wzmożone pole bezwzględnie podąża za materią. Gdy jednak pole magnetyczne jest mocne, siły magnetyczne decydują o przebiegu wydarzeń i materia musi podążać za polem magnetycznym. W przyrodzie zachodzą obie te sytuacje.

Sytuacja, w której pole magnetyczne decyduje o przebiegu wydarzeń, występuje w plamach słonecznych. Wewnątrz Słońca energia generowana w jego jądrze jest transponowana poprzez kolejne warstwy, ku powierzchni, za pomocą skłębionych ruchów materii słonecznej, odpowiedzialnych za powstanie granulacji. (Obserwowana powierzchnia Słońca jest pokryta granulacjami).

W plamach słonecznych pole magnetyczne jest jednak tak silne, że to ono decyduje, jak porusza się materia. Kształt linii sił pola magnetycznego jest określany jedynie



Rys. 4. Zachodzące przy powierzchni Słońca horyzontalne ruchy materii w supergranulach przesuwają wmrózone w plazmę linie sił pola. Linie ulegają zagęszczeniu w miejscach, gdzie materia zanurza się, a więc na krawędziach komórek supergranul. Ruchy materii oznaczone są kolistymi strzałkami: krótsze symbolizują granulację, dłuższe zaś supergranulację. W środku komórek supergranulacji, tam gdzie materia się wznosi, linie sił pola nie występują. Dlatego właśnie układ komórek supergranulacji na Słońcu pokrywa się z rozkładem pól magnetycznych siatek.

przez naszą regułę włókien gumowych: jak najkrótsze i jak najbardziej odległe od siebie. Każda zmiana ich przebiegu wywołuje powstanie dużej siły. Stąd też konwektywny ruch w plazmie słonecznej jest znacznie osłabiony. W przeliczeniu na jednostkę powierzchni dociera tam znacznie mniej energii i dlatego temperatura plam jest niższa. Właśnie dlatego plamy słoneczne wydają się nam ciemne.

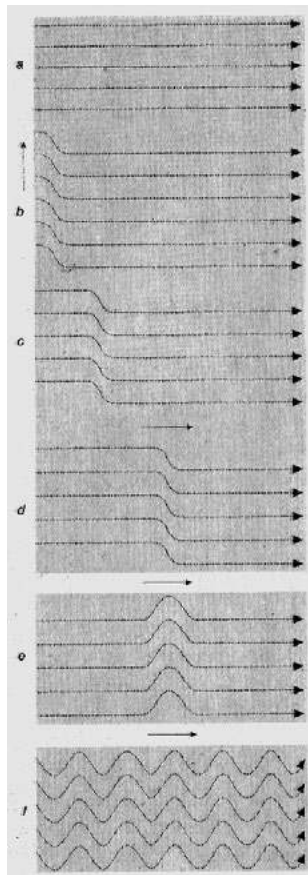
Nie zawsze pola magnetyczne są na tyle silne, by uniemożliwić, bądź też przynajmniej ograniczyć, ruchy materii. Jak też wiemy, na Słońcu występują zarówno wielkie plamy, jak i efemeryczne obszary, których nie można zaobserwować w świetle widzialnym. W tym przypadku pola magnetyczne są tak słabe, że wędrują razem z materią.

Potrąfimy już też wyjaśnić, dlaczego pola magnetyczne są szczególnie silne na brzegach komórek supergranulacji. Schemat przedstawiono na rys. 4. Materia porusza się horyzontalnie w komórkach supergranulacji przy powierzchni Słońca wnoszą za sobą słabe pola magnetyczne. Na brzegach komórek, tam gdzie materia zanurza się w głąb Słońca, linie sił pola ulegają koncentracji. W ten sposób powstaje siatka magnetyczna.

Fale Alfvéna

W roku 1970 szwedzki fizyk Hannes Alfvén otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki. W ten sposób uhonorowano badacza, dzięki któremu lepiej zrozumiano własności plazmy. Jego największym odkryciem było stwierdzenie, że w plazmie, w której zawarte jest pole magnetyczne, może występować pewien szczególny rodzaj ruchów falowych, niepojawiający się w zwykłych cieczech i gazach.

Aby zrozumieć to zagadnienie, wyobraźmy sobie plazmę z jednorodnym polem magnetycznym (rys. 5a.). Poruszamy ku górze pewnym fragmentem plazmy, na przykład pionową warstwą plazmy po lewej stronie rysunku (rys. 5b.). Linie pola podążają za nią i się wygną. Powstałe przy tym siły magnetyczne próbują przesunąć przemieszczony fragment plazmy do pozycji początkowej, a jednocześnie dążą do skrócenia linii magnetycznych po obu stronach przesuniętego fragmentu plazmy. W wyniku tego odkształcenia linii sił pola zaczyna wędrować na prawo (rys. 5c. i 5d.). Jeżeli warstwa plazmy nie tylko uległa przesunięciu, lecz powróciła do swojego pierwotnego położenia, na prawo pobiegł grzbiet fali (rys. 5e.). Przy rytmicznym przesuwaniu warstwy w górę i w dół,



Rys. 5. Rozchodzenie się fal wzdłuż linii sił pola magnetycznego (a) Początkowo linie sił pola magnetycznego przebiegają przez plazmę horyzontalnie i prostoliniowo. Gdy pionowa warstwa plazmy po lewej stronie powędruje ku górze, uniosą się również wmrzone w nią linie sił pola. (b), (c), (d) Odształcenie linii sił pola rozchodzi się w prawo wzdłuż linii. (e) Gdy warstwa plazmy zostanie podniesiona, a następnie opadnie, wzdłuż linii sił pola pobiegnie w prawo grzebień linii. (f) Rytmiczne podnoszenie się i opadanie warstwy plazmy wywołuje ciąg fal biegnących w prawo. Są to fale Alfvéna.

na prawo pobiegnie ciąg fal. Są to tak zwane fale Alfvéna. Fale akustyczne rozchodzące się w atmosferze polegają na sprężaniu gazu i w czasie każdego drgnięcia na powietrza porusza się do przodu i do tyłu wzdłuż linii rozchodzenia się fali.

W przypadku fal Alfvéna materia porusza się w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali. Na rys 5. wygięcia linii pola przesuwają się w prawo, podczas gdy plazma porusza się w górę i w dół. Za ten nowy rodzaj fal odpowiedzialne są pola magnetyczne. Fale te nie występują w plazmie pozbawionej pola magnetycznego. Przekonał się wcześniej, że siatka magnetyczna, pokrywająca się z krawędziami komórek supergranulacji, powstaje w wyniku działania horyzontalnych

prądów materii, przenoszących w każdej z komórek pola magnetycznego ku krawędziom. Linie pola zgromadzone na obrzeżach komórek są przesuwane i odształcane przez wypływające i tonące masy gazów, biorących udział w ruchach konwektywnych. Do tego dochodzą też ruchy horyzontalne, prostopadłe do kierunku linii sił pola. Rozprzestrzeniają się one ku górze i ku dołowi wzdłuż linii sił pola pod postacią fal Alfvéna. Rozpatrzmy jedynie fale rozchodzące się ku górze. Docierają one do oddalania się od środka Słońca. Tam energia fal przekształca się w ciepło i podwyższa temperaturę dokładnie w tych miejscach, z których z powierzchni ku górze wybiega szczególnie dużo linii sił pola, a więc dokładnie na krawędziach supergranul.

Modele wmrzonego pola magnetycznego oraz fal Alfvéna pozwalają wyjaśnić, dlaczego komórki supergranulacji i komórki magnetyczne się pokrywają.

Dynamo słoneczne

Od co najmniej 2000 lat astronomów fascynuje aktywność słoneczna: najpierw pojawianie się i zanikanie plam słonecznych, potem ich struktura, protuberancje, zmiany zachodzące w koronie oraz rozbłyski powodujące zorze polarne i przerwy w łączności radiowej. Obecnie wiadomo, że cała aktywność słoneczna to wynik tego, że Słońce ma pole magnetyczne.

Gdy George Ellery Hale odkrył słoneczne pola magnetyczne, stało się jasne, że niemal wszystkie obserwowane na Słońcu zjawiska – nie tylko plamy i rozbłyski – lecz także protuberancje i inne struktury, widocznie jedynie w świetle niektórych linii widmowych – związane są z polami magnetycznymi.

Dziś jednak nie udało się dowiedzieć skąd pochodzi słoneczne pole magnetyczne, tak samo jak nie znamy pocho-

dzienia ziemskiego pola magnetycznego. Ponieważ jednak gaz we wnętrzu Słońca, jak i ciekłe jądro Ziemi są plazmą, dysponujemy jednak pewnymi wskazówkami na ten temat. Oszacowaliśmy już okresy zaniku pól magnetycznych na Słońcu oraz stwierdziliśmy, że pola magnetyczne w plamach słonecznych nie powstają i nie znikają wraz z nimi, ukrytych pod powierzchnią Słońca.

Wkrótce dowiemy się nie tylko o tym, w jaki sposób powstają rury magnetyczne, lecz także, dlaczego niekiedy wypływają na powierzchnię Słońca i tworzą tam pary plam słonecznych. W tym celu musimy się zapoznać z niektórymi własnościami plazmy.

Energia pól magnetycznych

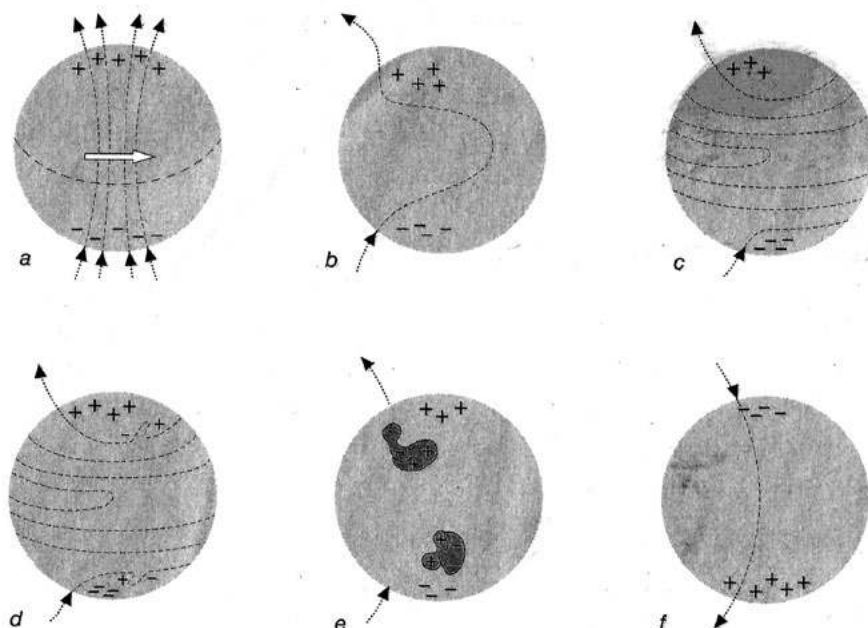
Gdy przesuwamy plazmę, to wmrzone linie sił pola magnetycznego ulegają wygięciu, co przedstawiono na początku artykułu. Linie sił musiały się przy tym wyciągnąć. Wiemy również, że w takim przypadku linie sił pola oddziałują na plazmę siłą dążącą do powstrzymania jej ruchu, gdyż tylko siłą możemy rozciągnąć gumowe włókna linii sił magnetycznych. Przemieszczając plazmę, musimy dostarczyć energię. Energia ta jest magazynowana w polu magnetycznym. Po oswobodzeniu plazmy pole przesunie gaz do pozycji wyjściowej. Im ciaśniej upakowane są gumowe włókna linii sił pola, tym więcej energii gromadzi się w polu magnetycznym, tym większa jest siła wywierana przez pole magnetyczne na plazmę w celu przywrócenia jego ulubionego stanu, w którym linie sił pola są jak najkrótsze i usytuowane jak najdalej od siebie.

Na Słońcu energia jest ciągle włączana w pole magnetyczne. Przyczyn tego należy upatrywać w sposobie obracania się Słońca.

Pole magnetyczne obracającego się słońca

Zalóżmy, że w Słońcu znajduje się pole magnetyczne, którego linie sił wychodzą w pobliżu jego bieguna północnego, zakrzywiają się daleko w przestrzeni i powracają do Słońca na biegunie południowym. Będziemy tu stosować następującą regułę: obszar, w którym linie sił pola magnetycznego wychodzą z powierzchni Słońca, uznajemy za północny biegun magnetyczny i oznaczamy literą N, podczas gdy region z wchodzącymi liniami sił pola oznaczamy jako biegun S. W przytoczonym przykładzie bieguny magnetyczne Słońca pokrywają się z jego biegunami na rys. 6. Po 11 latach bieguny magnetyczne zamieniają się miejscami. Ponadto linie sił pola mogą ulegać przełączeniu we wnętrzu Słońca, dlatego przyjmujemy dodatkowo, że nie sięgają one głęboko do wnętrza, lecz w miarę możliwości lokują się płytko pod jego powierzchnią. Początkowo zarówno, wewnątrz, jak i na zewnątrz słońca, linie pola rozciągają się wyłącznie w kierunku północ-południe, tak jak południki na kuli. Mówimy wtedy o polu południkowym (rys. 6a.). Co się dzieje, gdy Słońce wiruje?

