

FIZYKA

w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

366 (LXIV) indeks 35810X Nr 1 styczeń/luty 2020 CENA 30,00 zł (w tym 8% VAT)

ASTRONOMIA

Pioneer, Voyager, New Horizons

Świadkowie naszego istnienia

System Ptolemeusza a system Kopernika

Nadświatłne dżety w kwazarach

ZADANIA

Kosmiczne pomiary na ekranie komputera

Analiza i rozumienie wykresów

Wykorzystanie symetrii w rozwiązywaniu zadań

Gazy

Stany skupienia

ISSN 0426-3383



0.2
9 770426 338001

Tylko u nas! Pod jednym adresem www.dspress.com.pl

Prenumerata **w wersji drukowanej**

– nie ponosicie
dodatkowych opłat
za przesyłkę!

E-Prenumerata

– pliki PDF
– wysyłamy
bezpośrednio
na Twój komputer!

Roczniki archiwalne **w wersji drukowanej**

– do wyczerpania nakładu...

Wydania darmowe

– zamów, Czytaj
i wiedz więcej!

Wydania specjalne

– najciekawsze zbiory
artykułów, zadań
i scenariuszy lekcji!

Wszystkie wydania od 2009 roku
w wersji PDF – bez ograniczeń!

Drodzy Czytelnicy!

S erdecznie witam w imieniu redakcji i zapraszam do lektury naszych artykułów. Jak zwykle zaczynamy od tematyki kosmicznej a mianowicie od artykułu *Świadkowie naszego istnienia* autorstwa naszego długoletniego współpracownika Krzysztofa Ziółkowskiego. Autor opisuje w nim ze szczegółami trzy grupy sond kosmicznych, których misje mają jedną wspólną cechę. Otóż miały one opuścić Układ Słoneczny. Autor omawia nie tylko ich losy wewnątrz Układu Słonecznego, ale też zaplanowany dalszy przebieg misji. Oczywiście są to sondy Pioneer, Voyager i New Horizons.

Inny artykuł o tematyce kosmicznej to artykuł Jana Kurzyka pt. *Czy system Ptolemeusza równoważny jest systemowi Kopernika?* Jest to temat, na jaki napisano bardzo wiele artykułów, a mimo to wiedza na ten temat w tak zwanym ogóle społeczeństwa jest nadal niewielka. We wspomnianym artykule dyskutowane są głównie kinematyczne implikacje obu systemów.

Kolejny artykuł kosmiczny nosi nazwę *Kosmiczne pomiary z ekranu komputera* i jest to propozycja dla entuzjastów nauki, albo zapalonych dydaktyków, gdzie autor omawia jak za pomocą cyfrowego aparatu fotograficznego wykonać pomiary ważnych parametrów opisujących nasz Układ Słoneczny.

Poza artykułami opisującymi kwestie kosmiczne znajdują też Państwo wiele innych, jak na przykład artykuł Kazimierza Mikulskiego, ukazujący dokonania Leonarda da Vinci jako pioniera robotyki oraz artykuł Grzegorza Karwasza i Waldemara Krychowiaka poświęcone termodynamice gazów.

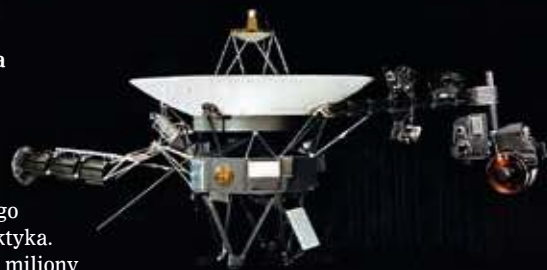
Tradycyjnie życzę Państwu miłej lektury!

Zbigniew Wiśniewski

28 Świadkowie naszego istnienia

■ Krzysztof Ziółkowski

Pioneer 10 i 11, Voyager 1 i 2 oraz New Horizons. Te sondy kosmiczne istnieć będą bardzo długo, pewnie tak długo jak istnieć będzie nasza Galaktyka. Można sobie wyobrazić, że za miliony czy nawet miliardy lat, kiedy nas już nie będzie, nie będzie Ziemi, nie będzie Słońca, one pozostaną we Wszechświecie jedynymi materialnymi świadkami naszego istnienia.



Fizyka wczoraj, dziś, jutro

4 Cztery i pół stanów skupienia. Gazy

■ Grzegorz Karwasz, Waldemar Krychowiak

10 Roboty Leonardo da Vinci w 500 rocznicę śmierci

■ Kazimierz Mikulski



Z naszych lekcji

14 Wynalezienie kondensatora

■ Tadeusz Wibig

16 Wykresy na lekcjach fizyki - potrzeba przestrzegania zasad ciągłości i różniczkowalności funkcji

■ Andrzej Sokołowski

19 Wykorzystanie symetrii w rozwiązywaniu zadań fizycznych

■ Czesław Surowiec

22 Kosmiczne pomiary z ekranu komputera

■ Roman Bochanyś

24 Pokazowe eksperymenty fizyczne działające na intelekt, wyobraźnię i emocje

■ Andrzej Kuczkowski, Jarosław Nowakowski, Andrzej Kozłowski, Leszek Wicikowski



Nowości wydawnicze

27 Meteority, dziwne kamienie

■ Nowości PWN

Astronomia dla każdego

33 Czy „gwiazdy śmierci” zagrażają Ziemi?

■ Nauka w Polsce

34 Czy system Ptolemeusza jest równoważny systemowi Kopernika?

■ Jan Kurzyk

Pytanie zawarte w tytule byłoby niezrozumiałe w czasach Kopernika i jeszcze długo po nim. Dzieło Kopernika miało znaczenie nie tylko naukowe, ale również, a może przede wszystkim, światopoglądowe i opór przed przyjęciem wniosków z niego wynikających był ogromny.

40 Loty kosmiczne a teoria względności. Miniatura dydaktyczna

■ Waldemar Reńda

42 Konstrukcyjne wyjaśnienie nadświetlnych dźwięków w kwazarach

■ Grzegorz M. Koczan

Sensacyjne doniesienia włoskich naukowców z 2012 roku o rzekomym nieznacznym przekroczeniu prędkości światła przez neutrino to zaledwie aperitif względem spaghetti, czy nawet pieczeni rzymskiej jaką oferują kwazary



FIZYKA

w Szkole z Astronomią

NUMER 1 STYCZEŃ/LUTY 2020
366 (LXIII) indeks 35810X ISSN 0426-3383

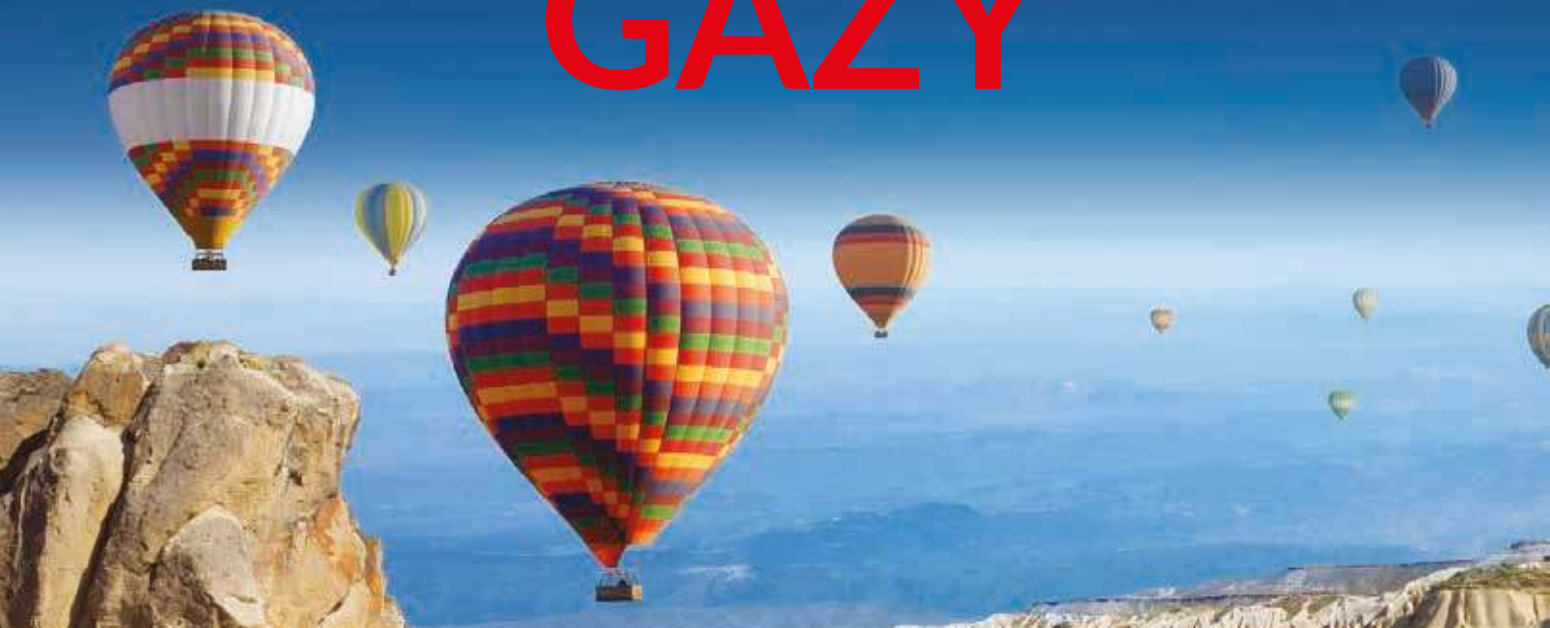
Nakład 3000 egz. CENA 30,00 zł
(w tym 8% VAT)

Komitet redakcyjny Krystyna Jabłońska-Ławniczak, Jerzy Kreiner, Andrzej Majhofer (Przewodniczący Komitetu), Zygmunt Mazur, Andrzej Szymacha, Mirosław Trociuk
Redakcja Zbigniew Wiśniewski (redaktor prowadzący – fizyks@wp.pl) Adres redakcji ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa Wydawnictwo Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244, www.aspress.com.pl, NIP: 951-134-91-51 Wydawca i redaktor naczelny Józef Szewczyk, szewczyk24@gmail.com Prenumerata www.aspress.com.pl/prenumerata-2020/, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244 Reklama Jędrzej Chodakowski, jchodakowski1953@gmail.com Skład i łamanie Vega design Druk i oprawa Paper & Tinta, ul. Ceglana 34, 05-270 Nadma

Zdjęcie na okładce i wspis treści: Dreamstime.
Redakcja nie zwraca nadesłanych materiałów, zastrzega sobie prawo formalnych zmian w treści artykułów i nie odpowiada za treść płatnych reklam.

Cztery i pół stanów skupienia

GAZY



Przedstawiamy artykuł będący kontynuacją serii o stanach skupienia. Zaczęliśmy [1] od czwartego stanu skupienia, czyli plazmy [1]; później pisaliśmy o wodorze i gazowych ogniwach paliwowych [2]. Ale o gazach można, a nawet trzeba napisać znacznie więcej. Tym bardziej, że żyjemy na dnie gazowego oceanu¹.

Grzegorz Karwasz, Waldemar Krychowiak

„Cztery są więc, zdaniem Empedoklesa, żywioły” ziemia, woda, powietrze i ogień” pisał Arystoteles, zacytowawszy wcześniej Anaksymena i Anaksagorasa (albo odwrotnie). Nie trzeba więc pamiętać, co uważał Anaksagoras, a co ten drugi, bo po trzystu latach po nich (tzw. szkoła jońska filozofii przyrody) sprawozdał to Filozof. Ciekawe jest natomiast, że cztery „żywioły” pojawiły się nie w „Fizyce”, ale w „Metafizyce” (Ks. I, 849a, 10-12).

Gazów dotyczy kilka ważnych, a często zapomnianych praw. Waga (i stopień trudności) tych praw jest różny: zaznaczamy * wiedzę zasadniczą, również na poziomie szkolnym; przez ** wiedzę, np. z włoskich podręczników licealnych (trudniejszych niż w Polsce) i przez *** wiedzę, której, może się zdarzyć, nie zna nawet student fizyki.

Gazy doskonałe

1. Gazy, jako atomy (cząsteczki) swobodne, to znaczy niezwiązane siłami wzajemnego oddziaływania, są wspólnym obiektem badawczym i dla fizyki, i dla chemii.

W fizyce mówimy o gazie doskonałym – jest to jeden z piękniejszych przykładów modelu w nauce, czyli

abstrakcji od szczegółów tak, aby móc wyciągnąć ważne wnioski, znacznie wykraczające poza pojedynczy przypadek. Model ten szczególnie dobrze stosuje się do gazów atomowych, czyli szlachetnych (He, Ne, Ar, Kr, Xe).

*Model gazu doskonałego zakłada, że atomy gazu są punktowe, pozostają w bezustannym ruchu (tak jak uważał Demokryt, zob. „Historię Filozofii” Wł. Tatar-kiewiczza) i nie oddziałują ze sobą poza zderzeniami. Atomy zamknięte w (trójwymiarowym) pudle uderzają bezustannie w jego ścianki. Stąd bierze się ciśnienie gazu na ścianki, na przykład balonu.