Gdyby Słońce obracało się jak ciało sztywne, wmrzone pole magnetyczne obracałoby się wraz z nim. Słońce wiruje jednak w inny sposób. W czasie, w którym dowolny punkt



Rys. 6. Wyjaśnienie cyklu aktywności słonecznej. (a) Linie sił pola magnetycznego, wchodząc do wnętrza Słońca w pobliżu bieguna południowego i wychodząc w pobliżu bieguna północnego, pod powierzchnią Słońca przebiegają na wprost z południa na północ (linia przerywana). (b), (c) Szybszy obrót w pobliżu równika powoduje, że linie sił pola przebiegające pod powierzchnią Słońca. (d) W wyniku odkształcenia i naciągania, rośnie napięcie pola magnetycznego i niektóre fragmenty powstających rur magnetycznych wypływają na powierzchnię Słońca. Jak wiadomo, powstaje wtedy para plam słonecznych. W jednej z nich linie sił pola wychodzą ponad powierzchnię Słońca, w drugiej wchodzą do wnętrza Słońca. (e) Na półkuli północnej plama prowadząca ma polaryzację (+) i polaryzację magnetyczną, a plama następująca – polaryzację południową (-). Na półkuli południowej polaryzacja plam jest odwrotna. (f) W wyniku wciąż nie rozpoznanego mechanizmu, odwróceniu ulega polaryzacja okołobiegunowych pól magnetycznych i po wypłynięciu na powierzchnię wszystkich rur magnetycznych powstaje pole podobne do pola z rysunku (a), mające jednak odwrotną polaryzację. Sześć rysunków pokazuje jeden jedenastoletni cykl aktywności

znajdujący się na równiku wykona pełny obrót, punkt położony w pobliżu bieguna jeszcze nie zdąży wykonać pełnego okrążenia. Co to oznacza dla linii sił pola magnetycznego?

Ponieważ linie sił są wmurowane w materię, będąc rozciągane tak, jak pokazano na rys. 6b. i 6c. Rotacja różnicowa musi wykonać pracę, pokonując linie sił pola magnetycznego, ponieważ linie sił pola wydłużają się. Energia przekazywana jest do pola magnetycznego, które dzięki temu wzmacnia się. Stwierdziliśmy, że pod powierzchnią Słońca powstają rury magnetyczne, o których pisaliśmy przy omawianiu plam słonecznych. Po wielu obrotach Słońca pole magnetyczne, skryte pod jego powierzchnią, skierowane jest na wschód na półkuli północnej, a na zachód na południowej.

Wyobraźmy sobie, że z jakiegoś powodu wypłynęła na powierzchnię Słońca część pola magnetycznego, dotychczas ukryta w jego wnętrzu (rys. 6d.). Co wtedy obserwujemy? Zobaczmy dwa obrazy wynurzającego się, wzmocnionego pola magnetycznego, czyli parę plam słonecznych. Na rys. 6., na półkuli północnej linie sił pola wychodzą z plazmy poprzedzającej. Plama ma także polaryzację północną. Plama następująca ma zaś polaryzację południową, ponieważ linie sił pola powracają w niej do wnętrza Słońca. Na półkuli południowej zachodzi zjawisko odwrotne. Plama poprzedzająca ma polaryzację południową, a plama następująca – północną. Jak wiadomo wcześniej, dokładnie to zjawisko zaobserwował Hale.

Właściwie uchyliliśmy rąbka tajemnicy odkrywającej cykl magnetyczny Słońca, ale jesteśmy jeszcze daleko od rozwiązania całej łamigłówki. Jeszcze nie wiemy, dlaczego rury magnetyczne ukryte pod powierzchnią Słońca wypływają. A przede wszystkim, z jakiej przyczyny słoneczne pole magnetyczne regularnie zmienia polaryzację. Zjawisko to wydaje się sprzeczne z naszą teorią wmurowanych linii sił pola.

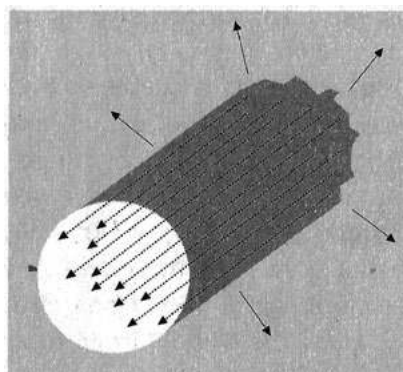
Pływalność magnetyczna

Dlaczego linie sił pola ukryte pod powierzchnią Słońca mogą wypływać ku górze, tworząc pary plam słonecznych? Otóż rury magnetyczne rzeczywiście pływają. Pod powierzchnią Słońca tkwi rura magnetyczna, czyli w pew-

nym cylindrycznym obszarze znajdują się linie sił pola, na zewnątrz niego pola nie ma (rys. 7.).

Ponieważ linie sił pola wzajemnie się odpychają, próbują powiększyć średnicę rury. Inaczej mówiąc, rura magnetyczna dąży do zwiększenia swojej średnicy, gdyż pole magnetyczne wywiera ciśnienie skierowane na zewnątrz. Plazma w rurze rozpręża się pod wpływem własnego ciśnienia oraz ciśnienia pola magnetycznego. Gdyby nie było pola magnetycznego, ciśnienie w rurze byłoby dokładnie równe ciśnieniu plazmy w jej otoczeniu, a ciśnienie wewnętrzne i zewnętrzne pozostałoby w równowadze. Teraz jednak ciśnienie wewnętrzne wzrosło o ciśnienie wytwarzane przez pole magnetyczne i rura magnetyczna nieco się rozděła. Z tego powodu gęstość materii w rurze jest trochę mniejsza niż w jego otoczeniu. Tak więc rura uzyskuje pływalność i unosi się ku powierzchni.

Na razie rozpatrywaliśmy przypadek pojedynczej rury magnetycznej w otoczeniu bez pola magnetycznego. W opisanym wcześniej modelu linii rozciąganych i zakrzywionych pod powierzchnią Słońca mamy całą warstwę magnetyczną, w której nie ma wyizolowanych rur magnetycznych. Jednakże ruchy materii związane z granulacją i supergranulacją ustawicznie przemieszczają skrócone linie pola. Wystarczy takie pchnięcie, by część rury magnetycznej została przesunięta ku górze, zaczynając wypływać coraz wyżej. Choć linie pola są przy tym nieco rozciągane, nie ma to większego znaczenia,



Rys. 7. Rura magnetyczna pod powierzchnią Słońca. Ponieważ linie pola wzajemnie się odpychają, pole magnetyczne wywiera ciśnienie na otaczającą je plazmę i dąży do zwiększenia średnicy rury. Aby rura magnetyczna pozostała w równowadze hydrodynamicznej z otoczeniem, ciśnienie gazu w rurze musi być niższe niż w jej otoczeniu. Jeżeli temperatura materii w rurze i na zewnątrz jest taka sama, to gęstość materii w rurze musi być niższa niż gęstość materii w jej otoczeniu (wówczas rura uzyskuje pływalność).

plywalność jest większa niż siła wywierana przez linie sił pola i dążące do powstrzymania wypływania rury.

Wygląda na to, że rozwiązaliśmy zagadkę plam słonecznych. Powstają one wtedy, gdy rury magnetyczne są wynoszone dzięki plywalności ku powierzchni Słońca. Pojawienie się pierwszych plam należących do nowego cyklu na dużych szerokościach oraz jedenastoletni okres wędrówki sfer występowania plam należących do nowego cyklu. Niestety, efemeryczne obszary powstające jednocześnie z plamami słonecznymi, ale na większych szerokościach i z przeciwną polaryzacją, burzą ten piękny model.

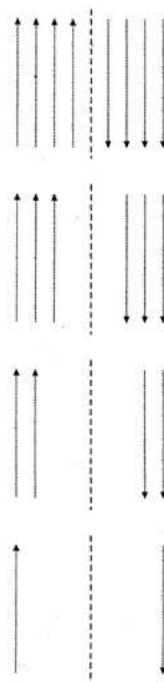
Nawet jeśli pominiemy trudności związane z owymi obszarami, nadal nie będziemy rozumieć, dlaczego wszystkie zjawiska magnetyczne zmieniają swoją polaryzację w jedenastoletnim rytmie. Możemy powiedzieć, że początkowe, słabe, południkowe pole magnetyczne skręca się, wzmacnia i dzięki plywalności magnetycznej tworzy pary plam słonecznych. Lecz co się dzieje później? Aktywność Słońca w ciągu 11 lat sugeruje, że kolejny cykl magnetyczny rozpoczyna się, podobnie jak poprzedni, od pola południkowego, tym razem jednak o przeciwnej polaryzacji. Pod koniec cyklu pole magnetyczne jest ciasno nawinięte. Jak może powstać z niego nieskręcone pole południkowe, od którego mógłby rozpocząć się nowy cykl?

Można podkreślić, że opisujemy plazmę słoneczną w sposób bardzo uproszczony w stosunku do rzeczywistości. Przewodnictwo plazmy słonecznej nie jest nieskończone wielkie, a więc linie pola nie są całkowicie wzmrożone.

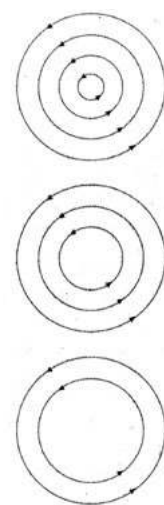
Zanikanie pól magnetycznych

Wyobraźmy sobie plazmę z polem magnetycznym, którego linie sił są okręgami. Wiemy już, w jaki sposób płynie prąd elektryczny generuje takie pole. Przepływa on przez środek okręgów, prostopadłe po powierzchni tworzonej przez linie sił pola magnetycznego. Elektrony nie mogą się poruszać w przewodniku całkowicie swobodnie. Nie zachowują się w nim niczym garść ziaren w próżni, łądując wiecznie po swoich orbitach, jeżeli tylko nie trafią na jakąś przeszkodę. Elektrony w plazmie ustawicznie zderzają się z jonami, które zakrzywiają ich drogi, a niekiedy nawet odrzucając je z powrotem. Ciągłe załamywanie drogi elektronów w plazmie sprawia, że są one wyhamowywane. Prąd elektryczny, które wytwarzają, ulega osłabieniu, a pole magnetyczne generowane przez ten prąd zanika. Oto przyczyna zaniku pola magnetycznego w bloku miedzi, gdy zostanie on odizolowany od otoczenia i pole nie jest podtrzymywane przez doprowadzany z zewnątrz prąd elektryczny. Wiemy już, że okres zaniku jest tym dłuższy, im większe są rozmiary bloku. Poznaliśmy już regułę, że dwukrotne powiększenie bloku czterokrotnie wydłuża okres zaniku pola.

Co się dzieje, gdy zanika pole magnetyczne? Czy siły magnetyczne po prostu słabną, czy też linie sił pola opuszczają ciało? Rozważmy najpierw pole przedstawione na rysunku 8, gdzie równoległe, proste linie sił pola o przeciwnych kierunkach przebiegają tuż obok siebie. Jak zanika takie pole? Badając szczegółowo przebieg zjawiska, stwierdzamy, że pole zmienia się najpierw tam, gdzie przeciwnie skierowane linie przebiegają najbliżej siebie.



Rys. 8. Anihilacja pól magnetycznych o przeciwnych polaryzacjach w plazmie, gdy przewodność elektryczna nie jest nieskończenie wielka.



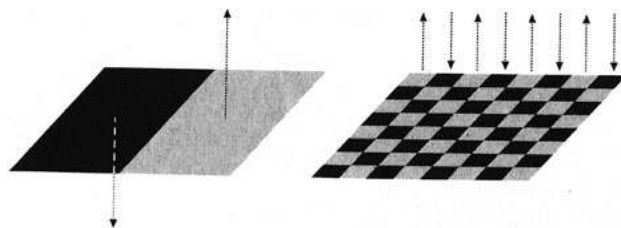
Rys. 9. Samozniszczenie kołowych linii sił pola magnetycznego w plazmie, gdy przewodność elektryczna nie jest nieskończenie wielka.

Wygląda to tak, jakby przeciwnie skierowane linie sił pola unicestwiały się, anihilowały wzajemnie, podobnie jak neutralizują się przeciwne ładunki elektryczne. Dlatego mówi się o anihilacji pól magnetycznych. Im bliżej siebie znajdują się przeciwne pola magnetyczne tym szybciej się unicestwiają.

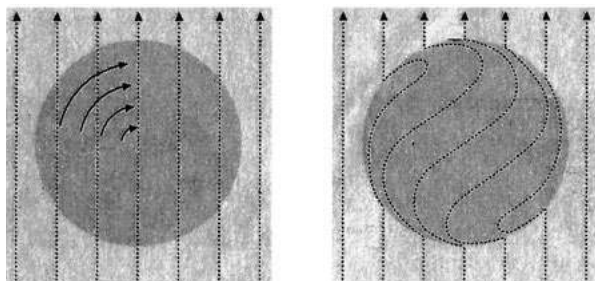
Zanik pól magnetycznych, mających linie sił w kształcie okręgów, także można rozpatrywać jako wzajemne unicestwianie się przeciwnie skierowanych pól. W punktach leżących na przeciwnych końcach średnicy okręgu pola magnetyczne są przeciwnie skierowane. Dlatego też, najpierw zanika pole wewnętrzne, bo tam odległość między przeciwnie skierowanymi polami jest najmniejsza i anihilacja przebiega najszybciej. Potem przychodzi kolej na pola, które tworzą okręgi o większych promieniach.