** Zakładając, że atomy obijają się od ścianek elastycznie (a tak trzeba założyć, bo w przeciwnym razie gaz sam z siebie oziębiałby się), można wyliczyć, jaki pęd Δq (przez p oznaczymy ciśnienie) przekazuje ściankom pojedynczym atom w każdym zderzeniu:

$$\Delta q = 2mv,$$

gdzie przez m oznaczyliśmy masę atomu a przez v składową prędkość prostopadłą do wybranej ścianki (czynnik „2”, gdyż atom odbija się elastycznie). Jeśli w pudle o objętości $V = a^3$ jest N atomów, to w każdą z sześciu ścianek uderza $N/6$ atomów w czasie ich przelotu od końca do końca pudła.

¹ Atmosfera, formalnie, rozciąga się na setki kilometrów wysokości, ale my żyjemy w najniższej warstwie, troposferze, która rozciąga się do wysokości 10 km.



Fot. 1. „Start rakiety odrzutowej w kosmos” na pokazie „4 i pół stany skupienia” prof. G. Karwasza w Szkole Podstawowej w Dąbrowie Biskupiej (23/10/2019). Gaz „pompuje” balon: to ciśnienie drobin powietrza rozciąga ścianki balonu.

Jeśli prędkość (prostopadła do ścianki) wynosi v , to czas takiego przelotu² wynosi $t = a/v$. Z zasady równości przekazu pędu i popędu $Ft = \Delta q$ wyliczymy siłę, z jaką atomy oddziałują na ścianki. Wynosi ona

$$F = \frac{N}{6} \frac{2mv}{a/v} = \frac{N}{3} \frac{mv^2}{a} = \frac{2N}{3} \frac{E_k}{a} \quad (1)$$

gdzie przez E_k oznaczyliśmy energię kinetyczną pojedynczego atomu (można dodać „średnią – przedyskutujemy to dalej). A ponieważ powierzchnia ścianek jest a^2 , to ciśnienie p gazu (zgodnie z prawem Pascala dla cieczy i gazów – takie same w każdym punkcie wewnątrz pudła) wynosi

$$p = \frac{F}{a^2} = \frac{2}{3} \frac{N}{V} E_k \quad (2)$$

Innymi słowy, ciśnienie gazu w pudle zależy od koncentracji atomów (ich ilości w danej objętości) i energii kinetycznej pojedynczego atomu. Już, już, jesteśmy na tropie jednego z piękniejszych praw wczesnej fizyki – prawa gazu doskonałego. Wystarczy tylko przyjąć, na razie jeszcze nieco na „wiarę”, że energia kinetyczna cząsteczek zależy tylko od ich temperatury: a raczej, że to temperatura jest miarą energii kinetycznej gazów. Tak! gdy wystawiamy zimą rękę za okno, to receptory neuralne na dłoni mierzą energię kinetyczną uderzających w nie atomów!

W fizyce „prawdziwej” pozostaje jednak nieco na „wiarę”. Otóż zakłada się, że miarą energii kinetycznej atomów, niezależnie od ich masy (koloru, rodzaju itd.) jest temperatura. Mówimy dodatkowo o ekwipartycji energii: średnia energia kinetyczna każdego z atomów w gazie doskonałym równa jest $3/2kT$, gdzie na każdy w trzech kierunków ruchu przypada $1/2 kT$.

k , czyli tzw. stała Boltzmanna mówi, ile energii przypada na poszczególny atom (i stopień Kelvina) – niewiele: zaledwie $1,23 \times 10^{-23}$ J/K.

² Atomy w rzeczywistości nie przelatują od jednej ścianki do drugiej, ale zderzają się jeden z drugim, i wzajemnie sobie przekazują pęd, jak się to dzieje w wahadle Newtona [3].

³ Warunki „normalne” odnoszą się do 0°C lub do 20°C, w zależności od instytucji, która je definiuje.

⁴ W H_2 wzbudzenie elektronowe z pierwszej „orbity” do drugiej to 10,2 eV a seria Balmera widoczna w widmie optycznym to przejścia o energiach 2-3 eV, z orbit trzeciej, czwartej itd. na drugą; najniższe wzbudzenie wibracyjne to 0,55 eV a przejścia rotacyjne są od siebie odległe o 0,0075 meV. W CF_3Cl najniższe przejście wibracyjne to zaledwie 0,043 eV. Z tego powodu ten gaz i jemu podobne niepalne „freony” były używane w lodówkach: ich ciepło właściwe w temperaturze pokojowej (300 K odpowiada energii $kT = 25$ meV) zawiera składnik pochodzący od wzbudzeń wibracyjnych, czyli gaz efektywnie przenosi (pobiera i oddaje) ciepło.

**Fizyka kwantowa nie do końca uporała się z wyjaśnieniem ekwipartycji energii, ale jest to bardzo ważne prawo – rodzaj demokracji w gazie doskonałym. Każdy atom, niezależnie od masy, ma tę samą energię. No właśnie! czyli nie tę samą średnią prędkość, jeśli porównamy hel i argon: 1245 m/s dla atomów He i 394 m/s dla atomów Ar [4] (w warunkach „normalnych”³ czyli 20°C).

Mamy tu już pierwszy, bardzo interesujący wynik: ponieważ rozchodzenie się dźwięku polega na „drganiach podłużnych gazu”, czyli, praktycznie, na zderzeniach atomów, prędkość dźwięku inna jest helu a inna a argonie: 973 i 323 m/s, odpowiednio. Nabrawszy w płuca helu, „śpiewamy” śmiesznym, wysokim falsetem (prędkość rozchodzenia się dźwięku w powietrzu to 334 m/s).

Wikipedia podaje nieco inny wzór na prędkość dźwięku c w gazie, wprowadzony przez Newtona:

$$c = \sqrt{\frac{c_p}{c_v} \frac{p}{\rho}} \quad (3)$$

gdzie ρ jest gęstością gazu, p – jego ciśnieniem, a c_p i c_v są (uwaga!) wartościami ciepła właściwego przy stałym ciśnieniu i przy stałej objętości, odpowiednio. Ale ponieważ te ciepła wynikają z ekwipartycji energii, za chwilę je wyprowadzimy.

Drobiny i atomy

*Zasada ekwipartycji energii w gazie doskonałym daje inne ciekawe konsekwencje. Otóż, z atomów składa się gazowy hel i neon, He i Ne, ale gazowy wodór i azot, mówią chemicy, ma wzór H_2 i N_2 – jest nie atomem, ale cząsteczką. Czy ktoś to może potwierdzić? Tak, możemy to zobaczyć „gołym okiem”: potrzebna rurka do wyładowań w gazie (Plückera) i najprostsza nawet siatka dyfrakcyjna, jak w „Fizyce zabawek” [5]. W widmie helu widzimy piękne, silne kolorowe linie, fot. 2a. Linie wodoru, a jeszcze bardziej azotu są, co prawda widoczne, ale obok nich jakby rozmyte tło: kiedyś nazywano to widmem pasmowym – to też linie, tylko duże „gęściej” położone. Tak! wodór, azot, tlen to *cząsteczki*, H_2 , N_2 , O_2 .

** W helu linie pochodzą z przeskoków elektronów z orbity na orbitę, dość dobrze określonych. Cząsteczka azotu może dodatkowo drgać, skąd dla danych dwóch orbitali pojawiają się dodatkowe poziomy energii. O ile poziomy (orbitale) elektronowe są odległe o jakieś 1-2 eV (pisaliśmy o tych jednostkach w poprzednich artykułach), to poziomy wibracyjne są odległe o 0,01-0,1 eV (w zależności od rodzaju cząsteczki⁴). Ale dodatkowo drobina może również obracać się. Obroty też są kwantowane, a odległości między poziomami rotacyjnymi są niewielkie, rzędu pojedynczych meV. Z tego powodu



a)



b)

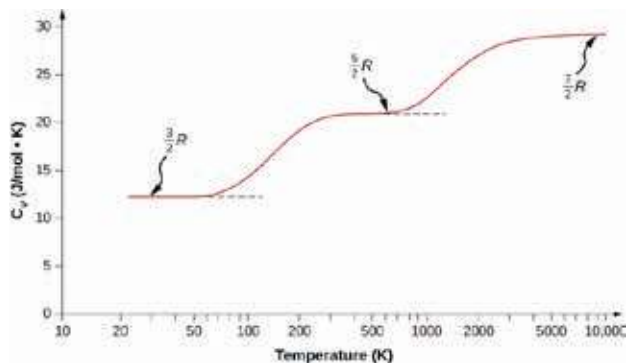
Fot. 2. Jak rozróżnić „gołym okiem” atomy od cząsteczek? Za pomocą prostej siatki dyfrakcyjnej i rurek Plücker’a [7]. Widmo „liniowe” (fot. 2a) pochodzi od wzbudzonych atomów – He w tym przypadku, widmo „pasmowe” (fot. 2b), szeregu nierozdzielnych linii pochodzi od cząsteczki – N₂ w tym przypadku.

* Wzór (3) łatwo jest sprawdzić. Potrzebna jest duża (2 l) prawie pełna butelka gazowanego płynu. Schładzamy butelkę z lodowce: w niskiej temperaturze gazy rozpuszczają się w cieczach łatwiej – odwrotnie niż ciała stałe. Jest to oczywiste – rozpuszczenie soli czy cukru wymaga zwiększenia energii kinetycznej atomów rozpuszczanej substancji a rozpuszczenie gazu wymaga obniżenia energii kinetycznej cząsteczek gazu, więc niska temperatura to ułatwia. Dużo gazu rozpuszczonego oznacza małe ciśnienie gazu w butelce nad cieczą. Stukamy drewnianym kołkiem (lub zgiętym palcem) w butelkę nad cieczą i nasłuchujemy, jaki dźwięk powstaje. Po czym potrząsamy (zamkniętą) butelką, aby zwiększyć ciśnienie gazu i stykamy puk-puk ponownie – wydawany dźwięk ma wyższą częstotliwość. Większa prędkość rozchodzenia się gazu przy większym ciśnieniu zgodnie ze wzorem (3) oznacza, że stojąca fala dźwiękowa wewnątrz butelki ma więcej „węzłów” i „strzałek” – czyli wyższą częstotliwość. Zanim otworzysz butelkę, poczekaj aż gaz się ponownie rozpuści; dobrze jest też nieco ścisnąć butelkę – pod większym ciśnieniem gaz się łatwiej rozpuszcza.

za pomocą prostej siatki dyfrakcyjnej nie jesteśmy w stanie rozdzielić tych poziomów i widmo wygląda na „pasmowe”.

Czyli, w prostym (i niezbyt drogim) doświadczeniu widzimy „gołym okiem” że gazowy azot to *drobina*, N₂ (widmo „pasmowe”) a hel to atom, He (widmo „liniowe”).

** Fakt, że drobiny mogą się obracać, powoduje, że ich ciepło właściwe jest wyższe niż gazów atomowych. Tak jak ruch translacyjny (liniowy) może się odbywać w trzech kierunkach, i na każdy z nich przypada ½ kT kwantu energii, tak samo rotacje mogą odbywać się wzdłuż trzech prostopadłych osi i na każdy „mod” rotacji przypada ½ kT. Z tym, że w drobinach liniowych, jak H₂ i N₂ obroty wokół osi drobiny nie wnoszą udziału do bilansu energii (zerowy moment bezwładności). Ciepło właściwe przy stałej objętości dla H₂, N₂, O₂ wynosi więc 5/2 kT na drobinę.



Fot.3. Ciepło właściwe wodoru (H₂) w funkcji temperatury (skala logarytmiczna) [8]. Ciepło właściwe gazów jest niezwykle proste koncepcyjnie: cv dla gazów atomowych wynosi 3/2R (trzy kierunki ruchu translacyjnego) a dla drobin dwuatomowych 5/2R (dodatkowo dwa kierunki rotacji). Ale „przydziałem” energii rządzi mechanika kwantowa: jeśli temperatura jest zbyt niska, niemożliwe są rotacje; a w wysokich temperaturach drobina zaczyna drgać: pojawia się dodatkowe kT kwantu wzbudzenia wibracyjnego.

Aby przeliczyć ciepło właściwe na mol gazu, musimy przemnożyć stałą *k* przez ilość atomów w molu, czyli przez liczbę Avogadra. Otrzymujemy tzw. stałą gazową,
 $R = (1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}) \cdot 6,02 \cdot 10^{23} = 8,31 \text{ J/K}$

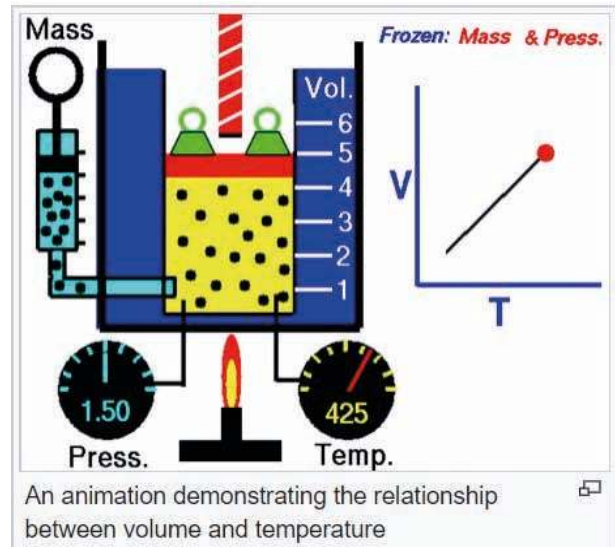
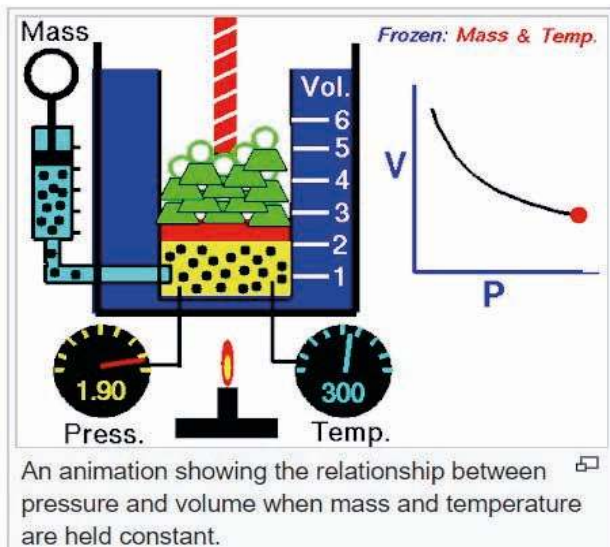
Ciepło molowe gazów cząsteczkowych, takich jak N₂ i H₂ to $c_v = 5/2R$. Ciepło właściwe bardziej złożonych cząsteczek, szczególnie nieliniowych jak H₂O jest jeszcze większe (dodatkowe ½R na rotacje wokół trzeciej osi), $c_v = 27,5 \text{ J/(mol}\cdot\text{K)}$ w 370 K [7]: para wodna bardzo efektywnie i chłodzi i parzy.

*** Mechanika kwantowa dodaje, że wraz ze wzrostem temperatury stają się „osiągalne” również wzbudzenia drgań cząsteczki: każdy kwant wzbudzenia wibracyjnego to kolejne kT. Tak więc zależność ciepła właściwego do temperatury przypomina wchodzenie po schodach [8], rys. 3.

Przemiany gazowe

Zapiszmy równanie (2) nieco inaczej, zastępując energię kinetyczną atomu przez 3/2 kT

$$pV = \frac{2}{3} NE_k = \frac{2}{3} N \left(\frac{3}{2} kT \right) = NkT \quad (4)$$



Rys. 4. Piękne animacje przemian gazowych: izo-termicznej (dokładane są ciężarki a objętość się zmniejsza) i izo-barycznej (grzeje świeczka, ciśnienie pozostaje stałe a rośnie objętość). Źródło: Wikipedia [9].

Wiedząc, że N (ilość atomów) to ilość moli gazu n przemnożona przez liczbę Avogadro i zastępując $N_A k = R$ otrzymujemy szkolną zależność między ciśnieniem gazu, jego objętością i temperaturą

$$pV = nRT \quad (5)$$

Równanie dobrze znane, intuicyjnie proste: im większa temperatura gazu T tym większe jego ciśnienie p , a jeśli gaz może się rozszerzać (np. przesuując tłok w cylindrze silnika benzynowego) – tym większa objętość.

To proste prawo gazu doskonałego, opisane równaniem (5) ma kilka szczegółowych form, w zależności czy stała jest temperatura, ciśnienie czy objętość. Jeśli nie zmieniamy temperatury, to przemiana jest izo-termiczna. Może być też izo-baryczna, i izo-choryczna, ale nie musimy tego pamiętać. Ważniejsze jest kojarzenie wykresów. W stałej temperaturze ciśnienie i objętość są *odwrotnie* proporcjonalnie.

$$pV = \text{const} \quad (6)$$

W drugiej połowie XVIII wieku Francuzi i Anglicy konkurowali o supremację w Ameryce, ale również w nauce. Tak więc równanie (6) w Anglii nazywa się prawem Boyle'a, a we Francji – Mariotte'a. Szczęśliwie, niezależnie od nazwiska, wykres w układzie współrzędnych p - V jest zawsze hiperbolą, rys. 4a. Im wyższa temperatura, tym hiperbola położona jest dalej od początku układu współrzędnych.

Proporcjonalne wprost są natomiast ciśnienie (lub objętość) w zależności od temperatury w przemianie izo-chorycznej (lub izo-barycznej, odpowiednio), rys. 4b.

$p \propto T$ (przemiana izo-choryczna, prawo Guy-Lussaca, tym razem jedno nazwisko)

$V \propto T$ (przemiana izo-baryczna, prawo Charlesa)

Oczywiście, temperatura musi być mierzona w kelwinach.

Należy dodać jedną ciekawą uwagę przy okazji tych dwóch przemian: obie polegają na zmianie temperatury,

czyli ogrzewaniu (oziębieniu) gazu. Ale dostarczane ciepło nie jest takie samo: w przypadku przemiany izo-barycznej (tzn., gdy zmienia się objętość) tłok się przesuwa, czyli jest wykonywana (pobierana) praca. Ilość tej pracy, zgodnie z definicją pracy, to przesunięcie tłoka przemnożone przez siłę działającą na tłok (czyli ciśnienie gazu przemnożone przez powierzchnię tłoka). Bez trudu można sprawdzić, że przy zmianie temperatury o ΔT ta praca to $\Delta W = nR(\Delta T)$.

W przemianie izobarycznej, dla takiego samego wzrostu temperatury należy dodatkowo dostarczyć ciepła na wykonanie tej pracy. Tak więc ciepło w przemianie izobarycznej c_p jest większe od c_v dokładnie o R . Niezależnie od rodzaju gazu!

$$c_p = c_v + R$$

Niezwykle ważne prawo, jako że współczynnik c_p/c_v pojawia się w kilku ważnych wzorach, począwszy od wzoru (3) na prędkość dźwięku. Innym wzorem jest zależność objętości i ciśnienia w przemianie *adiabaticznej*, tzn. takiej, w której nie ma wymiany ciepła z otoczeniem. Pompowanie roweru ręczną pompką i przesuwanie się tłoka silnika spalinowego po zapaleniu się mieszanki są dobrymi przykładami takiej przemiany.

Zasada ekwipartycji energii „zwalnia” nas z konieczności pamiętania c_p/c_v : dla gazów atomowych jest to $(3/2+1)/(3/2) = 5/3$, dla gazów dwuatomowych $(5/2+1)/(5/2) = 7/5$.

Molowe ciepło właściwe c_v (w jednostkach R) dla kilku gazów dla 25° C (z wyjątkiem H₂O, dla 100° C) podajemy w tabeli (źródło: wikipedia)

Gaz	He	Ar	H ₂	N ₂	Cl ₂	H ₂ O	CO ₂
c_v	1,50	1,51	2,47	2,50	3,09	3,31	3,40

Gazy niedoskonałe

Jeśli są gazy doskonałe, to muszą być też gazy niedoskonałe (czyli *rzeczywiste*). Wróćmy do założeń mode-



Rys. 5. Różnicę temperatury skraplania gazowego tlenu i azotu pokazujemy w efektywnym doświadczeniu. Na zewnętrznych ściankach aluminiowego naczynia wypełnionego ciekłym azotem skrapla się tlen i zaczyna spadać w postaci kropeł. Tłące się luczywko umieszczone poniżej zapala się płomieniem, ilekroć spadnie na nie kropla tlenu. Stąd ta piękna polska nazwa: „tlen” (w innych językach albo oxygen jak po grecku, albo kisko-rod po rosyjsku). Po latach doświadczeń, puszką, na której skrapla się „ulteniający” tlen, jest jakby spalona.

lu: punktowe atomy, nie oddziałujące ze sobą (poza zderzeniami). Oczywiście, takiego gazu nie ma. Atomy gazu mają swoje rozmiary. Jak to zmierzyć? Pierwszy sposób to ścisnąć gaz tak, aby zamienił się w ciecz: trzeba go przy tym schładzać. W ten sposób fizyk Zygmunt Wróblewski i chemik Karol Olszewski skroplili najpierw tlen, w temperaturze -183°C , a później azot, -196°C (używamy stopni Celsjusza, aby pokazać, że jest to bardzo zimno).

Gazy dają się skroplić dzięki siłom *przyciągania* między ich atomami (drobinami). Im większa więc cząsteczka, tym łatwiej gaz skroplić: benzyna (heksan, C_6H_{12}) jest w temperaturze pokojowej cieczą a metan (CH_4) – gazem. Ale nie tylko wielkość „geometryczna” cząsteczki jest istotna, ale rodzaj (przyciągającego) oddziaływania między cząsteczkami. Cząsteczka metanu nie ma *momentu dipolowego* (jest symetryczna), a cząsteczka amoniaku NH_3 ma moment elektryczny dipolowy (w tzw. debye’ach 1,42 D). To przyciągające oddziaływania między dipolami powodują, że temperatura skraplania amoniaku wynosi -78°C a metanu -182°C . Nie mówiąc o H_2O (moment dipolowy 1,85 D).

Całe szczęście, że woda ma tak duży moment dipolowy: nie dałaby się skroplić ani nie rozpuszczałyby soli – nie byłoby życia na Ziemi.

Dwa efekty – twardych kulek i przyciągających się drobin zmieniają prawo gazu doskonałego (5). Ciśnie-

nie gazu rozrzedzonego jest mniejsze niż być powinno, a objętość zgniecionego gazu nie spada do zera. Równanie (5) przechodzi w tzw. równanie van der Waalsa (tu zapisane dla jednego mola gazu):

$$\left(p + \frac{a}{V^2}\right)(V - b) = RT \quad (7)$$

w którym parametr b zawiera informacje o „rozmiarach” atomów, a parametr a – o ich wzajemnych oddziałyvaniach.

Rozmiary (średnice) „twardych” kulek uzyskanych z parametru b wynoszą około

$2\text{-}3 \times 10^{-10}$ m (czyli 2-3 Å), niezależnie czy jest to hel czy argon. Klóci się to nieco z intuicją. Inny sposób, odkryty przez autora (GK), poprzez rozpraszanie antymaterii (anty-elektronów) daje wyniki bardziej „uporządkowane” [10]: 0,4 dla He i 1,0 dla Ar.

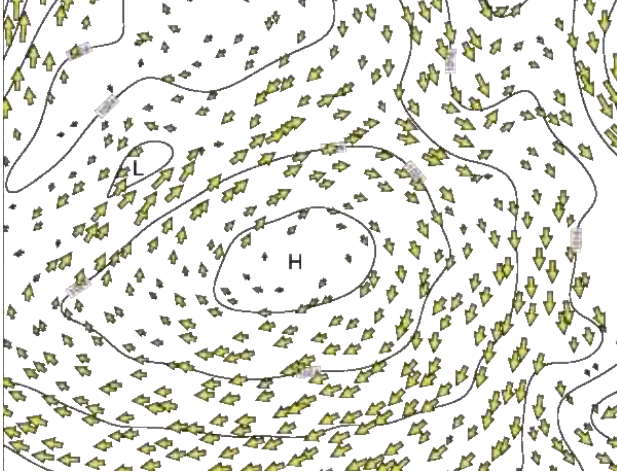
Prawo Daltona, niebezpieczna sauna i wyżę pogodowe

Jest jeszcze jedno bardzo ważne, a słabo znane prawo dotyczące gazów. Otóż na ciśnienie w zbiorniku składają się *wszystkie* gazy w nim zawarte. Ciśnienie powietrza w tzw. warunkach *normalnych*, tj. na poziomie morza, przy 20°C wynosi 1013 hPa. To mniej więcej jakby odważnik jednego kilograma położyć na końcu małego palca: 981 hPa to siła grawitacji działająca na 1 kg masy odniesiona do 1 cm^2 – całkiem, całkiem sporo! To właśnie ciśnienie atmosferyczne utrzymuje nasze miękkie ciało w całości – w kosmosie, bez skafandra człowiek by eksplodował⁵.

To składanie się poszczególnych gazów na całkowite ciśnienie nazywamy ciśnieniami częściowymi, czyli *parcjalnymi*. Jeśli więc ciśnienie atmosferyczne wynosi 1 bar (to jeszcze inne jednostki, podawane czasem na oponach samochodowych), to ciśnienie pochodzące od tlenu wynosi 0,2 bara a od azotu 0,79 bara i od argonu 0,01 bara, niezależnie, że te gazy są chemicznie różne. Nazywamy to bardzo ważne prawo prawem Daltona: jest ono jednym z dowodów na strukturę atomową materii.

Wszystkie gazy zawarte w powietrzu składają się na ciśnienie całkowite. Najtrudniej to jest sobie uświadomić z parą wodną. Wchodząc zimą do ciepłego a szczelnie zamkniętego mieszkania czujemy, jak jest tam *wilgotno* (a szczególnie jeśli, nie daj Boże!, gospodyni suszy ręczniki na kaloryferach). Higrometr (np. taki z włosa albo nowoczesny elektroniczny) pokaże 60% wilgotności. Czy to znaczy, że 60% powietrza w tym pomieszczeniu do drobiny H_2O ? Bynajmniej! Udusilibyśmy się. Jest to tzw. wilgotność względna – odniesiona do maksymalnej ilości pary wodnej, która w temperaturze 25°C może się w powietrzu „rozpuścić”. Maksymalnie rozpuścić – w sensie, że dodanie pary wodnej do powietrza o *względnej* wilgotności 100% spowoduje wytrącenie się mgły. Wilgotność *bezwzględna*, czyli ciśnienie *parcjalne* pary wodnej w 25°C to 23 hPa (lub 17 torr, jeśli użyjemy starych jednostek ciśnienia, czyli mm słupa rtęci).