Jak oszukać czas zaniku?

Jeśli zastosujemy wobec Słońca regułę okalającą okres zaniku, podobnie rozpatrywaliśmy przypadek miedzianego bloku, otrzymamy okres daleko większy niż wiek Słońca. Jeżeli Słońce ma pole magnetyczne, musi ono istnieć od samego początku, a w dodatku nie może zanikać. Obecnie jednak obserwujemy, jak co 11 lat słoneczne pole



Rys. 10. Dwa obszary z polami magnetycznymi o przeciwnych polaryzacjach (z lewej) w wyniku poziomego przesunięcia tworzą szachownicę (z prawej). W obszarach jaśniejszych linie sił pola biegną ku górze, w ciemniejszych na dół. Ponieważ w prawej części rysunku pole magnetyczne o przeciwnych kierunkach znajdują się bliżej siebie niż z lewej, anihilują szybciej.



Rys. 11. Jeżeli cylinder plazmowy, przenikany przez linie sił pola magnetycznego, zostanie obrócony wokół osi (z lewej), wmrózone linie sił pola zostaną pociągnięte przez ruch plazmy i skrócone.

magnetyczne zmienia polaryzację. Zmiana polaryzacji oznacza, że stare pole zanika, a powstaje nowe. Zgodnie z naszą regułą, okres zaniku potrzeba na to milionów lat. Gdzie tkwi błąd?

Można „oszukać” równania opisujące okres zaniku. Przyroda postępuje tak bardzo często. Pokażemy teraz za pomocą prostego eksperymentu myślowego, w jaki sposób obejść okres zaniku.

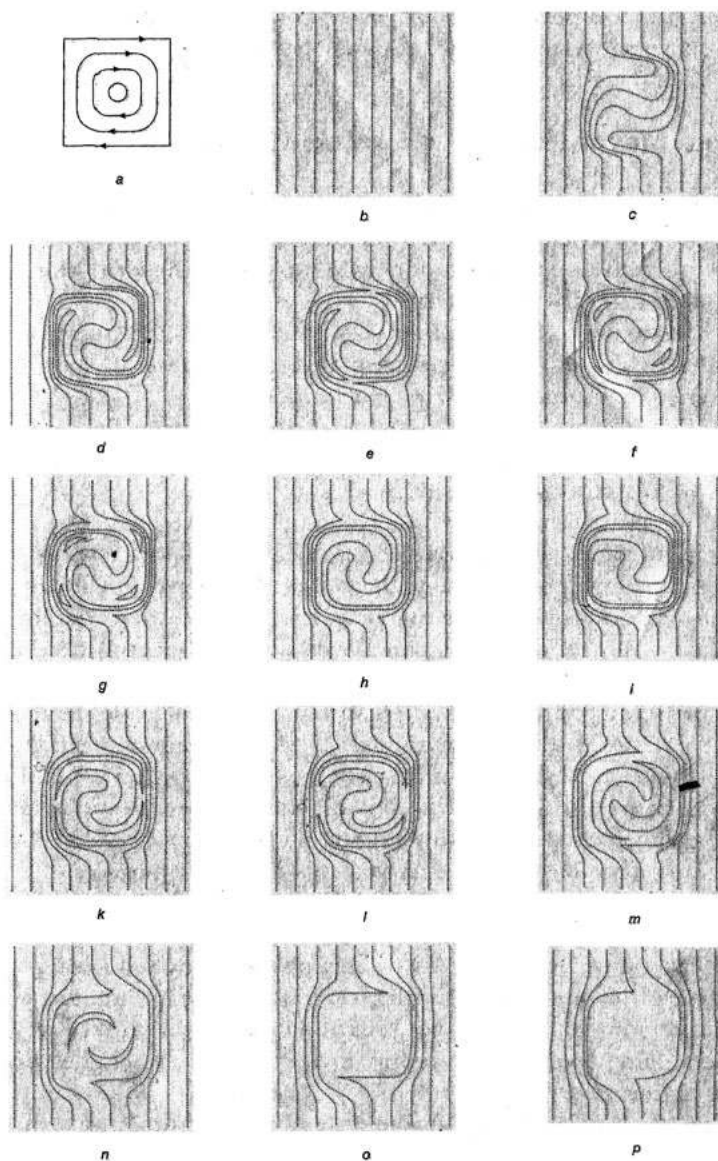
Załóżmy, że mamy dwa kwadraty o jednakowych polach, oba przenikają równoległe, proste linie sił pola. Linie sił pola jednego z kwadratów skierowane są ku górze, drugiego zaś ku dołowi (rys. 10.). Jak długo trwać będzie anihilacja tych pól? W pierwszej kolejności zostaną zniszczone pola, które znajduje się blisko linii rozdzielającej kwadraty. W jej pobliżu pozostanie obszar pozbawiony pola, stopniowo rozszerzający się na oba kwadraty. Jeżeli długość boków kwadratów wynosi kilometr, a przewodnictwo plazmy odpowiada przewodnictwu miedzi, minie kilka lat, zanim oba pola wzajemnie się unicestwią, ponieważ przeciwne pola są oddalone od siebie średnio o kilometr.

Możemy znacznie skrócić zaniku, gdy tak przesuwamy kolumny plazmy wraz z zawartym w niej polem magnetycznym, utrzymuje jego pionowy kierunek, z obu wyjściowych kwadratów powstanie coś w rodzaju szachownicy (prawa część rys. 10.). Aby dokonać tego, nie trzeba stosować żadnej siły, gdyż linie sił pola nie ulegają przy tym wydłużeniu ani też nie zbliżają się bardziej od siebie. Po zmianie uporządkowania okres zaniku ulega skróceniu. Przypomnijmy, że w obu kwadratach wydzieliliśmy po sto pól, a więc średnia odległość między jedną dziesiątą początkowej odległości. W tym przypadku okres zaniku równy jest jednej setnej okresu początkowego, czyli wynosi tylko kilka tygodni.

Każdy, kto chce doprowadzić do szybkiego zaniku pola magnetycznego w plazmie, musi jedynie zbliżyć do siebie linie pola o przeciwnej polaryzacji. Wtedy unicestwią się w czasie znacznie krótszych niż okres zaniku pola wyjściowego.

Linie pola same się rozplątują

W przyrodzie często zachodzi zjawisko wzajemnego niszczenia się pól magnetycznych. Wyobraźmy sobie linie sił pola rozciągające się w plazmie niczym nieskończenie długie, prostoliniowe spaghetti na talerzu. Jeżeli zaczniemy obracać widelcem w naszym „plazmowym spaghetti” skręcamy je w mniej lub bardziej zwartą bryłę, wciągającym przy każdym obrocie coraz więcej makaronu i ustawicznie rosnącą. Linie sił o przeciwnych zwrotach będą



Rys. 12. Kolejne etapy kształtowania się linii sił pola magnetycznego w plazmie

zbliżały się do siebie i anihilowały. Będą one poskręcane w mniej skomplikowany sposób.

Na rys. 12. Można zobaczyć, jak zachowują się linie w początkowej fazie skręcania. Jeżeli skręcanie trwa dłużej, linie sił pola zaczynają się wzajemnie unicestwiać. Pokazuje to bardzo poglądowo jedna z symulacji komputerowych, przygotowanych przez Nigela Weissa, heliofizyka z Cambridge. Rys. 12. Przedstawia kilka wybranych kadrów z tej symulacji.

Streszczenie

W powyższym artykule opisano pola magnetyczne istniejące w plazmie materii słonecznej oraz ich wzajemne oddziaływanie. Pola te są odpowiedzialne za wiele zjawisk zachodzących na powierzchni Słońca jak przede wszystkim plazmy słonecznej.

Andrzej Wasiak

LITERATURA

- [1] Rudolf Kippenhahn., Na tropie tajemnic Słońca, Prószyński i S-ka, Warszawa 1997.

Leo Szilárd,

fizyk który przewidział broń jądrową i sprzeciwił się jej użyciu

w 125 rocznicę urodzin i 90 rocznicę idei broni jądrowej

Kazimierz Mikulski

Urodzony na Węgrzech fizyk **Leó Szilárd** (1898-1964) jest najlepiej pamiętany jako pierwszy naukowiec, który zaproponował i wezwał do opracowania bomby atomowej, zanim później zmienił poglądy i zażądał powstrzymania prac nad nią. Jak wyjaśnia Istvan Hargittai¹, nie był to jedyny przypadek, gdy jego poglądy ewoluowały w nieoczekiwanych kierunkach. Wyjaśnia, dlaczego petycja Leo Szilárda o zaprzestanie bomb atomowych nie była jedyną zmianą jego poglądów.

Był złożoną postacią, która przewidywała globalny rozwój sytuacji politycznej na długo przed tym, zanim zrobili to zawodowi politycy. Rozważał długoterminowe implikacje nauki i analizował powiązania między odkryciami naukowymi, a wydarzeniami na świecie. Jednak w przeciwieństwie do wielu fizyków Szilárd aktywnie starał się wpływać na kierunek tych wydarzeń. Uważany jest za pierwszego naukowca, który systematycznie i planowo wspierał budowę bomby atomowej i broni jądrowej.

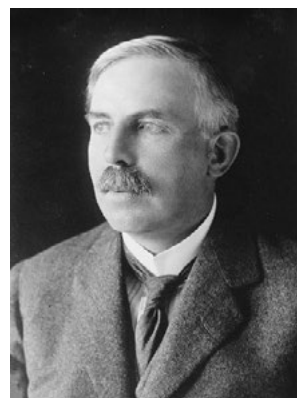
Narodziny idei

Według przekazów, idea nuklearnej reakcji łańcuchowej nasunęła się Szilárdowi, gdy 12 września 1933 r. czekał na świetłach przed „Southampton Row” w Bloomsbury w Londynie. Rozmyślał o artykule, który przeczytał w „The Times”. Gazeta informowała o przemówieniu wygłoszonym przez Ernesta Rutherforda, w którym przedstawił pomysł odrzucenia wykorzystania energii atomowej do celów praktycznych. Słynne powiedzenie Rutherforda brzmiało: „Każdy, kto szukał źródła mocy z transformacji atomów, mówił brednie”.² W czasie postoju na skrzyżowaniu Szilárdowi przyszła myśl. Otóż, gdyby pierwiastek chemiczny został zbombardowany neutronami, jądro mogłoby wchłonąć neutron, podzielić się na mniejsze części i wyemitować przy tym dwa neutrony. Te dwa neutrony mogłyby podzielić dwa kolejne jądra, uwalniając cztery neutrony. Kiedy światła zmieniły się, idea dla Szilárda stała się oczywista. **Zauważył on, że jeśli posiadamy wystarczającą ilość pierwiastka, możemy stworzyć trwałą jądrową reakcję łańcuchową, która może uwolnić ogrom-**



Fotografia 1. Leó Szilárd ok. roku 1960.

Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/1a/Leo_Szilard.jpg



Fotografia 2. Ernest Rutherford (1871-1937)

Źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Ernest_Rutherford#/media/Plik:Ernest_Rutherford_LOC.jpg

ne ilości energii. Przy odpowiedniej „masie krytycznej”, reakcja doprowadziłaby do wybuchu jądrowego.

Był świadomy wpływu badań naukowych i z przerażeniem zdał sobie sprawę, że droga jest otwarta dla nowej generacji niezwykle potężnych bomb. Pracując w tym czasie jako fizyk medyczny w St. Bartholomew's Hospital w Londynie, Szilárd rozważał, który pierwiastek mógłby zostać użyty w takim urządzeniu. Beryl był jednym z pomysłów. Jednak brak funduszy na badania uniemożliwił mu prowadzenie jakichkolwiek systematycznych poszukiwań. Zamiast tego złożył wniosek o „**patent na wywołaną neutronami jądrową reakcję łańcuchową**”, który w 1934 r. przedłożył brytyjskiej Admiralicji. Tym samym spróbował utrzymać pojęcie „bomby atomowej” poza zasięgiem szerokiej opinii publicznej.

Rok 1939 był w fizyce rokiem rozbicia jądra atomowego. Dokonali tego Otto Hahn (1879-1968) i Fryderyk Wilhelm Straßmann (1902-1980), którzy rozbili uran poprzez bombardowanie neutronami, otrzymując m.in. bar. Następnie Lise Meitner (1878-1968) i Otto Robert Frisch (1904-1979) słusznie rozpoznali to jako podział jądra atomowego. Szilárd dowiedział się o tym od swojego przyjaciela Eugene Wignera (1902-1995)³ w Princeton.

¹ Istvan Hargittai jest chemikiem fizycznym i emerytowanym profesorem na Uniwersytecie Technologii i Ekonomii w Budapeszcie na Węgrzech. Współautor *Brilliance in Exile: The Diaspora of Hungarian Scientists from John von Neumann to Katalin Karikó* <https://physicsworld.com/a/leo-szilard-the-physicist-who-envisioned-nuclear-weapons-but-later-opposed-their-use/?notification=onesignal>

² Reputacja E. Rutherforda jako jednego z największych fizyków eksperymentalnych w historii nie słabnie, a osiągnięcia naukowe – badania promieniotwórczości, które przyniosły mu w 1908 r. Nagrodę Nobla w dziedzinie chemii; odkrycie jądra atomowego w następnym roku oraz obserwacja pierwszej sztucznej reakcji jądrowej w 1917 r. – wyróżniają się nawet w epoce, która wydała na świat wielu wybitnych fizyków.

Swój własny pierwszy podział jądra przeprowadził razem z Walterem Zinnem (1906-2000) 3 marca 1939 r. w MET Labs na Columbia University. Jako źródło neutronów służył, kupiony na kredyt, rad. Następnie 2 grudnia 1942 r. Szilárd i Enrico Fermi (1901-1954)⁴, wywołali pierwszą reakcję łańcuchową w reaktorze.⁵

Ostatecznie, jądrowa reakcja łańcuchowa została odkryta w 1939 r. przez Frédérica Joliot-Curie (1900-1958) i współpracowników w Paryżu oraz przez dwie grupy z Columbia University w Nowym Jorku.

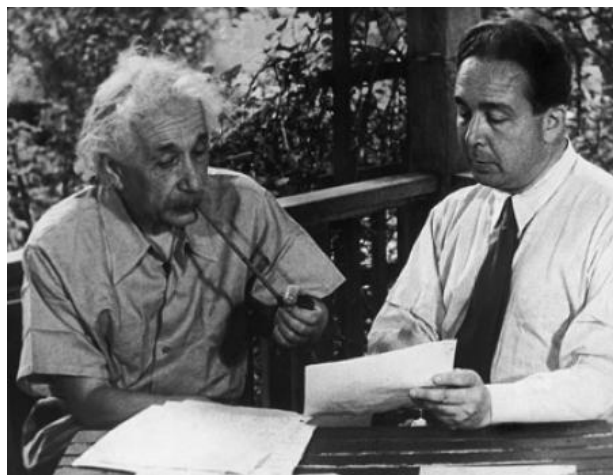
Prace nad bombą atomową

Szilárd zdał sobie sprawę, że neutrony uwolnione, gdy jądra uranu rozpadają się w wyniku rozszczepienia, mogą wywołać samopodtrzymujące się reakcje łańcuchowe potrzebne do realizacji bomby atomowej. Była to realna możliwość, a Szilárd odegrał kluczową rolę w jej rozwoju. W rzeczywistości dołączył później do Projektu Manhattan, w ramach którego alianci zbudowali bomby atomowe, zrzucone na Japonię w 1945 r.

Pomimo jego pozornie pronuklearnego stanowiska, stosunek Szilárda do tej broni był o wiele bardziej subtelny niż mogłoby się wydawać. Oprócz niego, uczestniczyli w tym projekcie trzej inni wybitni węgierscy uczeni: Edward Teller (1908-2003), John von Neumann (1903-1957) i Eugene Wigner (1902-1995). Sam Szilárd mówił ironicznie o „węgierskiej konspiracji”.⁶

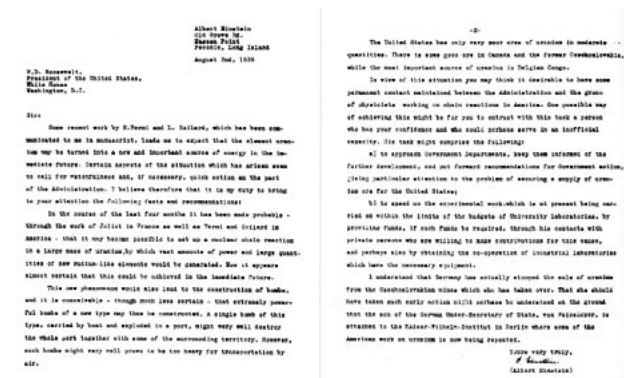
Chcąc zaalarmować władze USA, że Niemcy mogą pracować nad taką bronią, Szilárd przekonał Einsteina, który był wówczas w Instytucie Studiów Zaawansowanych w Princeton, do napisania do prezydenta Franklina Roosevelta. List, datowany na 2 sierpnia 1939 r., ostatecznie doprowadził do powstania Projektu Manhattan. Świadomy bezprecedensowej niszczycielskiej mocy broni nuklearnej, Szilárd chciał, aby świat dokładnie wiedział, jak niebezpieczne mogą być te urządzenia.

We wstępnej treści listu czytamy: „*Niektóre ostatnie prace E. Fermiego i L. Szilárda, które zostały mi przekazane w rękopisie, każą mi oczekiwać, że pierwiastek uran może zostać przekształcony w nowe i ważne źródło energii w najbliższej przyszłości. Niektóre aspekty zaistniałej sytuacji wydają się wymagać czujności i w razie potrzeby szybkiego działania ze strony Administracji. Uważam zatem, że moim obowiązkiem jest zwrócić Państwu uwagę na następujące fakty i zalecenia: W ciągu ostatnich czterech miesięcy stało się prawdopodobne – dzięki pracom Jolioty we Francji oraz Fermiego i Szilárda w Ameryce – że możliwe stanie się wywołanie jądrowej reakcji łańcuchowej w dużej masie uranu, dzięki której wygenerowane zostałyby ogromne ilości energii i duże ilości nowych pier-*



Fotografia 3. Albert Einstein i Leó Szilárd

Źródło: <https://ahf.nuclearmuseum.org/ahf/key-documents/einstein-szilard-letter/>



Fotografia 4. Widok oryginalnego listu Alberta Einsteina do FD Roosevelta, Prezydenta USA

Źródło: <https://ahf.nuclearmuseum.org/ahf/key-documents/einstein-szilard-letter/>

wiastków podobnych do radu. Teraz wydaje się niemal pewne, że uda się to osiągnąć w najbliższej przyszłości.”⁷

W miarę jak trwała druga wojna światowa, Szilárd zaczął zdawać sobie sprawę, że trzeba użyć bomb atomowych. Pomimo swojego sprzeciwu wobec tej broni, uważał, że gdyby ludzie zobaczyli, jakie zniszczenia mogą spowodować jej użycie, świat mógłby przestać rozwijać takie urządzenia. Myślał nawet, że może być potrzebna wojna wyprzedzająca, aby zaszokować świat i zapobiec rozprzestrzenianiu się broni jądrowej.

Wiedział również, że najważniejszym wymogiem dla każdego narodu, który chce zbudować bombę atomową, jest dostęp do samego uranu. W związku z tym 14 stycznia 1944 r. napisał do Vannevara Busha⁸, szefa Biura Badań Naukowych i Rozwoju USA, wzywając do ścisłej kontroli wszystkich złóż uranu, w razie potrzeby siłą. „*Trudno będzie przeprowadzić działania polityczne w tym kierunku*”, napisał Szilárd, „*chyba, że w tej wojnie faktycznie użyto*

³ Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki otrzymał w 1963 r., razem z Hansem Jensenem i Marią Goeppert-Mayer https://pl.wikipedia.org/wiki/Eugene_Wigner
Motyw nagrody: „za wkład w teorię jądra atomowego i cząstek elementarnych, w szczególności poprzez odkrycie i zastosowanie podstawowych zasad symetrii”
<https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1963/wigner/facts/>

⁴ Włoski fizyk teoretyczny i doświadczalny, laureat Nagrody Nobla z dziedziny fizyki w 1938 r., za wytworzenie w reakcjach z neutronami nowych pierwiastków promieniotwórczych https://pl.wikipedia.org/wiki/Enrico_Fermi

⁵ Jednym z nich kierował Enrico Fermi, a drugim Walter Zinn.

⁶ https://pl.wikipedia.org/wiki/Le%C3%B3_Szil%C3%A1rd

⁷ Szczegóły w treści: List Einsteina-Szilárda, <https://ahf.nuclearmuseum.org/ahf/key-documents/einstein-szilard-letter/>

⁸ Więcej na stronie <http://www1.kcn.ne.jp/~h-uchii/szilard.doc.html>

bomb atomowych o wysokiej skuteczności, a fakt ich niszczycielskiej mocy głęboko przeniknie do umysłów opinii publicznej”.⁹

Po kapitulacji nazistowskich Niemiec w 1945 r. zaczął się zastanawiać, czy w ogóle należy użyć broni atomowej. Wystosował w dniu 3 lipca 1945 r. petycję podpisaną przez 70 wybitnych naukowców – *PETYCJA DO PREZYDENTA STANÓW ZJEDNOCZONYCH*, wzywającą prezydenta Trumana, aby nie zrzucił bomby atomowej na Japonię. Wysiłki te nie powiodły się Stany Zjednoczone zbombardowały Hiroszimę i Nagasaki 6 i 9 sierpnia 1945 r.

Szilárd dostrzegł potencjalnie ogromne pokojowe wykorzystanie energii jądrowej. Po drugiej wojnie światowej zaczął nawet wierzyć, że wybuchy jądrowe mogą mieć pozytywny skutek. Był to temat, który omawiał ze znakomitą grupą intelektualistów w nowojorskim domu Laury Polanyi (1882–1957), która – podobnie jak Szilárd – była żydowską emigrantką z Węgier.

Bomby atomowe i pokój

Poglądy Szilárda na temat pokojowego wykorzystania eksplozji atomowych pojawiły się prawie dekadę przed tym, jak podobne pomysły zostały poparte przez Edwarda Tellera, węgierskiego fizyka na emigracji. Kierując amerykańskim rozwojem bomby wodorowej (fuzyjnej) – broni jeszcze potężniejszej niż bomba atomowa – Teller został wyznaczony na *szeфа Projektu Lemiesz*¹⁰, który została utworzona przez amerykańską Komisję Energii Atomowej, aby sprawdzić, czy takie urządzenia mogłyby zostać użyte do przemieszczania ogromnych obszarów Ziemi w celu wyrzeźbienia, na przykład, nowych portów lub kanałów. Komisja Energii Atomowej (AEC) ustanowiła program Ploughshare w czerwcu 1957 r. w celu zbadania pokojowego wykorzystania energii jądrowej. Program wziął swoją nazwę z Biblii (Izajasz 2:4), „*przekuj swoje miecze na lemiesz*”.

Szilárd nie był zaangażowany w plany Tellera, ponieważ stracił zainteresowanie tym pomysłem na tym etapie, co jest chyba równie dobre, biorąc pod uwagę czyste szaleństwo wykonywania inżynierii lądowej za pomocą bomb wodorowych. Był jednak bardzo zaniepokojony tym, czy Stany Zjednoczone mają zdolność lub motywację do zbudowania takiego urządzenia. Uważał, że amerykańscy naukowcy stracili zaufanie do rządu USA od czasu drugiej wojny światowej, zwłaszcza że robił on dokładnie te same rzeczy, za które wcześniej potępiał Niemcy, takie jak masowe bombardowanie celów cywilnych. Pomimo tego osłabionego zaufania, nawet najostrejsi krytycy bomby wodorowej, tacy jak teoretyk Hans Bethe, wrócili do Los Alamos, aby nad nią pracować, gdy prezydent Truman dał w styczniu 1950 r. zielone światło do jej budowy.

⁹ <https://physicsworld.com/a/leo-szilard-the-physicist-who-envisaged-nuclear-weapons-but-later-opposed-their-use/>

¹⁰ Więcej na stronie <https://st.llnl.gov/news/look-back/plowshare-program>

¹¹ <https://www.worldscientific.com/worldscibooks/10.1142/p468#t-aboutBook>

¹² Wczesne dni Pugwash - Jak w szczytowym okresie zimnej wojny wybitni zachodni i radzieccy naukowcy znaleźli się w Kanadzie, dyskutując o broni jądrowej? <https://pubs.aip.org/physicstoday/article/54/6/50/411715/The-Early-Days-of-Pugwash-During-the-height-of-the>



Fotografia 5. Leó Szilárd (1898-1964) sfotografowany po tym, jak Związek Radziecki zdetonował swoją pierwszą bombę atomową (rozszczepialną) w 1949 r.

Źródło: <https://physicsworld.com/a/leo-szilard-the-physicist-who-envisaged-nuclear-weapons-but-later-opposed-their-use/?notification=onesignal>

O poglądach Szilárda na temat bomby wodorowej wiemy dzięki przemówieniu, które wygłosił później na Brandeis University w Los Angeles w grudniu 1954 r. Jego żona Gertrud Weiss przekazała kopię jego przemówienia urodzonemu na Węgrzech szwedzkiemu immunologowi George'owi Kleinowi, który później został włączony przez węgierskiego fizyka George'a Marksa w *Leo Szilard Centenary Volume* (wydawca Eötvös Physical Society 1988). Wiemy również o poparciu Szilarda dla bomby wodorowej dzięki rozmowie, którą przeprowadził w 2004 r. Kleinow z genetykiem Matthew Meselsonem, będący opiekunem Szilárda podczas jego wizyty w Los Angeles w 1954 r. Zapis rozmowy pojawia się w książce, zatytułowanej *Candid Science VI: More Conversations with Famous Scientists* (Szczera nauka VI – Więcej rozmów ze znanymi naukowcami <https://doi.org/10.1142/p468>; Imperial College Press 2006)¹¹.