⁵ Jak to by wyglądało pokazano w filmie o Marsie z Arnoldem Schwarzeneggerem, „Pamięć absolutna”.



Rys. 6. Z wysokiego ciśnienia nad Azorami (zalega tam powietrze, z którego para wodna już się skropliła) wynika kierunek wiatrów: decyduje o tym siła Coriolisa. Jeśli powietrze wypływa (a tak jest w przypadku wyżu) wiatry, na półkuli północnej, zakręcają w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara (mówimy o tzw. anty-cyklonie). Taką pogodę [12] udało nam się uchwycić 16/11/2019.

Jak wiemy ze zjawiska wrzenia, ciśnienie parcjalne pary wodnej w 100°C jest równe ciśnieniu atmosferycznemu (bąbelki pary wodnej rosną, rozpychając się na przekór ciśnieniu atmosferycznemu). Innymi słowy, w saunie o temperaturze powietrza 90°C, jeśli ktoś nierozsądnie poleje gorące kamienie wodą, można się po prostu *uduścić*: w tej temperaturze 70% „powietrza” to para wodna, zob. [11]. Tlenu jest więc zaledwie 6% (= 0,2x30%). Wówczas warto położyć się na podłodze: tam jest więcej tlenu. To dlatego, że „para wodna poleciała do góry” – powietrze (azot, tlen) są *molowo* cięższe niż para wodna (N_2 - 28, O_2 - 32 a H_2O tylko 18 g/mol). A prawami gazów rządzą *mole*: mol *każdego* gazu to 22,4 litra.

Stąd wynika bardzo dziwna, na pierwszy rzut oka, zależność: wilgotne powietrze jest *lżejsze* niż suche. W meteorologii suche, czyli ciężkie powietrze oznacza *wyż* – ciśnienie wyższe niż 1013 hPa. Tak jakby poziom powietrza przypominał jakieś naczynia połączone⁶. Wyż baryczny oznacza więc ładną pogodę – i zimą, i latem. Szczególnie zimą powietrze jest suche, tzn. zawiera (w miarach bezwzględnych) mało pary wodnej⁷: w 0°C to tylko 6 hPa ciśnienia parcjalego. Stąd ważna kompetencja *społeczna* – aby zimą wysuszyć zimne mieszkanie, trzeba koniecznie otworzyć okno. Tak, aby wymienić cieplejsze (a mokre, w sensie ciśnienia parcjalego) powietrze z pokoju na suche powie-

⁶ Analogia nie do końca jest poprawna: nawet w przypadku cieczy ich poziom jest wyznaczony przez równość ciśnienia w miejscu połączenia dwóch naczyń.

⁷ Nawet przy -20°C trochę pary wodnej w powietrzu jest: nie byłoby chmur *cirrusów* na wysokości kilku km, gdyby tam para wodna nie docierała jako gaz.

Co w fizyce piszczy

Zastosowanie pola elektrycznego do usuwania dwutlenku węgla

Dwutlenek węgla ma obecnie zdecydowanie złą passę. Wszyscy chcą zredukować jego zawartość. Ale jak? To wiedzą tak naprawdę tylko rośliny. Np. jednokomórkowe glony. My ludzie też uczymy się tej sztuki. Ostatnio grupa naukowców zademonstrowała urządzenie, które też to potrafi. Jest to układ metalowych blaszek pokrytych specjalnym polimerem z dodatkiem nanorurek węglowych. Jeśli teraz takie blaszki podłączymy do źródła prądu stałego („baterii”) to na ich powierzchni zacznie zachodzić gwałtowna absorpcja dwutlenku węgla. Następny etap procesu polega na kontrolowanym uwolnieniu zaabsorbowanego dwutlenku

węgla np. w zbiorniku, tak aby móc go potem zutylizować np. zakopać. Jak to zrobić? Otóż wystarczy przekręcić wyłącznik i zmienić polaryzację elektrod. Wtedy nasz polimer uwolni dwutlenek węgla. Podstawową zaletą tego systemu jest, że może pracować przy małych stężeniach CO_2 i zużywa przy tym mało energii. Czyli jest prawie tak mądre jak przeciętny glon. Dodatkowo jest odporne na awarie. Jego wynalazcy chwalą się, że w warunkach laboratoryjnych wytrzymało 70 000 cykli ładowania i rozładowania.

trze zza okna. Ale na krótko – tak, aby nie wyziębnić ścian, bo wówczas skropli nie na nich woda. Proste?

Po czym poznać wyż baryczny, bez barometru a widząc niebo? Po kierunku wiatru. Wyże, na półkuli północnej kręca się zgodnie z kierunkiem wskazówek zegara (mówimy, że są to anty-cyklony). Wyże istotne dla pogody w całej Europie pojawiają się nad wschodnim Atlantykiem, nad Wyspami Azorskimi, rys. 6.

Dlaczego nad Atlantykiem występuje wyż (czyli suche powietrze) mimo, że jest wszędzie ocean dookoła? Tak! nad oceanem jest pełno pary wodnej, ale nie skrapla się ona, gdyż brakuje zarodków do kondensacji – czyli pyłów. A te występują nad wyspami. Czyli nad oceanem brak chmur, a nad wyspami są. W ten sposób Kolumb wypatrywał Ameryki: szukając chmur na horyzoncie.

Reasumując

Doświadczeń i zabaw z powietrzem (i próżnią) jest wiele [13]. Ważne do zapamiętania jest, aby wietrzyć rano własny pokój, przez parę minut i wypompować w ten sposób nadmiar pary wodnej. Bo jeśli ta para w jakimś zimnym kącie pokoju skropli się, to biada! Aby odparować gram wody (z temperatury 20°C) potrzeba aż 520 kalorii – tyle ile, aby zagrzać tę wodę do 540°C. Ale o cieczach będzie następnym razem.

Grzegorz Karwasz, Waldemar Krychowiak

Katedra Dydaktyki Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

LITERATURA

- [1] G. Karwasz, „Od kuli plazmowej do plazmy termojądrowej” Fizyka w Szkole nr 1/2019, str. 4-8.
- [2] G. Karwasz i in. „Samochód na wodę”, Fizyka w Szkole, 4/2019, 10-15.
- [3] <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/mech/wahnewt-pl.html>
- [4] https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_velocity
- [5] <http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/optyka/okulary-pl.html>
- [6] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pliki/Rozowa_lampka.pdf
- [7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Water_\(data_page\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Water_(data_page))
- [8] <https://phys.libretexts.org>
- [9] https://en.wikipedia.org/wiki/Boyle%27s_law
- [10] G. Karwasz, „Positrons – an alternative probe to electron scattering”, Eur. Phys. J. D, 35 (2005) 26.
- [11] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/termo/psychometr_big-pl.html
- [12] <https://www.weather-forecast.com>
- [13] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/4_i_pol_stany_skupienia/

Roboty Leonardo da Vinci w 500 rocznicę śmierci

Kazimierz Mikulski

Nie ma wątpliwości, wielu ludzi uważa, że Leonardo da Vinci był geniuszem. Mimo że obecnie jest powszechnie uznawany za wielkiego artystę, to jego osiągnięcia w innych dziedzinach są również godne poznania i upowszechnienia. Ważny jest fakt, że był samoukiem w dziedzinach innych niż malarstwo. Jedną z dziedzin, godną przypomnienia jest budowa mechanizmów, pierwowzorów automatów, także programowalnych.

Wśród wielu wynalazków Leonarda są również automaty, które zostały odkryte stosunkowo niedawno – w połowie XX wieku. Jasne jest, że Leonardo wynalazł takie urządzenia, które przetrwały do dziś, ale nie do wszystkich konstrukcji znaleziono opis sposobu, w jaki działały. Ostatnio liczne próby odtworzenia automatów Leonarda da Vinci zostały wykonane przez różnych uczonych i pracowników muzeów. Te rekonstrukcje mogą różnić się małymi niuansami, które nie są w pełni zdefiniowane w manuskryptach Leonarda.

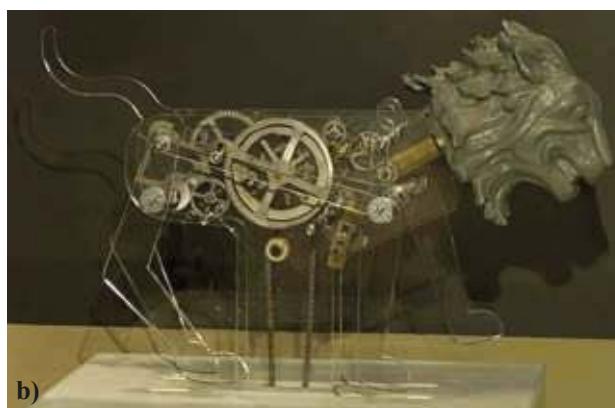
Maruszczak Marek, w jednym z artykułów umieszczonych w Internecie, przedstawia model mechanicznego lwa Leonardo da Vinci, odtworzonego po ponad pięciuset latach.

Sławny Włoch był nie tylko genialnym malarzem, inżynierem i wynalazcą. Wręcz specjalizował się w „efektach specjalnych”, a jednym z jego ciekawszych dzieł był mechaniczny lew naturalnej wielkości, który doczekał się we Francji jakby „nowego życia”. Zadanie z odtworzeniem mechanicznego lwa było tym trudniejsze, że włoski mistrz nie pozostawił żadnego modelu, szkicu konstrukcyjnego ani instrukcji przedstawiającej budowę mechanicznego zwierzęcia. Lwa zrekonstruowano posiłkując się jedynie rysunkiem mechanizmu mogącego służyć do jego napędzania oraz zachowanymi spisnymi relacjami naocznych świadków. „Robota” nakręca się podobnie jak zegarek lub stare mechaniczne zabawki. Po naciągnięciu sprężyn, lew stawia 10 kroków, macha głową na boki, kilkakrotnie otwiera i zamyka paszczę oraz macha ogonem¹. Odczytane zapiski wskazują, że Lew ten został przedstawiony królowi Francji jako urządzenie rozbawiające lub gest dyplomatyczny. Okazuje się, że podobnie jak w przypadku innych wynalazków Leonarda da Vinci sposób działania tego automatu nie jest całkowicie jasny, ale jednak, także w przypadku tego robota, podjęto próby rekonstrukcji. Dla bardziej zaciekawionych przedstawiony jest filmik umożliwiający obejrzyć działanie mechanicznego lwa, a znaleźć można

¹ Źródło: <https://gadzetomania.pl/33767,mechaniczny-lew-leonarda-da-vinci-odtworzony-po-500-latach-wideo>



a)



b)



c)

Fotografia 1. Różne modele mechanicznego lwa a) z Château du Clos Lucé, Amboise, b) Model Luca Garai Źródło: Museo Galileo, Florencja, c) Włoski ośrodek badawczy Leonardo3 wyprodukował działający drewniany model lwa z kołami linowymi. Źródło: Muzeum Leonardo3, Mediolan
Źródło: <https://cacm.acm.org/blogs/blog-cacm/240615-leonardo-da-vincis-robot-lion/fulltext>

pod adresem <https://www.youtube.com/watch?v=xNWE2AdfNuo&feature=related>

Robot sprzed pięciu wieków, mechaniczny rycerz Leonarda da Vinci

Istnieje automat, która, jak czytamy w literaturze przedmiotu, reprezentuje paradygmat połączenia między nauką, technologią i sztuką. Leonardo da Vinci stworzył pierwszy znany nam humanoidalny automat, który oczywiście miał cele wojskowe. W 1957 r., w czasie którego obchodzono pięćsetną rocznicę urodzin Leonarda, włoski historyk Carlo Pedretti odkrył szkice wykonane około 1495 roku, przedstawiające mechanicznego rycerza służącego do celów obronnych. W średniowiecznej zbroi niemiecko-włoskiej istniała seria mechanizmów, które pozwalały robotowi stać, siedzieć, przesuwając ramiona, szyję i podnosić daszek zbroi poprzez system kół pasowych i kabli.



Fotografia 2. Rekonstrukcja mechanicznego rycerza Leonarda. Zdjęcie: Erick Möller. Mensch- Erfinder – wystawa Genie, Berlin 2005.
Źródło: <http://rosfilmfestival.com/en/a-robot-over-five-centuries-old-leonardos-mechanical-knight/>

Nie wiadomo, czy w tym czasie powstał jakikolwiek prototyp tego robota, ale w 2002 roku ekspert w dziedzinie robotyki Mark Rosheim przeniósł rycerza mechanicznego do XXI wieku, opierając swoją pracę na studiach nad projektami z XIV wieku.

Inny entuzjasta Leonarda, Mario Taddei, dyrektor techniczny i badacz w Centrum Studiów Leonardo w Mediolanie, który również pracuje w muzeum, zbudował w 2007 roku kolejny prototyp, który został ulepszony i zawierał więcej szczegółów, po odczytaniu informacji ze szkiców Leonarda. W obu przypadkach robot działał idealnie.

Na stronie internetowej YouTube można obejrzeć 7 Wyłazków Leonardo da Vinci <https://www.youtube.com/watch?v=PwOIIIGGDVjE> lub <https://www.youtube.com/watch?v=n-h32XpDYBw> – trochę historii jego życia.

Działanie helikoptera https://www.youtube.com/watch?v=NPoV_vnidhw i innych urządzeń wynalezionych



Fotografia 3. Nowoczesna rekonstrukcja robota Leonarda da Vinci w laboratorium Leonardo3 w 2007 roku

Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6b/Leonardo_Da_Vinci_Robot_Leonardo3_2008-1.jpg Oraz <https://www.youtube.com/watch?v=oxDB-k9UJeQc>

przez Leonarda <https://www.youtube.com/watch?v=r66E-6QLsMLg>

Drogomierz (do pomiaru przejechanej odległości)
<https://www.youtube.com/watch?v=1qyE0AmpoBI>

Data projektu i możliwa konstrukcja tego robota to 1495 rok, nieco ponad pięć wieków temu. Kluczowym punktem w produkcji jest brak znaku towarowego, ponieważ Leonardo był projektantem tego wyrafinowanego systemu. Jego notatki z *Codex Atlanticus* stanowiły podstawę rekonstrukcji w oparciu o opis tego działania.

Począwszy od lat pięćdziesiątych, badacze z University of California zaczęli zastanawiać się nad znaczeniem niektórych znaków da Vinci na rysunkach technicznych. Takie oznaczenia występują również w jego *Codex Atlanticus* (największym pojedynczym zbiorze arkuszy da Vinci, składającym się z 1119 oddzielnych stron i 481 folio) oraz dużej liczby innych urządzeń mechanicznych.

Dalsze badania w Istituto e Museo di Storia della Scienza we Florencji dostarczyły wielu informacji na temat intencji Leonarda dotyczących jego mechanicznego rycerza. Otóż, wyniki badań wskazują, że robot da Vinci miałby zewnętrzny wygląd germańskiego



Fotografia 4. Model samobieżnego wózka da Vinci. Źródło: www.leonardo3.net, źródło: <http://www.allonrobots.com/leonardo-da-vinci.html>

rycerza. Miał on złożony rdzeń mechanicznych urządzeń, które prawdopodobnie były zasilane przez człowieka. Robot posiadał dwa niezależne systemy operacyjne. Pierwszy miał nogi o trzech stopniach swobody: kostki, kolana i biodra. Drugi miał cztery stopnie swobody w ramionach z przegubowymi ramionami, łokciami, nadgarstkami i rękami. Mechaniczny analogowy programowalny kontroler w skrzyni zapewniał moc i kontrolę ramion. Nogi były napędzane przez zewnętrzny mechanizm korbowy napędzający linkę, który łączył się z kluczowymi miejscami w pobliżu stawów kończyny dolnej².

Leonardo da Vinci w wieku 26 lat również wynalazł programowalny samochód z napędem na przednie koła z mechanizmami zawieszenia. Uważa się, że przypomniał to urządzenie ponownie, gdy w wieku 40 lat zbudował programowalnego automatycznego lwa. Do tego czasu wyprodukował własne metalowe sprężyny, a także sprężyny bębnowe zwane tamborkami. Ustawił bezpiecznik na nieruchomym obracającym się wałku mocy, który byłby używany do zasilania jego programowalnego automatu.³

Na portalu internetowym Robot Surg opisują „Ewolucja robotycznych ramion”. Autor przedstawia dokładny przegląd piśmiennictwa na temat natury i rozwoju tego urządzenia z naciskiem na zastosowania chirurgiczne. Przeanalizował opublikowaną literaturę i sklasyfikował zautomatyzowane urządzenia według ich zastosowania: pokaz, zastosowanie przemysłowe, zastosowania medyczne, itp.

Surg zauważyła istnienie wyraźnego trendu w produkcji ramion robotycznych w kierunku bardziej zręcznych urządzeń, o większej liczbie stopni swobody i możliwościach większych od ludzkiego ramienia. Autor przypomina, że Da Vinci zaprojektował pierwsze zaawansowane ramie robota w 1495 roku z czterema stopniami swobody i ana-

logowym kontrolerem pokładowym, zapewniającym moc i programowalność.⁴

Przedstawiony powyżej (fot. 4) obiekt to mechanizm również znany jako wózek Leonarda. O ile wiemy, uważa wielu autorów, wcześniej było wiadomo, że mechanizm był samobieżny, ale nie wiadomo, czy wózek był programowalny. Jak się okazuje, w wyniku przeprowadzonych badań, wózek był w rzeczywistości programowalny.

Wcześniejsze interpretacje różnych uczonych wydają się niedokładne w świetle ostatnich odkryć. Obecnie istnieją dwie wersje możliwych interpretacji. Jedną tworzy Mark Rosheim, a drugą Leonardo3⁵. Jest kilka interesujących książek do przeczytania o robotach Leonarda. Te książki zostały napisane przez tych samych ludzi, o których wspominałem powyżej, dotyczących odkryć w tej dziedzinie.

Książka Marka Rosheima „Zagubione roboty Leonarda” pokazuje, jak Rosheim zrekonstruował automaty Leonarda da Vinci, takie jak programowalny wózek, mechaniczny lew, rycerz-robot i automat, który uderzał w dzwon. W ten sposób książka pokazuje znaczenie pracy Leonarda w historii robotyki.

Wymieniłem również grupę badawczą – Leonardo3. Oni też przygotowali książkę poświęconą robotom Leonarda zwanych „robotami Leonarda da Vinci”. Ta książka zawiera wiele ilustracji rękopisów i projektów. Ciekawą rzeczą jest to, że wraz z książką można uzyskać zestaw programowalnego wózka. Książkę można znaleźć na stronie Leonardo3 o adresie <http://www.leonardo3.net/en/>.

Leonardo da Vinci był jednym z najbystrzejszych umysłów swoich czasów. Na szczęście dla entuzjastów robotyki, takich jak Ty i ja, przyczynił się także do historii robotyki. Podobnie jak w innych aspektach jego życia, jego roboty są również nieco spowite tajemnicą⁶.

² Źródło: <http://www.allonrobots.com/leonardo-da-vinci.html>

³ Źródło: <https://www.liebertpub.com/doi/abs/10.1089/end.2006.20.986>

⁴ Źródło: Robot Surg opisują „Ewolucja robotycznych ramion” <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/25484945>

⁵ Leonardo3 to grupa badawcza skupiająca się wyłącznie w celu rekonstrukcji wynalazków Leonarda da Vinci. Wykonali olbrzymią pracę przy tworzeniu nowych interpretacji wielu wcześniej znanych wynalazków, a także odkrywaniu nowych.

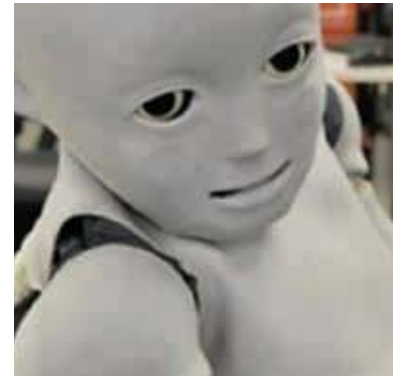
⁶ Źródło: <http://www.allonrobots.com/leonardo-da-vinci.html>

Robot Leonardo Da Vinci powinien spotkać się z robotem Da Vinci

Paul Seaburn pisze o najciekawszej i najbardziej przerażającej atrakcji na Międzynarodowej Wystawie Robotów 2015 w Japonii. Autor porusza zagadnienie niewątpliwie niezwykle realistyczne, a mianowicie wskazuje na zrobotyzowaną wersję artysty, wynalazcy i wszechstronnego geniusza, czyli Leonarda da Vinci. Co *Leonardo da Robot* miałyby pomyśleć o własnym robocie da Vinci, mechanicznym rycerzu, którego zaprojektował i zdemontował w 1495 roku?⁷

Robot da Vinci został opracowany przez Minoru Asadę z Uniwersytetu w Osace jako narzędzie do nauczania japońskich dzieci o da Vinci. Oprócz tego, że jest niesamowicie realistyczny, robot da Vinci mówi płynnie po japońsku, czego nawet nie potrafili zrobić prawdziwi włoski geniusz.

Co by pomyślał da Vinci o swoim androidowym sobotwórcze? Być może nie byłby pod wrażeniem, odkąd stworzył swojego własnego robota ponad 500 lat temu. Wynalazca Leonardo był czarodziejem z kołami zębatymi, kołami pasowymi i ciężarkami – jak widać na rysunkach jego wersji zegara, klimatyzatora i wózka z własnym napędem. Wszystkie te komponenty i inne elementy weszły w jego robotycznego rycerza.



Fotografia 5. Profesor Minoru Asada i jego robot

Źródło: http://www.er.ams.eng.osaka-u.ac.jp/asadalab/?page_id=143&lang=en
<https://www.discovermagazine.com/technology/japans-child-robot-learns-to-walk>

Leonardo da Vinci zaprojektował i zbudował robota funkcjonującego w 1495 roku, a zaprojektowanie i zbudowanie robota, który przynajmniej wygląda jak da Vinci, zajęło ludziom tylko 500 lat. Autorzy wielu opracowań stwierdzają, że teraz potrzebujemy następnej generacji robotów, takich jakie konstruuje Mark Rosheim, aby połączyć je wszystkie w robota, który potrafi myśleć, projektować i budować, jak da Vinci⁸.

dr Kazimierz Mikulski
Maksymilianowo

⁷ 5 grudnia 2015 r

⁸ <https://mysteriousuniverse.org/2015/12/robotic-leonardo-da-vinci-should-meet-da-vincis-robot/>

Co w fizyce piszczy

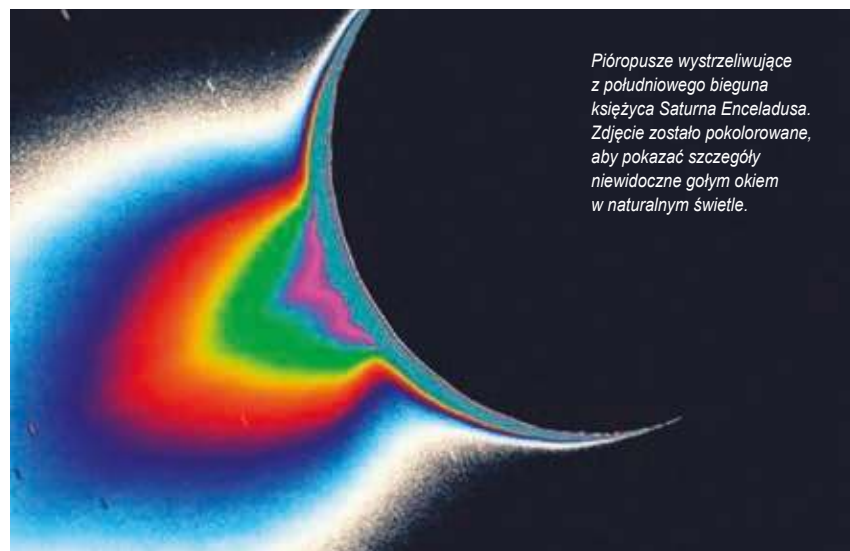
Żywe planety świecą w ultrafiolecie?

Naukowcy od wielu lat szukają życia poza naszą planetą. Poszukiwania te koncentrują się głównie wokół bliskich nam układów planetarnych. Przykładem takiego układu jest Proksima Centauri, wokół której krąży planeta skalista. Planeta ta krąży w odpowiedniej odległości od swojej macierzystej gwiazdy, aby mogło być tam życie jednak czy ono faktycznie tam jest pozostaje zagadką. Nie za bardzo wiadomo jak tego dokonać. Jednym z pomysłów jest poszukiwanie ultrafioletowego promieniowania emitowanego przez zamieszkujące tam organizmy. Ale skąd te promieniowanie? Otóż Proksima od czasu do czasu emituje niszczycielskie wiązki światła ultrafioletowego. Aby ochronić się przed takim promieniowaniem żyjące tam organizmy wytwarzałyby własne barwniki, których zadaniem byłoby pochłaniać promieniowanie ultrafiole-

to. Promieniowanie tych barwników mogłoby być wykrywane przez kosmiczne teleskopy. Taki mechanizm ochrony przed promieniowaniem ultrafioletowym obserwuje się w przypad-

ku, niektórych organizmów żyjących na rafach koralowych. Czy tak jest też na egzoplanetach? Czas pokaże.

Źródło: Jack T O'Malley-James, Lisa Kaltenegger. Biofluorescent Worlds – II. Biological fluorescence induced by stellar UV flares, a new temporal biosignature. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2019; 488 (4): 4530 DOI: 10.1093/mnras/stz1842



Pióropusze wyrzeliwujące z południowego bieguna księżycy Saturna Enceladusa. Zdjęcie zostało pokolorowane, aby pokazać szczegóły niewidoczne gołym okiem w naturalnym świetle.

Wynalezienie kondensatora

Petrus van Musschenbroek (1692 – 1761), i Ewald Jürgen Georg von Kleist (1700 – 1748)

Kondensator to podstawowy element układów elektronicznych. Bez niego nie działałoby żadne, trochę choćby wyrafinowane, urządzenie elektryczne.