Szilárd uważał, że świat byłby bezpieczniejszym miejscem, gdybyśmy opracowali tak straszne bomby wodorowe, jak to tylko możliwe, ponieważ zniechęciliby to kogokolwiek do ich użycia. Innymi słowy, w utrzymaniu pokoju między Związkiem Radzieckim a Stanami Zjednoczonymi dostrzegał korzyści płynące z „*wzajemnie gwarantowanego zniszczenia*”.

Decyzja Szilárda o wsparciu rozwoju bomby wodorowej w Ameryce nie oznaczała, że aprobował wyścig zbrojeń. Chciał tylko, aby Stany Zjednoczone rozpoczęły prace nad taką bronią, ponieważ obawiał się, że Związek Radziecki prawdopodobnie też ją opracowuje. Państwo to przetestowało swoją pierwszą bombę wodorową w sierpniu 1953 r.

Jak Szilárd wyjaśnił podczas przemówienia na Konferencjach Naukowych Pugwash i spraw światowych pod koniec lat pięćdziesiątych, „*świat stał się bardziej stabilnym geopolitycznie miejscem, teraz gdy obie strony były uzbrojone po rękojeść*”.¹²

Tak realizowana postawa przypomina uwagę Alfreda Nobla, fundatora Nagrody Nobla, którą przytoczył chemik Linus Pauling po otrzymaniu Pokojowej Nagrody Nobla w 1963 r. „*Dzień, w którym dwa korpusy armii mogą unicestwić się nawzajem w ciągu sekundy* – powiedział Nobel – „*należy mieć nadzieję, że wszystkie cywilizowane narody wycofają się z wojny i zwolnią swoje wojska*”.

Szilárd, podobnie jak Nobel, zdawał sobie sprawę z siły odstraszenia w czynieniu świata bezpieczniejszym miejscem.

Ale czy nadal to jest realizowane w polityce światowego pokoju?

Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba

– część III

W trzeciej części rozważań związanych z mechaniką nieba przedstawione zostały dwa zagadnienia – równanie Keplera oraz ograniczone kołowe zagadnienie trzech punktów materialnych.

Marcin Wesołowski

W mechanice nieba równanie Keplera definiuje relację pomiędzy anomalią średnią a anomalią mimośrodową dla orbity eliptycznej. W tym miejscu wyjaśnimy dwa ważne pojęcia, które wykorzystaliśmy do zdefiniowania równania Keplera.

Anomalia średnia (M) jest określana jako parametr kątowy, który wykorzystujemy do opisu ruchu ciała niebieskiego po jego orbicie keplerowskiej wiążącej położenie z czasem. Anomalię tą możemy wyrazić jako:

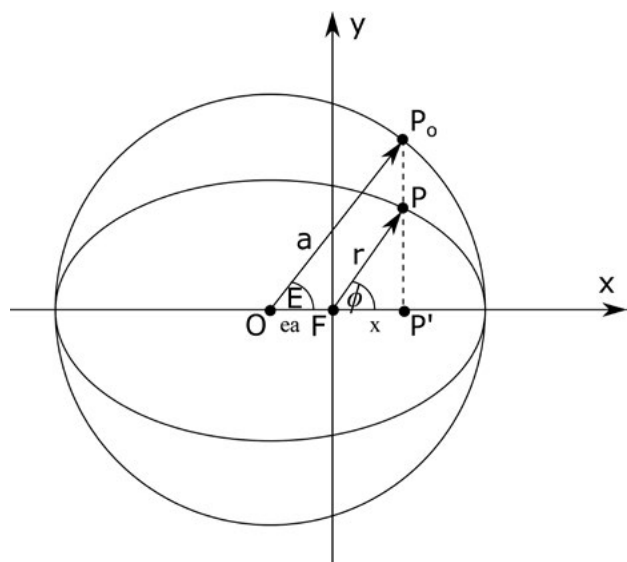
$$M = n(t - t_0), \quad (1)$$

gdzie M jest anomalią średnią (wyrażaną w radianach), n – jest tzw. ruchem średnim ($n = 2\pi \cdot T^{-1}$), t jest czasem dla którego obliczamy anomalię, t_0 – to moment przejścia ciała przez perycentrum, czyli jeden z dwóch skrajnych punktów dla orbity eliptycznej, T jest okres orbitalnym, który możemy wyznaczyć na podstawie III prawa Keplera. Warto zauważyć, że anomalię średnią możemy określić jako kąt, który opisuje położenie punktu poruszającego się ze stałą prędkością kątową n po okręgu opisanym na orbicie.

Anomalię mimośrodową (E) definiujemy jako parametr, który opisuje ruch ciała po orbicie keplerowskiej. Inaczej mówiąc anomalia mimośrodowa to kąt pomiędzy odcinkiem łączącym geometryczny środek orbity z perycentrum, a odcinkiem łączącym geometryczny środek

orbity z punktem wyznaczonym przez przecięcie prostej prostopadłej do linii apsyd, przechodzącej przez ciało i okrąg opisanym na orbicie.

W celu wyprowadzenia wzoru określającego równanie Keplera rozważmy następującą sytuację, która została przedstawiona na rysunku (1).



Rys.1. Elementy elipsy: a – półosć wielka, O – środek elipsy, F – ognisko, w którym znajduje się ciało centralne np. Słońce (zauważmy, że w takim przypadku jest spełnione I prawo Keplera), ϕ – anomalia prawdziwa, E – anomalia mimośrodowa).

Korzystając z rysunku (1) możemy wyznaczyć następujące zależności:

Niech odcinek $|FP'| = x$, a odcinek $|PP'| = y$ wówczas mamy:

$$x = r \cdot \cos \varphi, \quad (2)$$

$$y = r \cdot \sin \varphi. \quad (3)$$

Następnie niech odcinek $|P'P_0| = a \cdot \sin E$, a odcinek $|OP'| = a \cdot \cos E$ oraz:

$$|OP'| = |OF| + |FP'| = e \cdot a + x, \quad (4)$$

stąd wynika, że:

$$x = |OP'| - e \cdot a = a \cdot \cos E - e \cdot a. \quad (5)$$

Zauważmy, że równanie (5) jest równoważne następującej zależności:

$$x = a \cdot (\cos E - e). \quad (6)$$

Następnie wykorzystajmy równanie biegunowe elipsy, które zostało wyprowadzone w pierwszej części rozważań zwianych z mechaniką nieba. Równanie to możemy zapisać jako:

$$r = \frac{p}{1 + e \cdot \cos \varphi}, \quad (7)$$

gdzie p jest parametrem elipsy, który możemy wyrazić jako: $p = a \cdot (1 - e^2)$, wówczas równanie biegunowe elipsy możemy przepisać do następującej postaci:

$$r = \frac{a \cdot (1 - e^2)}{1 + e \cdot \cos \varphi}. \quad (8)$$

Korzystając z równania (7) po jego prostych przekształceniach parametr elipsy p wynosi:

$$p = r(1 + e \cdot \cos \varphi) = r + r \cdot e \cdot \cos \varphi. \quad (9)$$

Następnie na podstawie równania (2) oraz zależności:

$\cos \varphi = \frac{x}{r}$, równanie (9) możemy wyrazić jako:

$$p = r + r \cdot e \cdot \frac{x}{r} = r + e \cdot x. \quad (10)$$

Podstawmy teraz do równania (10) równanie (6):

$$p = r + e \cdot a \cdot (\cos E - e). \quad (11)$$

Przekształćmy równanie (11) w taki sposób, aby można było wyznaczyć parametr r , co możemy zapisać jako:

$$r = p - e \cdot a \cdot (\cos E - e) = a \cdot (1 - e^2) - e \cdot a \cdot (\cos E - e). \quad (12)$$

Po uproszczeniu prawej strony równania (12) mamy:

$$r = a \cdot (1 - e \cdot \cos E). \quad (13)$$

Wykorzystując powyższe rozważania obliczmy jeszcze długość odcinka $|PP'| = y$. W tym celu wykorzystamy rysunek (1) oraz twierdzenie Pitagorasa wówczas mamy:

$$y = \sqrt{r^2 - x^2}. \quad (14)$$

Po podstawieniu do równania (14) równania (13) i (6) otrzymujemy:

$$y = \sqrt{a^2 \cdot (1 - e \cdot \cos E)^2 - a^2 \cdot (\cos E - e)^2}. \quad (15)$$

Wykonajmy proste operacje matematyczne, które możemy zapisać w następującej formie:

$$\begin{aligned} y &= a \cdot \sqrt{(1 - e \cdot \cos E + \cos E - e) \cdot (1 - e \cdot \cos E - \cos E + e)}, \\ y &= a \cdot \sqrt{[1 - e + \cos E \cdot (1 - e)] \cdot [1 + e - \cos E \cdot (1 + e)]}, \\ y &= a \cdot \sqrt{(1 - e) \cdot (1 + \cos E) \cdot (1 + e) \cdot (1 - \cos E)} \\ y &= a \cdot \sqrt{(1 - e^2) \cdot (1 - \cos^2 E)}. \end{aligned} \quad (16)$$

Ostatecznie równanie (16) na podstawie własności $(1 - \cos^2 E) = \sin^2 E$ dane jest jako:

$$y = a \cdot \sin E \cdot \sqrt{1 - e^2}. \quad (17)$$

Wyznamy teraz moment pędu korzystając z następującej zależności:

$$p = \frac{K^2}{GMm^2}. \quad (18)$$

Dla uproszczenia rozważań założmy, że $m = 1 \text{ kg}$, wówczas równanie (18) jest równe:

$$p = \frac{K^2}{GM}, \quad (19)$$

stąd już łatwo wykazać, że moment pędu K jest równy:

$$K^2 = p \cdot G \cdot M = G \cdot M \cdot a \cdot (1 - e^2), \quad (20)$$

lub

$$K = \sqrt{G \cdot M \cdot a \cdot (1 - e^2)}. \quad (21)$$

Następnie wykorzystajmy definicję momentu pędu K określoną poprzez iloczyn wektorowy promienia wodzącego $\mathbf{r}$ i prędkości $\mathbf{V}$:

$$\mathbf{K} = \mathbf{r} \times \mathbf{p} = \mathbf{r} \times m \cdot \mathbf{v} = \mathbf{r} \times \mathbf{v}. \quad (22)$$

Zauważmy, że w równaniu (22) ponownie przyjęliśmy, że $m = 1 \text{ kg}$. Ponieważ rozważamy przypadek dwuwymiarowy wektor prędkości $\mathbf{v}$ należy rozłożyć na jego składowe odpowiednio w kierunku x i y . Aby wyznaczyć wartość prędkości z równań (6) i (17) należy obliczyć pochodną:

$$\dot{x} = a \cdot (\cos E - e), \quad (23)$$

$$\dot{x} = -a \cdot \dot{E} \cdot \sin E,$$

oraz

$$\dot{y} = a \cdot \sqrt{1 - e^2} \cdot \dot{E} \cdot \cos E, \quad (24)$$

$$\dot{y} = a \cdot \sqrt{1 - e^2} \cdot \dot{E} \cdot \cos E.$$

Wówczas moment pędu K jest równy:

$$\begin{aligned} \mathbf{K} &= |\mathbf{r} \times \mathbf{r}| = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ x & y & 0 \\ \dot{x} & \dot{y} & 0 \end{vmatrix} \\ &= \mathbf{i}(-1)^{1+1} \begin{vmatrix} y & 0 \\ \dot{y} & 0 \end{vmatrix} + \mathbf{j}(-1)^{1+2} \begin{vmatrix} x & 0 \\ x & 0 \end{vmatrix} + \mathbf{k}(-1)^{1+3} \begin{vmatrix} x & y \\ \dot{x} & \dot{y} \end{vmatrix} \\ &= |x \cdot \dot{y} - y \cdot \dot{x}|. \end{aligned} \quad (25)$$

Wykorzystując zależności (23) i (24) moment pędu K wynosi:

$$K = x \cdot \dot{y} - y \cdot \dot{x} = \left[\underbrace{(a \cdot (\cos E - e))}_x \cdot \underbrace{(a \cdot \sqrt{1-e^2} \cdot \dot{E} \cdot \cos E)}_y + \underbrace{(a \cdot \sqrt{1-e^2} \sin E)}_y \cdot \underbrace{(-a \cdot \dot{E} \cdot \sin E)}_x \right] \quad (26)$$

Zauważmy, że w sumie po prawej stronie równania (26) znajduje się czynnik $a \cdot a = a^2$, który możemy wyłączyć przed moduł wówczas mamy:

$$\begin{aligned} K &= a^2 \cdot |(\cos E - e) \cdot \sqrt{1-e^2} \cdot \dot{E} \cdot \cos E + \sin^2 E \cdot \sqrt{1-e^2} \cdot \dot{E}| \\ &= a^2 \cdot \sqrt{1-e^2} \cdot \dot{E} |(\cos E - e) \cdot \cos E + \sin^2 E| \\ &= a^2 \cdot \sqrt{1-e^2} \cdot \dot{E} |\cos^2 E - e \cdot \cos E + \sin^2 E|. \end{aligned} \quad (27)$$

Czyli ostatecznie moment pędu K dany jest jako:

$$K = \dot{E} \cdot a^2 \cdot \sqrt{1-e^2} |1 - e \cdot \cos E|. \quad (28)$$

Zauważmy, że na podstawie powyższych rozważań otrzymaliśmy dwa równania, w oparciu o które możemy wyznaczyć moment pędu. Porównajmy teraz równanie (21) z równaniem (28) co możemy wyrazić jako:

$$\sqrt{G \cdot M \cdot a \cdot (1-e^2)} = \dot{E} \cdot a^2 \cdot \sqrt{1-e^2} |1 - e \cdot \cos E|, \quad (29)$$

lub

$$\sqrt{G \cdot M \cdot a} \cdot \sqrt{1-e^2} = a^2 \cdot \sqrt{1-e^2} \cdot \dot{E} \cdot (1 - e \cdot \cos E). \quad (30)$$

Aby uprościć równanie (30) możemy podzielić je obustronnie przez czynnik $\sqrt{1-e^2}$ co daje nam:

$$\sqrt{G \cdot M \cdot a} = a^2 \cdot \dot{E} \cdot (1 - e \cdot \cos E). \quad (31)$$

Następnie wykonując dalsze upraszczanie podzielmy równanie (31) przez a^2 oraz czynnik $\dot{E} = \frac{dE}{dt}$ wówczas otrzymujemy, że:

$$\frac{\sqrt{G \cdot M}}{a^{3/2}} = (1 - e \cdot \cos E) \frac{dE}{dt}. \quad (32)$$

Następnie równanie (32) scałkujemy obustronnie co możemy zapisać jako:

$$\int_0^E (1 - e \cdot \cos E) dE = \int_{t_0}^t \frac{\sqrt{G \cdot M}}{a^{3/2}} dt.$$

Wykorzystując proste wzory oraz podstawowe twierdzenia wynikające z analizy matematycznej a konkretniej z rachunku całkowego równanie (32) możemy przepisać do następującej postaci:

$$E - e \cdot \sin E = \frac{\sqrt{G \cdot M}}{a^{3/2}} (t - t_0). \quad (33)$$

Zauważmy, że równanie (33) określane jest w literaturze jako szósta (VI) i ostatnia całka równania ruchu dla zagadnienia dwóch punktów materialnych. Inaczej równanie to określane jest jako równanie Keplera.

Przyjmijmy, że $t_0 = 0$ wówczas równanie (33) nieco się upraszcza do postaci:

$$E - e \cdot \sin E = \frac{\sqrt{G \cdot M}}{a^{3/2}} t, \quad (34)$$

lub

$$E - e \cdot \sin E = n t, \quad (35)$$

gdzie $n = \frac{\sqrt{G \cdot M}}{a^{3/2}}$ - średni ruch dzienny, wartość tą otrzymujemy dokonując porównania siły grawitacji i siły dośrodkowej dla ruch po okręgu:

$$m \omega^2 a = \frac{GMm}{a^2}. \quad (36)$$

Po elementarnych przekształceniach można pokazać, że:

$$\omega = \sqrt{\frac{GM}{a^3}} = \frac{\sqrt{GM}}{a^{3/2}} = n. \quad (37)$$

Wykorzystując równania (1) oraz (35) równanie Keplera możemy zapisać jako:

$$E - e \cdot \sin E = M. \quad (38)$$

Najprościej mówiąc rozwiązanie równania Keplera umożliwia znalezienie ciała na jego orbicie.

Jeżeli mamy do czynienia z ruchem po orbicie eliptycznej musimy podać sześć elementów określających jednoznacznie położenie orbity tego ciała w przestrzeni kosmicznej:

- Wielka półoś orbity (a) wyrażona w jednostkach astronomicznych.
- Mimośród elipsy (e), który jednocześnie odpowiada za jej kształt.
- Nachylenie płaszczyzny orbity do płaszczyzny ekliptyki (i , inklinacja), czyli kąt dwuścienny między płaszczyzną orbity a płaszczyzną ekliptyki. Jeżeli spełniona jest zależność $0^\circ < i < 90^\circ$ to mówimy, że kierunek ruchu ciała niebieskiego (np. planety) jest prosty. Natomiast w przypadku, gdy: $90^\circ < i < 180^\circ$ to mówimy, że kierunek ruchu jest wsteczny.
- Długość węzła wstępującego (Ω), czyli długość ekliptyczna przecięcia punktu orbity z ekliptyką, w którym szerokość ekliptyczna ciała niebieskiego (np. planety) zmienia się z ujemnej w dodatnią. Zauważmy, że inklinacja (i) i długość węzła wstępującego (Ω) określają położenie orbity ciała niebieskiego w przestrzeni kosmicznej.
- Odległość peryhelium od węzła wstępującego (ω), czyli kąt zawarty między promieniem wodzącym ciała niebieskiego (np. planety) znajdującego się w peryhelium i linia węzłów. Odległość ta jest wyznaczana od węzła wstępującego w kierunku ruchu planety w płaszczyźnie orbity. Parametr ten określa położenie wielkiej osi elipsy eliptycznej w płaszczyźnie jej orbity.
- Moment przejścia przez peryhelium (T_0). Parametr ten wiąże położenie ciała niebieskiego (np. planety) na orbicie z czasem.

W przypadku orbity parabolicznych ($a \rightarrow \infty$) zamiast wielkiej półosi używa się odległości peryhelium od Słońca:

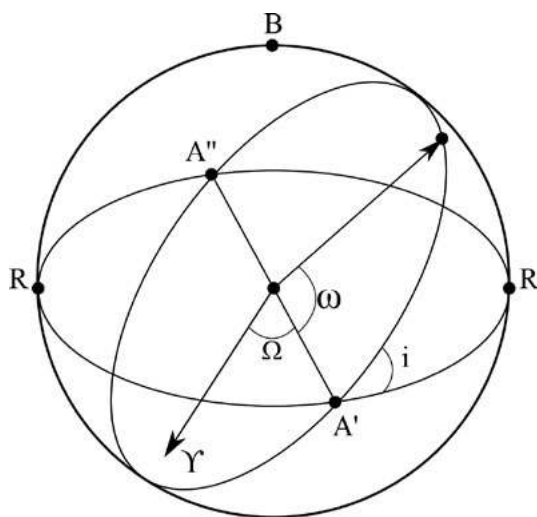
$$q = \frac{|c'|^2}{2\mu}, \quad (39)$$

gdzie c' i μ są odpowiednimi stałymi wynikającymi z zagadnienia dwóch punktów materialnych.

Zauważmy, że elementy orbity (a , e , i , Ω , ω , T_0) to funkcje jedynie pierwszych całek, które są niezmiennie w czasie, jeżeli zaniedbamy zakłócenia, czyli perturbację wywołane oddziaływaniem grawitacyjnym planet. W ogólnym przypadku parametry te zmieniają się bardzo wolno, dlatego też w dowolnej chwili możemy je wyznaczyć korzystając z konfiguracji planet. W przypadku orbity planetarnych perturbacje są niewielkie. Jednakże w przypadku małych ciał niebieskich np. komet lub planetoid, które w swym ruchu przechodzą relatywnie blisko planet np. gazowego olbrzyma – Jowisza ich orbity mogą ulegać znacznym zmianom. Inaczej mówiąc (upraszczając nieco) możemy stwierdzić, że Jowisz jest w stanie zakrzywić pierwotne tory ruchu małych ciał.

Jednakże zwykle do określenia położenia ciała na jego orbicie eliptycznej używa się innych posiadających prosty sens geometryczny parametrów zwanych z elementami orbity:

- węzeł wstępujący (A'),
- węzeł zstępujący (A''),
- peryhelium (π , q),
- nachylenie płaszczyzny orbity do płaszczyzny ekliptyki (i),
- długość węzła wstępującego (Ω),
- odległość peryhelium od węzła wstępującego (ω),



Rys. 2. Elementy orbity.

W celu wyznaczenia sześciu elementów orbity musimy obserwacyjnie określić sześć liczb, które determinują położenie i ruch ciała na sferze niebieskiej. Możemy to uczynić dokonując obserwacji rektascensji α i deklinacji δ w trzech różnych chwilach. Jednakże należy pamiętać, że wyznaczone elementy orbitalne mogą być obciążone błędami obserwacyjnymi. Dlatego też warto porównać wartość rektascensji i deklinacji z tabelami dostępnymi w Almanachu Astronomicznym lub danymi udostępnionymi w astronomicznych bazach danych.

Rozwiązanie równania Keplera

Aby rozwiązać równanie Keplera należy zastosować dwa podejścia. Pierwsze podejście stanowią metody numeryczne (np.: metoda iteracji prostej, metoda Newtona, metoda połowienia), a drugie to metoda graficzna. Poniżej dla przykładu przedstawiamy drugie podejście. W tym celu musimy wykonać następujące kroki:

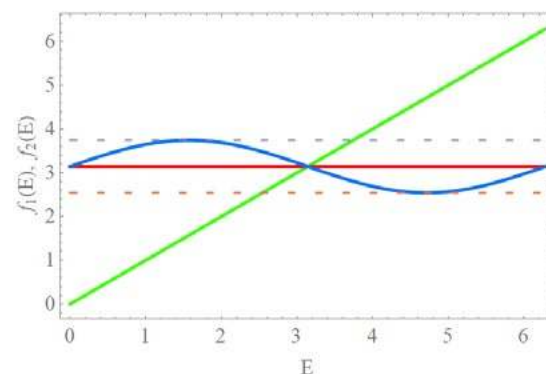
1. Przekształćmy teraz równanie (38) w taki sposób, aby po jego lewej stronie znajdowała się anomalia mimośrodowa (E):

$$E = M + e \cdot \sin E. \quad (39)$$

2. Rozwiązaniem graficznym równania Keplera będzie punkt przecięcia dwóch anomalii mimośrodowych M i E , które wyrazimy za pomocą dwóch funkcji:

$$f_1(E) = E, \quad f_2(E) = M + e \cdot \sin(E). \quad (40)$$

3. Następnie przyjmując, że mimośród orbity eliptycznej $e = 0.6$ oraz niech $M = \pi$, wówczas otrzymujemy:

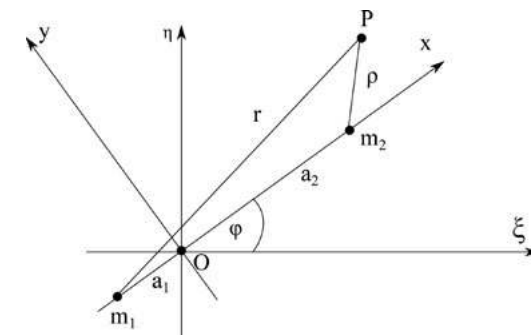


Rys. 3. Graficzne rozwiązanie równania Keplera – linią zieloną oznaczono funkcję $f_1(E)$ a niebieską $f_2(E)$. Zauważmy, że równanie Keplera ma jedno rozwiązanie znajdujące się w punkcie przecięcia dwóch funkcji $f_1(E)$ i $f_2(E)$.

Ograniczone kołowe zagadnienie trzech punktów materialnych

Zakładamy, że ciała m_1 i m_2 mają masę skończoną i poruszają się wokół wspólnego środka masy tym samym realizując zagadnienie dwóch punktów materialnych. Zauważmy, że trzecie ciało nie wpływa na ruch ciał m_1 i m_2 , natomiast ciała o masach m_1 i m_2 wpływają na ruch ciała o masie m_3 .

Dla uproszczenia rozważań wprowadźmy układ inercjalny (rys. 4), w którym będziemy rozpatrywać omawiane zagadnienie.