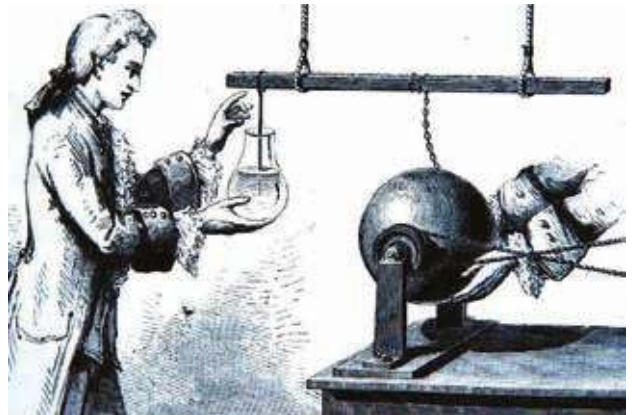
Tadeusz Wibig

W podręcznikach szkolnych najczęściej składa się on z dwu metalowych płytek umieszczonych w niedużej od siebie odległości. Trudno o coś bardziej trywialnego. A jednak, nad wynalezieniem kondensatora trudziło się przez wiele lat bardzo wiele wybitnych umysłów. Sukces był w dużej mierze przypadkowy, zupełnie niespodziewany, a nawet bolesny.

Zacznijmy jednak od początku: wszyscy wiedzą, że już starożytni Grecy znali elektryczność. Po niemal dwóch tysiącach lat z zapomnienia wydobył ją i odkurzył niejaki **William Gilbert** w swoim wielkim dziele „*De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*”, gdzie opisał przyciąganie różnych drobin przez potarty bursztyn. Dziś nikt się temu nie dziwi. Wiemy od dziecka, że bursztyn „elektryzuje” się i już. Dopiero jednak 70 lat po Gilbercie słynny ze swoich rozważań nad próżnią Otto von Guericke skonstruował efektywną maszynę do pocierania (z użyciem korby) wielkiej kuli z siarki, która pocierana przyciągała i odpychała różne drobne przedmioty.

Uważa się powszechnie, że była to pierwsza maszyna elektrostatyczna. Eksperymenty z elektrycznością stawały się coraz bardziej wymyślne i efektowne. Niejaki **Georg Matthias Bose** zbudował sobie maszynę do pocierania pracując jako profesor filozofii naturalnej na Uniwersytecie w Wittenberdze. Wpadł on na świetny i praktyczny pomysł, dla nas dziś zupełnie oczywisty, że elektryczność z pocieranego przedmiotu można przenosić na inne ciała używając metalowych prętów. Mógł on w przemyślny sposób, po drucie, naelektryzować nie tylko wiszącego na linach chłopca, który mógł, a jakże, po zakręceniu korbą maszyny przyciągać drobne przedmioty, ale Bose elektryzował publicznie i piękne młode damy ustawiając je na specjalnym izolującym stołeczku, a one mogły – po zakręceniu korbą – razić prądem starających się pocałować je młodych kawalerów. Mógł także zapalać alkohol w kieliszku używając drobnej iskry wylatującej z końca metalowego ostrza podłączonego drutem do maszyny elektrostatycznej, mógł elektryzować wodę i inne płyny i przyciągać je, bądź odpychać.

Eksperymenty te spowodowały znaczny wzrost zainteresowania nauką o elektryczności wśród szerokiej mas. Aby jednak pokazać jakikolwiek efekt, niezbędne było stałe kręcenie korbą. Marzeniem eksperymentatorów było zmagazynowanie elektryczności w jakimś urządzeniu, z którego można by ją pobrać w odpowiedniej chwili. Przy braku słusznej teorii, poszukiwania swoje prowadzili



Doświadczenie z butelką lejdecką na rycinie z epoki (fot. Muzeum Historii Ziemi Kamieńskiej) - <http://www.ikamien.pl/drukuj/6281/>

oni po omacku. Ktoś, nie wiadomo kto, zauważył, że wiszący chłopiec, czy izolowana panienka dają solidniejsze iskry niż maszyna elektrostatyczna sama z siebie.

Przyjęta *ad hoc* teoria mówiła, że im większa jest masa ciała podłączonego do maszyny, tym więcej elektryczności można w nim zmagazynować. Pozornie logiczne i właściwie w pewnym sensie niegłupie. Próbowano więc załadować elektryczność także do butelek z wodą. Każdy miał w domu butelkę i każdy miał wodę, a z chłopcami na linach i pięknymi pannami mógł być kłopot, zwłaszcza, jeśli doświadczenia trwały czas jakiś.

Teoria o proporcjonalności ładunku do masy jakoś się jednak nie sprawdzała. Eksperymentatorzy załamywali ręce i wyrwali sobie włosy z głów i właśnie wtedy w dwóch odległych miejscach na świecie: w Lejdzie w Holandii i w Kamieniu Pomorskim (wtedy to były Prusy) niezależnie od siebie znaleziono właściwy sposób na przechowywanie elektryczności.

Pierwszy był **Ewald Jürgen Georg von Kleist**. Studiował on prawo w Lejdzie, gdzie też przysłuchiwał się wykładom znanego fizyka, **Willema Jacoba's Gravesande'a**. Po powrocie w rodzinne strony, już jako dziekan kapituły katedry w Kamieniu Pomorskim, zaczął bawić się w naukę powtarzając doświadczenia Bosego. Próbował załadować elektryczność do małej buteleczki przez wbity w korek igłę podłączając ją do maszyny elektrostatycznej. Szczęśliwym zbiegiem okoliczności, dzięki któremu von Kleist znalazł swe miejsce w historii fizyki, jego buteleczka była nieduża i mógł ją cały czas, podczas ładowania, trzymać w ręce, a w tym właśnie tkwiła cała tajemnica, choć von Kleist nic o tym nie wiedział.

Woda czy opary alkoholu na wewnętrznych ściankach buteleczki tworzyły jedną z elektrod pierwszego praktycznego kondensatora. Igła przebita przez korek łączyła

ją ze światem zewnętrznym. Drugą z elektrod była dłoń von Kleista odprowadzająca indukowany na niej ładunek „do ziemi”. Maszyna elektrostatyczna podłączona do igły ładowała kondensator, który pozostawał naładowany długo jeszcze po tym, jak przestano korbą kręcić, a gdy nieostrożnie von Kleist dotknął drugą ręką igłę, zamknął obwód i ładunki gwałtownie przepływały przez jego ciało z jednej elektrody do drugiej. Efekt można nazwać piorunującym.

Von Kleist nie bardzo zdawał sobie sprawę z wagi swojego odkrycia. Do pierwszego „porażenia prądem” doszło w Kamieniu Pomorskim 11 października 1745 roku, a dopiero 4 listopada von Kleist poinformował o tym oficjalnie **Johanna Nathanaela Lieberkühna** członka Niemieckiej Akademii Nauk i Royal Society i to od niego dowiedział się dopiero, jak niezwykle i ważne jest jego odkrycie. Niezwłocznie, 28 listopada, napisał do **Johanna Heinricha Wincklera** z Uniwersytetu w Lipsku, wybitnego specjalisty od elektryczności, który całkiem niedawno, bo w maju wykrzesał iskrę ze swojego palca i zapalił nią nie tylko wysokoprocentowy spirytus, jak Bose, ale także francuski koniak, a i wódkę – też ciekawy eksperyment chętnie pewnie potem powtarzany w towarzystwie. Poza Wincklerem napisał także do **Paula Swietliskiego**, ważnej osobistości z Gdańska, a w grudniu jeszcze do **Johanna Gottloba Krügera** z Königlich-Preußische Akademie der Wissenschaften w Halle nad Soławą, który badał swego czasu, jak liście maków poddane działaniu elektryczności zmieniają kolor z czerwonego na biały, a do historii przeszedł jako współtwórca współczesnej elektroterapii. Wszyscy ci uczeni próbowali powtórzyć eksperyment von Kleista, ale jakoś im się nie udawało. Być może krótki opis sporządzony przez niego był zbyt lakoniczny, a może nie przyłożyli się należycie. Pierwszemu, któremu się to udało był **Daniel Gralath**, późniejszy burmistrz Gdańska, a stało się to dopiero 5 marca 1746 roku.

Na uniwersytecie w Lejdzie pracował tymczasem **Petrus van Musschenbroek**, student wspomnianego Gravesande’a, słuchacz wykładów Newtona, poważny fizyk i szef katedry matematyki. On także poświęcał dużo uwagi zabawom z butelką – oczywiście studiując elektryczność. Przez dłuższy czas nic oryginalnego mu jednak z tego nie wychodziło, aż do chwili, gdy odwiedził go niejaki **Andreas Cunaeus** jego asystent, niektórzy mówią, że nawet przyjaciel (choć prawnik), inni twierdzą, że po prostu student.



Petrus van Musschenbroek - wikimediacommons

Niewiele, a właściwie nic nie wiemy o przeszłości i dalszych losach Cunaeus, choć to on prawdopodobnie doznał pierwszego w Holandii elektrowstrząsu. A wszystko przez to, że wziął raz do ręki ładowaną właśnie butelkę.

Potem wypadki potoczyły się tak, jak u von Kleista. Bolało! O swoim odkryciu van Musschenbroek poinformował niezwłocznie, 20 stycznia 1746 roku, **René Antoine Ferchault de Réaumur** (tego od skali termometrycznej), członka Francuskiej Akademii Nauk, Royal Society w Londynie i Królewskiej Szwedzkiej Akademii Nauk, a ten przedstawił wyniki prac van Musschenbroeka członkom Akademii Paryskiej. Stało się to w kwietniu 1746 roku. Urządzeniu do przechowywania elektryczności Musschenbroeka nadano, za sprawą **Jean-Antoine Nolleta** francuskiego fizyka, eksperymentatora, wytwórcy i sprzedawcy sprzętów laboratoryjnych dla ludzi bogatych i ciekawych świata, handlową nazwę **butelka lejdejska** i nazwa ta przyjęła się.

Kto więc wynalazł kondensator? Może nie jest to aż takie ważne, przecież są to w końcu tylko dwie blaszki w niewielkiej od siebie odległości. A poza tym każdy może zrobić sobie sam bez trudu własną butelkę lejdejską.

Doświadczenie domowe:

Butelka lejdejska

A. Potrzebne materiały:

1. Jednorazowy talerz z folii aluminiowej, tacka, foremka do pizzy;
2. Styropianowy kubek do napojów;
3. Kawałek styropianowej płyty (~ 50cm x 50cm x 10cm);
4. Szklanka z wodą;
- 4a. (W wersji ambitniejszej) butelka, koniecznie szklana i najlepiej z korkiem

5. Łyżeczka oczywiście metalowa;
- 5a. (W wersji ambitniejszej) metalowy drut (np. do robienia na drutach);
6. Trochę folii aluminiowej;
7. Fragment czegoś wełnianego do pocierania; ważne, żeby był czysty i suchy.

B. Narzędzia – taśma klejąca, nożyczki.

C. Kolejność czynności:

1. Po wewnętrznej stronie tacki do pizzy na środku przymocujemy taśmą



klejącą styropianowy kubek (To proste urządzenie, nazywa się **elektroforem**, a wynalazł je dopiero w roku 1762 szwedzki uczoney **Johan Carl Wilcke**, ale to temat na inną historię.);

2. Do szklanki nalewamy wodę;
- 2a. Nalewamy wodę do butelki;
3. Szklankę owijamy folią;
- 3a. Butelkę owijamy z zewnątrz aluminiową folią;
4. Do szklanki wkładamy łyżeczkę;
- 4a. Przebijamy korek drutem do robienia na drutach i zamykamy butelkę. Drut ma być z jednej strony zanurzony w wodzie, a z drugiej musi wystawać nieco;



Układamy płytę styropianową na stole i zaczynamy intensywnie pocierać wełnianą szmatką i pocieramy tak ciepłiwie około minuty;

5. Stawiamy nasz elektroforem na naelektryzowanej płycie styropianu;
6. Dotykamy palcem zewnętrznego brzegu tacki. Powinno dać się poczuć delikatny przeskok iskry z tacki na palec. Nie bójmy się, nic złego stać się nie może!
7. Unosimy nasz elektroforem trzymając go za styropianowy kubek, zbliżamy do szklanki (butelki) i dotykamy krawędzią do wystającej ze szklanki łyżeczki (do drutu wystającego z butelki w wersji dla ambitniejszych). Powinno dać się znów słyszeć przeskok małej iskierej.
8. Powtarzamy czynności od punktu 6 kilka razy. Tak długo, aż będziemy czuć/słyszeć przeskakujące iskierej albo znudzi nam się. Dziesięć razy to w sam raz. Możemy też ponownie naelektryzować płytę wracając do punktu 5.
9. A teraz bierzemy w jedną rękę szklankę (butelkę) chwytając oczywiście za folię, jaką ją owinęliśmy;
10. Zbliżamy powoli palec drugiej ręki do łyżeczki (końca drutu wystającego z butelki)
11. O tym, że doświadczenie się powiodło, powinniśmy przekonać się **wyraźnie** nim jeszcze łyżeczki dotkniemy. Tak właśnie wynaleziono kondensator.