Rys. 4. Układ inercjalny opisujący zagadnienie trzech ciał. Współrzędne poszczególnych punktów dane są jako: $m_1(\xi_1, \eta_1, 0)$; $m_2(\xi_2, \eta_2, 0)$

Z rysunku 4 łatwo można zauważyć, że słuszna jest następująca relacja:

$$a = a_1 + a_2, \quad (41)$$

gdzie a_1 jest odległością od ciała o masie m_1 do początku układu o współrzędnych $O(\eta, \xi)$, a a_2 jest odległością od punktu o współrzędnych $O(\eta, \xi)$ do ciała o masie m_2 . Na podstawie powyższych własności słuszne są następujące równania:

$$\xi = x \cdot \cos \varphi - y \cdot \sin \varphi, \quad \eta = x \cdot \sin \varphi + y \cdot \cos \varphi, \quad \zeta = z \quad (42)$$

Korzystając z zależności (42) obliczymy teraz pochodne po czasie, czyli tak naprawdę składowe prędkości odpowiednio w danym kierunku, co możemy zapisać jako:

$$\begin{aligned} \dot{\xi} &= \dot{x} \cdot \cos \varphi - x \cdot \dot{\varphi} \sin \varphi - \dot{y} \cdot \sin \varphi - y \cdot \dot{\varphi} \cos \varphi, \\ \dot{\eta} &= \dot{x} \cdot \sin \varphi + x \cdot \dot{\varphi} \cos \varphi + \dot{y} \cdot \cos \varphi - y \cdot \dot{\varphi} \sin \varphi, \\ \dot{\zeta} &= \dot{z}. \end{aligned} \quad (43)$$

Następnie możemy obliczyć energię kinetyczną, dla której założyliśmy, że masa = 1 kg. Wówczas mamy:

$$T = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\dot{\xi} \right)^2 + \left(\dot{\eta} \right)^2 + \left(\dot{\zeta} \right)^2 \right]. \quad (44)$$

Zauważmy, że po prawej stronie równania (44) występuje suma kwadratów prędkości składowych, które wyraziliśmy poprzez równanie (43). Wykorzystując równania (43) oraz (44) mamy:

$$\begin{aligned} 2T &= \left(\dot{x} \right)^2 \cdot \cos^2 \varphi + x^2 \cdot \left(\dot{\varphi} \right)^2 \cdot \sin^2 \varphi + \left(\dot{y} \right)^2 \cdot \sin^2 \varphi \\ &+ y^2 \cdot \left(\dot{\varphi} \right)^2 \cdot \cos^2 \varphi - 2 \cdot \dot{x} \cdot x \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi \\ &- 2 \cdot \dot{x} \cdot \dot{y} \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi - 2 \cdot \dot{x} \cdot y \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos^2 \varphi \\ &+ 2 \cdot x \cdot \dot{y} \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin^2 \varphi + 2 \cdot x \cdot y \cdot \left(\dot{\varphi} \right)^2 \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \\ &+ 2 \cdot \dot{y} \cdot y \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi + \left(\dot{x} \right)^2 \cdot \sin^2 \varphi \\ &+ x^2 \cdot \left(\dot{\varphi} \right)^2 \cdot \cos^2 \varphi + \left(\dot{y} \right)^2 \cdot \cos^2 \varphi \\ &+ y^2 \cdot \left(\dot{\varphi} \right)^2 \cdot \sin^2 \varphi + 2 \cdot \dot{x} \cdot x \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi \\ &+ 2 \cdot \dot{x} \cdot \dot{y} \cdot \sin \varphi \cdot \cos \varphi - 2 \cdot \dot{x} \cdot y \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin^2 \varphi \\ &+ 2 \cdot x \cdot \dot{y} \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos^2 \varphi - 2 \cdot x \cdot y \cdot \left(\dot{\varphi} \right)^2 \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi \\ &- 2 \cdot \dot{y} \cdot y \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \varphi \cdot \sin \varphi + \left(\dot{z} \right)^2 \\ &= \left(\dot{x} \right)^2 + \left(\dot{y} \right)^2 + \left(\dot{z} \right)^2 + 2 \cdot \dot{\varphi} \cdot x \cdot \dot{y} \\ &- 2 \cdot \dot{\varphi} \cdot x \cdot y + \left(\dot{\varphi} \right)^2 \cdot (x^2 + y^2). \end{aligned} \quad (45)$$

Ostatecznie równanie (45) możemy przepisać do postaci:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \left[\left(\dot{x} \right)^2 + \left(\dot{y} \right)^2 + \left(\dot{z} \right)^2 \right] + \dot{\varphi} \cdot (x \cdot \dot{y} - \dot{x} \cdot y) \\ &+ \frac{1}{2} \left(\dot{\varphi} \right)^2 \cdot (x^2 + y^2). \end{aligned} \quad (46)$$

Wykorzystajmy teraz równanie Lagrange'a, które możemy zapisać jako:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0, \quad (47)$$

gdzie $L = T - U$, $T = T(q_i, \dot{q}_i)$, $U = U(q_i)$. Następnie zauważmy, że:

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{\partial}{\partial q_i} (T - U) = \frac{\partial T}{\partial q_i}, \quad (48)$$

Wykorzystując powyższe równania mamy:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial}{\partial q_i} (T - U) = 0. \quad (49)$$

Wykorzystując równanie (49) otrzymujemy:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = - \frac{\partial U}{\partial q_i}. \quad (50)$$

Natomiast z równania (50) wynika, że:

$$U = -k^2 \cdot \left(\frac{m_1}{r} + \frac{m_2}{\rho} \right), \quad (51)$$

gdzie U oznacza energię potencjalną. Inaczej mówiąc U to funkcja sił, czyli energia potencjalna z przeciwnym znakiem. Stąd mamy:

$$U = k^2 \cdot \left(\frac{m_1}{r} + \frac{m_2}{\rho} \right). \quad (52)$$

Ponownie wykorzystajmy równanie (50), ale pamiętajmy o zmianie znaku:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = \frac{\partial U}{\partial q_i}. \quad (53)$$

Równanie (53) możemy teraz przepisać uwzględniając zmienną x , wówczas otrzymamy:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\partial U}{\partial x}. \quad (54)$$

gdzie:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \cdot \dot{x}^2 + \frac{1}{2} \cdot \dot{y}^2 + \frac{1}{2} \cdot \dot{z}^2 + \dot{\varphi} \cdot x \cdot \dot{y} - \dot{\varphi} \cdot \dot{x} \cdot y \\ &+ \frac{1}{2} \cdot \dot{\varphi}^2 \cdot (x^2 + y^2). \end{aligned} \quad (55)$$

Wówczas na podstawie równania (54) oraz (55) musimy wyznaczyć dwie następujące zależności:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} &= \dot{x} - \dot{\varphi} \cdot y, \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{x}} &= \dot{\varphi} \cdot y + x \cdot \left(\dot{\varphi}\right)^2.\end{aligned}\quad (56)$$

Wówczas równanie Lagrange'a po zmiennej x przyjmuje postać:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) &= \ddot{x} - \ddot{\varphi} \cdot y - \dot{\varphi} \cdot \dot{y}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{x}} \right) - \frac{\partial T}{\partial x} &= \frac{\partial U}{\partial x}, \\ \ddot{x} - \ddot{\varphi} \cdot y - 2 \cdot \dot{\varphi} \cdot \dot{y} - x \cdot \left(\dot{\varphi}\right)^2 &= \frac{\partial U}{\partial x}.\end{aligned}\quad (57)$$

Następnie dla zmiennej y mamy:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} &= \dot{y} + \dot{\varphi} \cdot x, \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} &= -\dot{\varphi} \cdot x + y \cdot \left(\dot{\varphi}\right)^2.\end{aligned}\quad (58)$$

Wówczas równanie Lagrange'a dane jest jako:

$$\begin{aligned}\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) &= \ddot{y} + \ddot{\varphi} \cdot x + \dot{\varphi} \cdot \dot{x}, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} &= \frac{\partial U}{\partial y}, \\ \ddot{y} + \ddot{\varphi} \cdot x + \dot{\varphi} \cdot \dot{x} - \dot{\varphi} \cdot \dot{x} - y \cdot \left(\dot{\varphi}\right)^2 &= \frac{\partial U}{\partial y}.\end{aligned}\quad (59)$$

Natomiast po zmiennej z mamy:

$$\ddot{z} = \frac{\partial U}{\partial z}.\quad (60)$$

W ten sposób uzyskaliśmy równania Lagrange'a drugiego rodzaju w postaci układu trzech równań różniczkowych drugiego rzędu. Dla uproszczenia dalszych rozważań ograniczymy się do koła wówczas mamy, że: $\varphi = n = \text{const}$, $\dot{\varphi} = 0$. Wówczas powyższe trzy równania różniczkowe drugiego rzędu możemy przepisać w uproszczonej postaci:

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2 \cdot n \cdot \dot{y} = \frac{\partial U}{\partial x} + n^2 \cdot x, \\ \ddot{y} + 2 \cdot n \cdot \dot{x} = \frac{\partial U}{\partial y} + n^2 \cdot y, \\ \ddot{z} = + \frac{\partial U}{\partial z}. \end{cases}\quad (61)$$

Chcąc bardziej uprościć układ równań dany wzorem (61) wprowadźmy pewne uogólnienie, które zdefiniujemy jako:

$$\Omega = \frac{1}{2} \cdot n^2 \cdot (x^2 + y^2) + U.\quad (62)$$

gdzie na podstawie równania (62) możemy zapisać, że:

$$\begin{cases} \frac{\partial \Omega}{\partial x} = n^2 \cdot x + \frac{\partial U}{\partial x}, \\ \frac{\partial \Omega}{\partial y} = n^2 \cdot y + \frac{\partial U}{\partial y}, \\ \frac{\partial \Omega}{\partial z} = \frac{\partial U}{\partial z}. \end{cases}\quad (63)$$

Wówczas układ równań różniczkowych dany wzorem (61) uprasza się do postaci:

$$\begin{cases} \ddot{x} - 2 \cdot n \cdot \dot{y} = \frac{\partial \Omega}{\partial x}, \\ \ddot{y} - 2 \cdot n \cdot \dot{x} = \frac{\partial \Omega}{\partial y}, \\ \ddot{z} = \frac{\partial \Omega}{\partial z}, \end{cases}\quad (63)$$

Następnie pomnożmy obustronnie każde z tych równań ściśle według swojego kierunku przez: $2\dot{x}$, $2\dot{y}$, oraz $2\dot{z}$. W następnym kroku dodajmy stornami do siebie te równania wówczas otrzymamy, że:

$$2 \cdot \left(\dot{x} \cdot \ddot{x} + \dot{y} \cdot \ddot{y} + \dot{z} \cdot \ddot{z} \right) = 2 \cdot \left[\frac{\partial \Omega}{\partial x} \cdot \dot{x} + \frac{\partial \Omega}{\partial y} \cdot \dot{y} + \frac{\partial \Omega}{\partial z} \cdot \dot{z} \right],\quad (64)$$

lub

$$2 \cdot \left(\dot{x} \cdot \ddot{x} + \dot{y} \cdot \ddot{y} + \dot{z} \cdot \ddot{z} \right) = 2 \frac{d\Omega}{dt}.\quad (65)$$

Pomnożmy teraz równanie (65) obustronnie przez dt oraz wykonamy obustronne całkowanie wówczas otrzymamy, że:

$$\left(\dot{x} \right)^2 + \left(\dot{y} \right)^2 + \left(\dot{z} \right)^2 = 2 \cdot \Omega - C,\quad (66)$$

gdzie C jest stałą całkowania. Jednocześnie lewa strona równania (66) określa nam kwadrat potencjału. Wówczas równanie (66) możemy wyrazić jako:

$$V^2 = 2 \cdot \Omega - C.\quad (67)$$

Na podstawie równania (67) możemy rozważyć dwa następujące przypadki:

- jeżeli $V \geq 0$ to: $2 \cdot \Omega - C \geq 0$ lub $2 \cdot \Omega \geq C$.
- jeżeli $V=0$ to: $2 \cdot \Omega - C = 0$ lub $2 \cdot \Omega = C$ – powierzchnia zerowej prędkości (powierzchnia Hilla).

Wykorzystując równanie (67) wraz z przypadkiem, że $V=0$ oraz równanie opisujące energię potencjalną (51) mamy:

$$n^2 \cdot (x^2 + y^2) + 2 \cdot k^2 \cdot \left(\frac{m_1}{r} + \frac{m_2}{\rho} \right) = C,\quad (68)$$

jeśli założymy, że: $\mu = \frac{m_2}{m_1 + m_2}$; $1 - \mu = \frac{m_1}{m_1 + m_2}$ oraz

$n = 1$, $a = 1$, to $k^2 \cdot (m_1 + m_2) = n^2 \cdot a^3 = 1$.

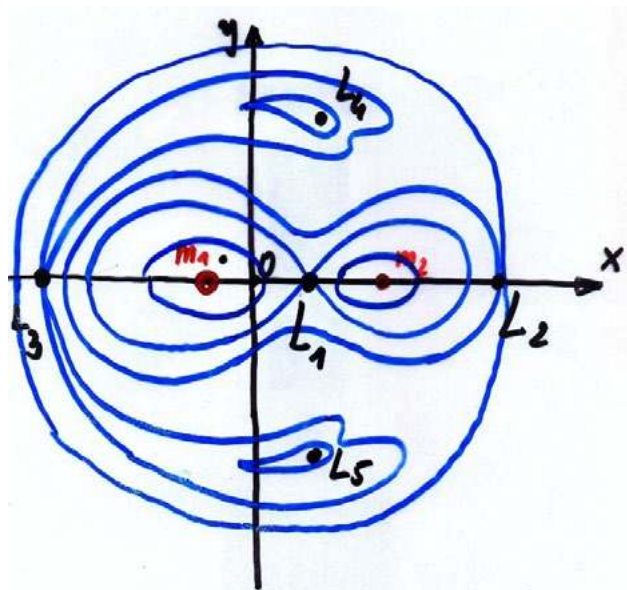
Wówczas otrzymamy, że:

$$k^2 \cdot m_1 = 1 - \mu, \quad k^2 \cdot m_2 = \mu, \quad (69)$$

to równanie (68) możemy zapisać w nieco prostszej postaci jako:

$$x^2 + y^2 + \frac{2 \cdot (1 - \mu)}{r} + \frac{2 \cdot \mu}{\rho} = C. \quad (70)$$

Zauważmy, że równanie (70) opisuje krzywe graniczne Hilla. W astrofizyce powszechnie używana jest nazywa powierzchni Roche'a, jednakże są one synonimami tylko wtedy, gdy potencjał grawitacyjny gwiazdy zostanie przybliżony potencjałem punktu materialnego. Kształty tych powierzchni zależą od stałej Jacobiego.