UWAGA. Powodzenie doświadczenia zależy od wilgotności, tej w powietrzu, jak i tej gromadzącej się na przedmiotach, których użyjemy. Od niej też zależy czas, przez który nasza butelka lejdejska utrzymuje w sobie elektryczny ładunek. Można doświadczenie powtarzać stosując dłuższe i krótsze odstępy czasu pomiędzy realizacją punktu 9 i 10, w lecie i w zimie, na strychu i w piwnicy, rano i wieczorem. Wiele rzeczy jest jeszcze do zbadania.

Andrzej Sokółowski

Analiza i rozumienie wykresów na lekcjach fizyki są często dyskutowane w naukowych czasopismach, jednakże wykresy, które uczniowie analizują mogą, często niemyślnie, przedstawiać nierealistyczne sytuacje wprowadzające ucznia w błąd. Błędy te mogą wynikać z faktu, że wykresy nie są narysowane zgodnie z zasadami ciągłości i różniczkowości funkcji algebraicznych tam, gdzie one powinny te warunki spełniać.

Przedstawienie wykresów, które nie spełniają tych warunków może również podważać znaczenie zasad matematyki i ich wpływ na rozumienie fizyki. Poniższy artykuł jest kontynuacją wcześniej zapoczątkowanej dyskusji o przestrzeganiu praw i reguł rysowania wykresów na fizyce. W poprzednim artykule omówiliśmy, jak zapewnić, by dany wykres spełniał warunki funkcji. W tym artykule omawiamy bardziej szczegółowe elementy i wskazujemy na potrzebę przestrzegania zasad ciągłości i różniczkowości wykresów, szczególnie w kinematyce.

Wprowadzenie

Istnieje wiele zjawisk przyrodniczych, których zachowanie można opisać za pomocą funkcji jednej zmiennej. Najbardziej podstawowym sprawdzianem czy dany wykres opisuje taką zależność prawidłowo jest zastosowanie tzw. testu linii pionowej, który omówiliśmy wcześniej na łamach „Fizyki w Szkole” [1]. Nie jest to jednak wystarczające, ponieważ wiele zjawisk w przyrodzie następuje w sposób ciągły posiadając również ciągłą zmianę ich wartości. Artykuł ten podkreśla potrzebę przedstawiania wykresów, szczególnie w kinematyce, które nie tylko spełniają warunki funkcji, ale takich funkcji, które są ciągłe i różniczkowalne.

Podręczniki z fizyki często przedstawiają wykresy, które nie spełniają tych warunków, na przykład [2] co stwarza nierealistyczne interpretacje i powoduje trudności narysowania wykresów prędkości korzystając, na przykład z wykresu położenia ciała. Widząc to oczami studenta, błędne rysunki mogą poddać w wątpliwość cele poznawania zasad matematyki [3].

Wykresy funkcji reprezentujące na przykład położenie ciała, powinny być zdefiniowane w ich dziedzinie, jak również ich pierwsza pochodna (funkcja prędkości) i druga pochodna (funkcja przyspieszenia) powinny być zdefiniowane i pozwalać na policzenie ich wielkości w każdej chwili. Warunki te wprowadzone zostały do fizyki przez Leibniza w jego pracy *Principle of Continuity* i rozwinięte przez Newtona w *Principle of Fluxions* [4]. O ile ciągłość funkcji prędkości jest uwarunkowana różniczkowalnością funkcji położenia, ciągłość funkcji przyspieszenia jest zagwarantowana różniczkowalnością funkcji prędkości. Przypomnijmy te warunki i spróbujmy zbadać przykładowe wykresy zaczerpnięte z podręczników do fizyki pod tym kątem.

Ciągłość i różniczkowalność funkcji w kinematyce

Zacznijmy od najbardziej ogólnego warunku funkcji algebraicznej, czyli warunku przyporządkowania tylko

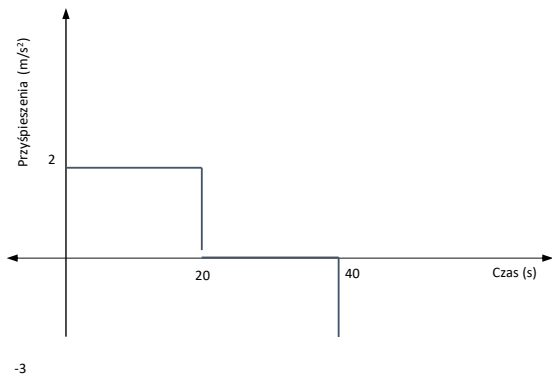
Wykresy na lekcjach fizyki

– potrzeba przestrzegania zasad ciągłości i różniczkowalności funkcji

jednej wartości zależnej dla danej wartości niezależnej (oznaczymy ten warunek A), przejdziemy później do omawiania warunku ciągłości funkcji (B) a następnie omówimy warunek różniczkowalności (C). Spróbujemy później zaaplikować te warunki do typowych wykresów pamiętając, że w kontekście *Principle of Continuity* wykres, który spełnia wszystkie te trzy warunki (A , B i C) odzwierciedla poprawnie rzeczywisty ruch.

A. Wykresy opisujące położenie ciała w funkcji czasu muszą spełniać warunek reprezentowania funkcji algebraicznych.

Wykres (Rys. 1) powinien reprezentować rzeczywisty ruch.



Rys. 1. Przykład wykresu przyspieszenia niespełniającego warunku funkcji

Wykres ten nie spełnia warunku funkcji dla $t = 20$ s, $t = 40$ s, ponieważ przyspieszenie posiada wiele różnych wartości w tych chwilach, co nie jest możliwe w przyrodzie. Matematycznie mówiąc, wykres nie reprezentuje funkcji algebraicznej. Interpretując ten wykres językiem dynamiki wartość siły działającej na to ciało w $t = 20$ s i $t = 40$ s ma nieskończenie wiele wartości, co jest nie możliwe. Konkludując, wykres ten błędnie przedstawia rzeczywistość i raczej nie powinien być podany uczniom do analizy.

B. Funkcje reprezentujące ruch muszą być ciągłe

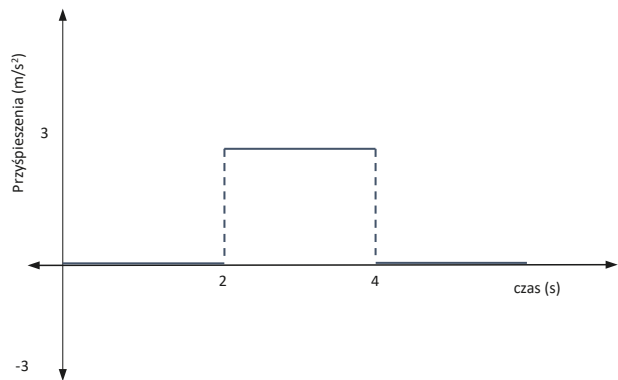
Powiedzieliśmy wcześniej, że wykresy położenia, prędkości i przyspieszenia muszą spełniać warunki funkcji. Jednakże ten warunek nie jest wystarczający, by reprezentować rzeczywisty ruch. Zwrócimy teraz uwagę na warunek ciągłości. Mówiąc prostym językiem, wykres jest ciągły w dowolnym punkcie, jeśli nie ma przerwy w tym punkcie. Matematycznie mówiąc, wykres funkcji $f(x)$ jest ciągły w $x = a$, jeśli spełnia on następujące warunki nazwane [5] testem na ciągłość funkcji:

- $f(x)$ posiada jedną wartość dla każdej wartości x (co omówiliśmy w punkcie A).
- $\lim_{x \rightarrow a^-} f(x) = \lim_{x \rightarrow a} f(x) = \lim_{x \rightarrow a^+} f(x)$ co interpretujemy, że granice jednostronne w pobliżu $x = a$ muszą posiadać takie same wartości, które to wartości muszą być rzeczywiste.

- $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$ co znaczy, że granica funkcji w $x = a$ musi być równa wartości funkcji w tym punkcie.

Test ciągłości zapewnia, że wykres ruchu nie ma przerw na swojej dziedzinie. Na przykład (zobacz Rys. 2) przedstawiony wykres jest algebraiczną funkcją, ale czy ta funkcja opisuje rzeczywisty ruch jest wątpliwe. Zauważmy, że ten wykres nie jest ciągły w dwóch wartościach czasu $t = 2$ s i $t = 4$ s co interpretujemy, że przyspieszenie tego ciała w tych punktach jest nierealne.

Ponadto, wykres ten, chociaż zaczerpnięty z oficjalnego podręcznika do fizyki nie pozwala na jednoznaczne stwierdzenie, jakie jest przyspieszenie ciała w chwili $t = 2$ s i $t = 4$ s. Ktoś mógłby twierdzić, że przyspieszenia w $t = 2$ s jest równe 0 m/s², ktoś inny powiedziałby 3 m/s². Tych wątpliwości można by uniknąć, jeśli poprawna reprezentacja matematyczna byłaby użyta: otwarte lub wypełnione małe kółko na wykresie wokół $t = 2$ s i $t = 4$ s. Ale nawet ta korekta nie zmieniałaby faktu, że wykres ten jest metodycznie niepoprawny.



Rys. 2. Wykres przyspieszenia niespełniający zasady ciągłości.

Spróbujemy jednak formalnie, korzystając z przytoczonych warunków, zbadać ciągłość tej funkcji dla $t = 2$ s. Załóżmy, że $a(2) = 0$. Czy to założenie jest wystarczające, by stwierdzić, że przyspieszenie tego ciała dla $t = 2$ s jest 0 i sklasyfikować ten wykres jako poprawny? Raczej nie. Przyjrzyjmy się bliżej jak ten przypadek będzie widziany oczami matematyki:

- $a(2) = 0$ co znaczy że $a(t)$ jest określone dla $t = 2$ s.
- $\lim_{t \rightarrow 2^-} a(t) = 3$ jednak $\lim_{t \rightarrow 2^+} a(t) = 0$

Konkluzja: ponieważ $\lim_{t \rightarrow 2^-} a(t) \neq \lim_{t \rightarrow 2^+} a(t)$, w związku z tym $\lim_{t \rightarrow 2} a(t)$ nie istnieje, co oznacza, że funkcja przyspieszenia jest nie ciągła dla $t = 2$ s i jako taka nie może reprezentować rzeczywistego ruchu. Fizycznie, obiekt nie może natychmiastowo zmienić przyspieszenia z 0 m/s² na 3 m/s², ponieważ siły działające na nie nie mogą być włączone lub wyłączone w tej samej chwili. Aby wykres przyspieszenia odzwierciedlał rzeczywistość, funkcja przyspieszenia musiałaby przyjmować wszystkie wartości pośrednie pomiędzy

0 m/s^2 i 3 m/s^2 jednocześnie spełniając warunek omówiony w punkcie A. Warto zauważyć, że jeśli wykres jest nieciągły dla określonych wartości odciętych, to nie będzie on również różniczkowalny na tych wartościach, tak więc jego pochodna nie będzie istnieć. Niestety nie każda ciągła funkcja zapewnia ciągłość jej pochodnej. Ten tok myślenia prowadzi do zastosowania bardziej wyszukanej procedury sprawdzenia wykresu (lub ogólnie funkcji) zwanej testem różniczkowalności funkcji [5].

C. Funkcje reprezentujące ruch muszą być różniczkowalne

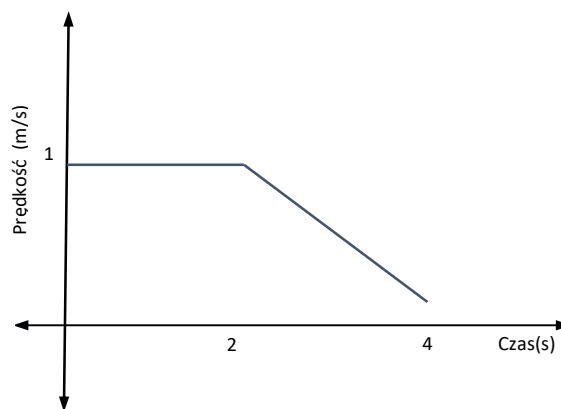
Funkcja jest różniczkowalna w danym punkcie, jeśli posiada ona pochodną w tym punkcie. Test różniczkowalności jest zakorzeniony we właściwościach granicy pochodnej $f'(x)$ w pobliżu $x = a$ (nazywanej często lewo i prawo – stroną granicą). Warunek ten zapewnia ciągłość zmian nachylenia linii stycznych do danego wykresu w danym punkcie. Formalnie, warunek ten jest oznaczany za pomocą jednostronnych granic $\lim_{x \rightarrow a^+} f'(x) = \lim_{x \rightarrow a^-} f'(x) = f'(a)$. Warunek ten informuje, że jeśli obydwie jednostronne granice pochodnej są równe wartości pochodnej w tym punkcie, $f(x)$ jest różniczkowalna w tym punkcie. Kryterium różniczkowalności funkcji składa się generalnie z trzech warunków, które włączają poprzednio omawiane warunki ciągłości funkcji:

- $f(x)$ musi być zdefiniowana w $x = a$ (1)
- funkcja musi być ciągła $\lim_{x \rightarrow a} f(x) = f(a)$ (2)
- $\lim_{x \rightarrow a^+} f'(x) = \lim_{x \rightarrow a^-} f'(x) = f'(a)$ pochodna posiada granicę(3)

Korzystając z prac Leibniza i Newtona powiemy, że wykresy z kinematyki, jak również inne wykresy, które opisują zjawiska zmienne w czasie powinny spełniać wszystkie te trzy warunki. Oznacza to, że na przykład wykres położenia ciała musi zapewnić ciągłe przejścia wartości prędkości, a wykres prędkości zapewnia ciągłość funkcji przyspieszenia ciała. Jeśli wszystkie trzy warunki są spełnione, można powiedzieć, że $f(x)$ jest różniczkowalna w $x = a$ i może być sklasyfikowana jako przedstawiająca realistyczne położenie ciała, jego prędkość, przyspieszenie lub siłę na nie działającą.

Przeanalizujmy pod kątem różniczkowalności rysunek 3; wykres prędkości w funkcji czasu.

Wykres ten reprezentuje ciągły ruch ciała, ponieważ spełnia on warunki (1) i (2). Przyjrzyjmy się jednak czy



Rys. 3. Wykres prędkości niespełniający zasady różniczkowalności

ta funkcja jest różniczkowalna w $t = 2 \text{ s}$. Innymi słowami zbadajmy czy przyspieszenie ciała jest zdefiniowane na przykład w $t = 2 \text{ s}$. Stosując warunek (3) dowiadujemy się, że $\lim_{t \rightarrow 2^+} v'(t) = -2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$ a $\lim_{t \rightarrow 2^-} v'(t) = 0 \text{ m/s}^2$ co prowadzi nas do stwierdzenia, że przyspieszenie ciała w $t = 2 \text{ s}$ nie istnieje, ponieważ funkcja prędkości w $t = 2 \text{ s}$ nie ma pochodnej. Mówiąc prościej, styczne do wykresu prędkości nie zmieniają się stopniowo z zerowego nachylenia po lewej stronie $t = 2 \text{ s}$ do nachylenia po prawej stronie $t = 2 \text{ s}$.

Wykresy z kinematyki muszą być ciągłymi funkcjami, ale te warunki nie są wystarczające. Ciągłość nie gwarantuje istnienia pochodnej funkcji, ponieważ istnienie pochodnej jest uwarunkowane różniczkowalnością funkcji podstawowej. Wykresy, które są prezentowane na lekcjach fizyki, chemii czy innych naukach muszą spełniać wszystkie trzy warunki, jeśli mają one przedstawiać naturalne zjawiska przyrodnicze. Powiemy więcej, wykresy nad którymi uczniowie pracują muszą generować realistyczne interpretacje dla każdej jednostki czasu, nie tylko tam, gdzie skupiamy uwagę ucznia.

LITERATURA

- [1] Sokolowski A., „O poprawności prezentowania wykresów na lekcjach fizyki”, Fizyka w Szkole Nr. 3/2018
- [2] Hamper Ch., Physics HL for the IB Diploma, 2nd ed. Harlow, Pearson Baccalaureate: p. 47., 2014.
- [3] Sokolowski A., Graphs in physics - a need for adherence to principles of function continuity and differentiability. Physics Education, 54(5), 055027, 2019.
- [4] Grabiner JV., The changing concept of change: the derivative from Fermat to Weierstrass Mathematics Magazine, 56(4), 195-206, 1983.
- [5] Stewart J., p.17 Calculus Concepts and Contexts, 2nd edn (Pacific Grove, Ca: Brooks/Cole), 2000.

W następnym numerze:

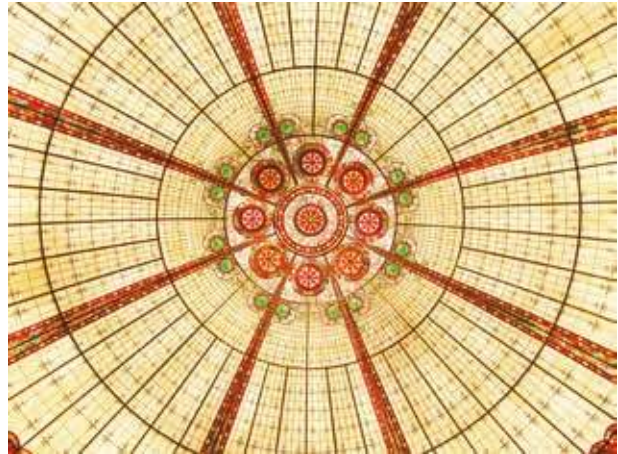
Dydaktyczne modele bani herona

Adam Buczek

Banię Herona uznaje się za jeden z pierwszych układów wykorzystujących energię pary wodnej do wywołania ruchu obrotowego. Nazwano ją od imienia uczonego, który u zarania naszej ery opisał jej konstrukcję w dziele „Pneumatyka”, choć inspirację czerpał prawdopodobnie z wcześniejszych źródeł. W każdej z sytuacji była to jedna z pionierskich konstrukcji maszyny cieplnej, gdyż do jej napędu używano wspomnianej pary powstałej z zagotowania wody w naczyniu umieszczonym nad paleniskiem. Tworzony gaz przekazywano do wirującego zbiornika o kształcie sferycznym (bani), z którego mógł uchodzić poprzez dwie kątowe rurki umieszczone na obwodzie. Rury dostarczające parę pełniły rolę osi obrotu, a moment pędu gazu uchodzącego wylotami powodował, na mocy III zasady dynamiki, powstanie momentu siły i obrót bani. Dzisiaj jej modele można podziwiać w muzeach – na przykład we wrocławskim Hydropolis.

Wykorzystanie symetrii w rozwiązywaniu zadań fizycznych

Najprostszą definicję symetrii podał matematyk niemiecki Herman Weil, zgodnie z którą symetrycznym nazywamy taki przedmiot, który można tak zmienić, że otrzymujemy w rezultacie z niego to, co było na początku.



Czesław Surowiec

Przez symetrię w fizyce rozumiemy własność układu fizycznego polegającą na tym, że dokonanie pewnych zmian parametrów charakteryzujących ten układ daje układ fizyczny o tych samych właściwościach. Zawsze jednak symetria polega na niezmienności pewnych cech fizycznych względem pewnych przekształceń jego współrzędnych.

Przekształcenie, przy którym właściwości układu fizycznego nie ulegają zmianie nazywa się przekształceniami symetrii danego układu. Z twierdzenia Noether (jeżeli własności układu fizycznego nie zmieniają się przy przekształceniach zmiennych, to odpowiada temu określone prawo zachowania) wynika, że każdemu prawu zachowania obowiązującemu dla danego układu fizycznego odpowiada jakaś symetria tego układu.

Twierdzenie odwrotne nie jest prawdziwe, gdyż pewnym przekształceniom symetrii układu nie odpowiadają żadne prawa zachowania (symetria względem odwrócenia czasu). Prawa symetrii ściśle przeplatają się z prawami zachowania wielkości fizycznych. Prawo zachowania pędu odzwierciedla symetrię, jednorodność przestrzeni, a prawo zachowania momentu pędu izotropowość przestrzeni (niezależność jego właściwości od kierunku). Zasada zachowania energii odzwierciedla jednorodność czasu. Podobnie jest z innymi prawami, takimi jak np. zachowania ładunku, parzystości, każde z nich związane jest ze swoją symetrią.

Wykorzystując symetrię podczas rozwiązywania zadań fizycznych należy pamiętać, że:

1. Stosując pojęcie symetrii mówimy o:
 - a) symetrii kwadratu (obrót o 90^0 powoduje powrót do sytuacji początkowej).
 - b) symetrii względem osi.
 - c) symetrii względem płaszczyzny (zwierciadlanej).
 - d) symetrii środkowej.
2. W zadaniach symetria może występować:
 - a) w sposób jawny (przykład 1, 2),
 - b) w sposób ukryty (przykład 3, 4).

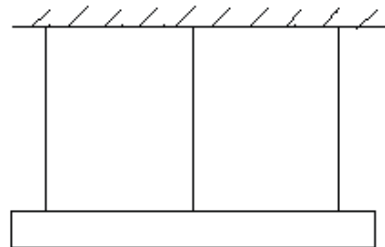
3. Jeśli w zadaniu symetria występuje w sposób jawny: a) należy ustalić z jakim rodzajem symetrii mamy do czynienia, b) wyciągnąć wnioski wynikające z rodzaju symetrii, treści zadania, rysunku oraz właściwości fizycznego układu, c) wykorzystać uzyskane wnioski do rozwiązania zadania.

4. Jeśli symetria nie występuje w sposób jawny:

- a) należy zmodyfikować sytuację początkową, aby uzyskać symetrię.
- b) modyfikując sytuację początkową nie należy zmieniać właściwości fizycznych układu,
- c) postępując jak w punkcie 3 b zazwyczaj udaje się nam w sposób prosty i szybki rozwiązać zadanie.

Jeśli w danej sytuacji (obwodzie elektrycznym, konstrukcji itp.) występuje symetria w przedstawianiu dowolnych elementów, to ta symetria powinna się pojawić w odpowiednich wzorach.

Przykład 1.



Rys. 1

Jednorodna sztabka o masie m wisi na trzech pionowych drutach o jednakowej długości początkowej l_0 i przekrojach początkowych rozmieszczonych symetrycznie (rys. 1). Określić siły rozciągające druty, jeśli środkowy drut jest stalowy, a dwa pozostałe są miedziane. Przyjmujemy, że moduł Younga stali jest dwa razy większy niż miedzi.

Rozwiązanie.

Z rysunku wynika, że układ wykazuje symetrię zwierciadlaną względem płaszczyzny prostopadłej do rysunku, przechodzącej przez drut stalowy, oraz że wydłużenie dru-

tów Δl będą jednakowe. Z prawa Hooke'a wynika, że siłę rozciągającą drut możemy wyrazić następująco:

$$\frac{F}{S} = \frac{E \Delta l}{l} \quad \text{stad} \quad F = E \frac{\Delta S}{l_0}$$

Uwzględniając, że długości drutu, ich przekroje i wydłużenia są jednakowe zapiszemy siłę rozciągającą drut stalowy

$$F_s = E_s \frac{\Delta S}{l_0} \quad (1)$$

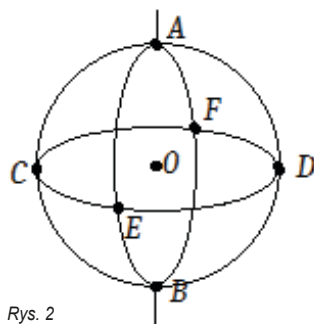
$$\text{dla drutu miedzianego } F_m = E_m \frac{\Delta S}{l_0} \quad (2)$$

oraz że $E_s = 2E_m$ (3)

warunek równowagi układu możemy zapisać następująco $2F_m + F_s - mg = 0$ (4)

Rozwiązując ten układ równań otrzymamy:

$$F_s = 0.5 mg \quad F_m = 0.25 mg$$



Rys. 2

Przykład 2.

Z trzech jednakowych okręgów z drutu wykonano karkas (rys.2). Ile wynosi jego opór między punktami A i B, jeśli opór czwartej części okręgu wynosi R.

Rozwiązanie.

Z symetrii wynika, że prądy wypływające z punktu A rozdzielą się na cztery jednakowe prądy $0,25 I$ i płynąc przez jednakowe opory R spowodują jednakowe spadki potencjałów. Potencjały punktów C, D, E, F będą jednakowe i dlatego przez opory łączące te punkty prąd nie popłynie. Jeśli odłączymy te opory, otrzymujemy układ czterech oporów $2R$ włączonych równolegle między punktami A i B.

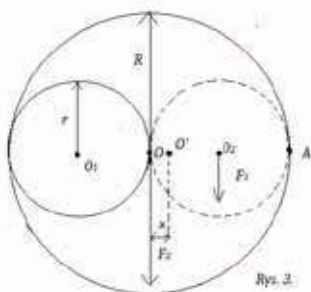
Opór zastępczy karkasu R_z między punktami A i B obliczymy z zależności:

$$R_z = \frac{R}{n} \quad \text{gdzie } R_1 = 2R \quad \text{a } n = 4$$

$$R_z = \frac{2R}{4} = \frac{1}{2} R$$

Przykład 3.

Określ położenie środka ciężkości krążka o promieniu R, którego wycięto krążek o promieniu $r = 0,5 R$ o środku O_1 , jak na rysunku 3.



Rys. 3.

Rozwiązanie.

Środek ciężkości krążka leży na odcinku O A. Aby wyznaczyć jego położenie zmieniamy niesymetryczny krążek na dwa symetryczne krążki. Jeden z krążków

o promieniu R z dwoma symetrycznymi otworami (drugi otwór o środku O_2 zaznaczamy linią przerywaną), a drugi krążek posiada promień $0,5 R$. Zastąpiliśmy początkowy niesymetryczny krążek dwoma symetrycznymi krążkami. Jeśli krążek o promieniu $0,5 R$ włożymy do otworu zaznaczonego linią przerywaną otrzymujemy układ symetryczny z początkowym.

Oznaczmy siłę ciężkości krążka o promieniu $0,5 R$ przez F_1 a krążka o promieniu R przez F_2 . Punkty przyłożenia sił wynikają z symetrii krążków. Jeśli przez x oznaczmy odległość środka ciężkości krążka wyjściowego od punktu O, wówczas warunek równowagi krążka dla sił działających na niego zapiszemy wzorem

$$F_2 x - F_1 (0,5 R - x) = 0$$

Ciężar krążka jest wprost proporcjonalny do jego powierzchni, co zapiszemy wzorem