Rys. 5. Schemat opisujący całki Jacobiego lub efektywnego potencjału układu dwóch ciał spowodowanego grawitacją i siłą odśrodkową w jednym punkcie w czasie. Granice sfery Hilla są oznaczone czerwonymi liniami otaczającymi dwie duże masy (m_1 i m_2).

Jeżeli po prawej stronie w punkcie o masie m_2 znajduje się np. Ziemia to strefa Hilla w tym przypadku znajduje się pomiędzy punktami L_1 i L_2 , czyli punktami Lagrange'a, które leżą wzdłuż linii łączącej środki obu ciał. Obszar wpływu mniejszego ciała jest najkrótszy w tym kierunku, a zatem działa jako czynnik ograniczający rozmiar sfery Hilla. Powyżej tej odległości trzeci obiekt na orbicie wokół małego obiektu spędziłby przynajmniej część swojej orbity poza sferą Hilla i byłby stopniowo zakłócany przez siły pływowe ciała centralnego (np. Słońca).

Poprzez strefę Hilla należy rozumieć pewien obszar otaczający dane ciało niebieskie (np. planetę), w którym jego przyciąganie grawitacyjne dominuje nad przyciąganiem innego ciała (większego obiektu) znajdującego się w niedalekiej odległości (np. gwiazdy – Słońca). Zauważmy, że w literaturze strefa Hilla określana jest również jako: strefa Roche'a, granica Roche'a lub promień Roche'a.

Promień Roche'a to promień sfery wokół cięższego ciała w układzie dwóch ciał, których masy znacząco różnią się (np. masa Słońca i masa Ziemi), po przekroczeniu którego ciało o mniejszej masie może się rozpaść pod wpływem sił pływowych, gdyż sama siła grawitacji nie jest w stanie utrzymać mniejszego ciała w całości.

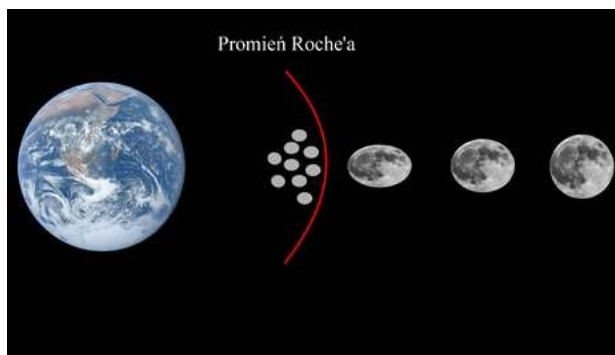
Przeanalizujemy teraz następujący eksperyment myślowy określający zachowanie się tych dwóch ciał. Niech m_1 oznacza ciało o dużej masie a m_2 jest ciałem kulistym (masą płynu) utrzymywanego razem przez jego grawitację. Wówczas możemy rozważyć następujące zachowania się ciała o masie m_2 .

1. Jeżeli ciało o masie m_2 znajduje się relatywnie daleko od granicy Roche'a to jego kształt jest kulisty.
2. Jeżeli ciało o masie m_2 zbliża się do granicy Roche'a to ulega ono deformacji ze względu na siły pływowe pochodzące od ciała o masie m_1 .
3. Jeżeli ciało o masie m_2 znajduje się na granicy Roche'a to ulega ono rozpadowi ze względu na to, że jego siły grawitacyjne są znacznie słabsze niż siły pływowe pochodzące od ciała o masie m_1 .
4. Część materii pochodzącej z rozpadu ciała o masie m_2 znajduje się bliżej ciała o masie m_1 i porusza się szybciej niż pozostała jego część.
5. Różnice w prędkości orbitalnej, czyli prędkości z jaką ciało porusza się po orbicie zmieniają materię pochodzącą z ciała o masie m_2 w rozproszony pierścień.

Bezpośrednim przykładem ciała niebieskiego, które wpisuje się w powyższy eksperyment myślowy jest rozpad komety Shoemaker-Levy 9 w 1992 roku w wyniku zbliżenia się do Jowisza.



Rys. 6. „Sznurowa perła” powstałych w wyniku rozpadu komety Shoemaker-Levy 9 w 1992 roku (Foto. NASA, ESA).



Rys. 7. Hipotetyczny schemat prowadzący do rozpadu naszego Księżyca. Ponieważ Księżyc co roku oddalana się naszej planety (Ziemi) więc schemat ten należy traktować tylko i wyłącznie jako przypadek hipotetycznej analizy omawianego problemu.

Obliczmy jeszcze promień sfery Roche'a (r_{HILLA}) dla planet wchodzących w skład Układu Słonecznego. Promień ten w przybliżeniu możemy określić jako:

$$r_{\text{HILLA}} = a \cdot (1 - e) \cdot \sqrt[3]{\frac{m_p}{3M_s}}, \quad (71)$$

gdzie a jest półosią wielką orbity, e jej mimośrodem, m_p jest masą planety, a M_s jest masą słońca równą $M_s = (1.98847 \pm 0.00007) \cdot 10^{30}$ kg.

Wykorzystując wzór na peryhelium, który został wprowadzony w zagadnieniu dwóch punktów materialnych (Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba – część I) równanie (71) możemy uprościć do następującej postaci:

$$r_{\text{HILLA}} = q \cdot \sqrt[3]{\frac{m_p}{3M_s}}, \quad (72)$$

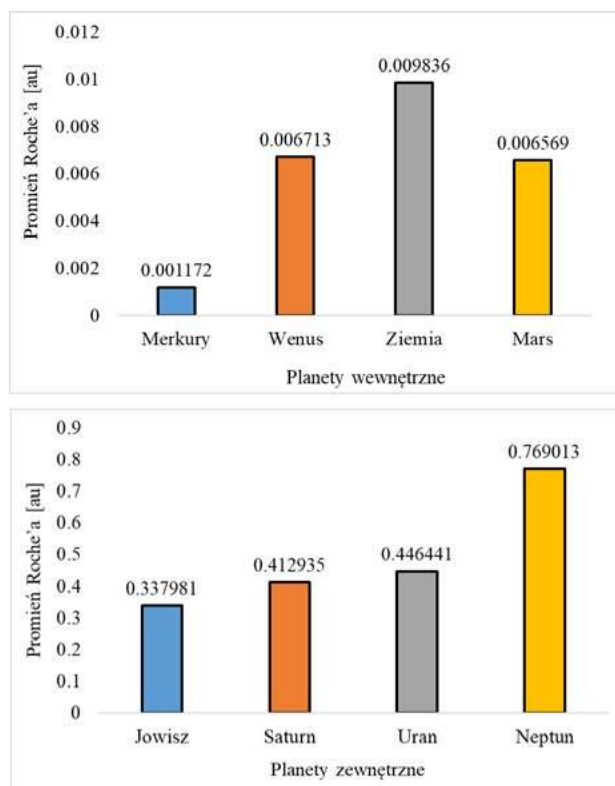
gdzie q określa peryhelium dla danego ciała niebieskiego $q = a \cdot (1 - e)$. Na podstawie równania (72) otrzymano wyniki promienia strefy Roche'a (r_{HILLA}) dla planet wchodzących w skład Układu Słonecznego.

Planeta	Peryhelium planety [au]	Masa planety [kg]	Promień Roche'a (r_{HILLA}) [au]
Merkury	0.3075	$3.3011 \cdot 10^{23}$	0.001172
Wenus	0.7184	$4.8675 \cdot 10^{24}$	0.006713
Ziemia	0.9833	$5.9721 \cdot 10^{24}$	0.009836
Mars	1.3814	$6.4171 \cdot 10^{23}$	0.006569
Jowisz	4.9506	$1.8982 \cdot 10^{27}$	0.337981
Saturn	9.0412	$5.6834 \cdot 10^{26}$	0.412935
Uran	18.2861	$8.6810 \cdot 10^{25}$	0.446441
Neptun	29.8100	$1.02413 \cdot 10^{26}$	0.769013

LITERATURA:

- [1] Rybka, E., 1976, Astronomia ogólna, PWN, Warszawa.
- [2] Borkowski, K. M., 1991, Astronomiczne obliczenia nie tylko dla geografów, UMK Toruń.
- [3] Artymowicz, P. 1995, Astrofizyka układów planetarnych, Wyd. Naukowe PWN.
- [4] Stodółkiewicz J. S., 1978, Astrofizyka ogólna z elementami geofizyki, PWN Warszawa.
- [5] Kreiner, J. M., 1988, Astronomia z astrofizyką, PWN Warszawa.
- [6] Wesołowski, M., 2023, Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba – część I, „Fizyka w Szkole z Astronomią”, nr 1, str. 44-50.
- [7] Wesołowski, M., 2023, Wybrane zagadnienia z mechaniki nieba – część II, „Fizyka w Szkole z Astronomią”, nr 2, str. 46-50.

Poniżej został przedstawiony rozkład zależności promienia Roche'a dla planet wewnętrznych i zewnętrznych należących do Układu Słonecznego.



Rys. 8. Rozkład zależności promienia Roche'a odpowiednio dla planet wewnętrznych i zewnętrznych.

dr hab. Marcin Wesołowski, prof. UR

Uniwersytet Rzeszowski, Kolegium Nauk Przyrodniczych, Instytut Nauk Fizycznych, Centrum Innowacji i Transferu Wiedzy Techniczno-Przyrodniczej Uniwersytetu Rzeszowskiego.

Fizyczne Ścieżki XVIII

Po czterech latach konkurs Fizyczne Ścieżki powrócił do formuły stacjonarnej i odbył się w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Otwocku 20-21 kwietnia 2023 roku. W trakcie dwudniowego finału konkursu, organizowanego przez Narodowe Centrum Badań Jądrowych i Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk, zakwalifikowani do niego uczniowie zaprezentowali swoje prace w jednej z trzech kategorii: Pokaz Zjawiska Fizycznego, Praca Naukowa lub Esej.

Kategoria: Pokaz Zjawiska Fizycznego I miejsce – Paweł Wąkulk, „Generator Marxa czyli wytwarzanie sztucznych błyskawic”, IV LO im. Stanisława Staszica w Białej Podlaskiej.



Finał Konkursu

Joanna i Anna Tokarz, praca „Ze świecą w poszukiwaniu zjawisk fizycznych”

Kategoria: Praca Naukowa I miejsce Michał Mielnicki „Wpływ ciągłej wymiany dielektryka na pojemność kondensatora”, V LO im. Augusta Witkowskiego w Krakowie

W kategorii Esej: II miejsce ex aequo otrzymali: Aleksandra Badora „Dlaczego to fizyk może rozwiązać wielką zagadkę matematyczną?” Publiczne LO nr II z Oddziałami Dwujęzycznymi im. Marii Konopnickiej w Opolu oraz Magdalena Listek „Laboratorium o rozsuwanych ścianach”, V LO im. Augusta Witkowskiego w Krakowie.

Nagrodę im. Prof. Ludwika Dobrzyńskiego dla nauczycieli i opiekunów naukowych, którzy wykazali się wyjątkowym zaangażowaniem w przygotowanie uczestników do konkursu przyznano nauczycielom ze Słupska Grażynie i Jarosławowi Linder.

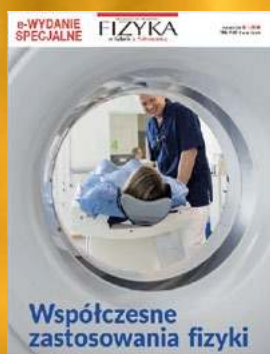
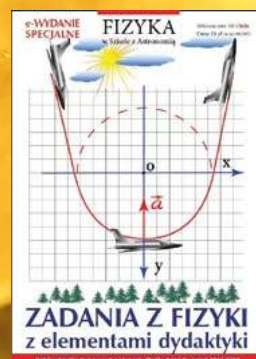
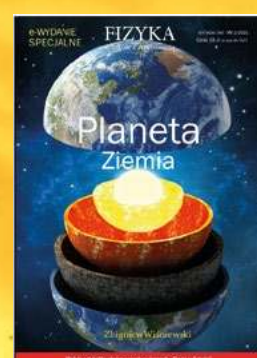


Cyfrowe wydania specjalne

Fizyki w Szkole

Tylko w wersji PDF!

Już od 10 zł!
Wysyłamy na adres
mailowy!



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

eprasa.pl 48cd047335



Dołącz do Stypendystów!
Rekrutacja trwa w maju i czerwcu.




fundusz.org

Zostań naukowcem!

Czekają na Ciebie:

- staże w wiodących ośrodkach badawczych
- projekty badawcze
- laboratoria

Znajdź przyjaciół!

Udział w Programie to:

- spotkania wyjazdowe
- obozy i warsztaty
- seminaria

Badaj przeszłość, planuj przyszłość!

Ułatwiony dostęp do:

- zbiorów i bibliotek
- staży w ośrodkach kultury
- archiwów

Sponsorzy:



Partnerzy:

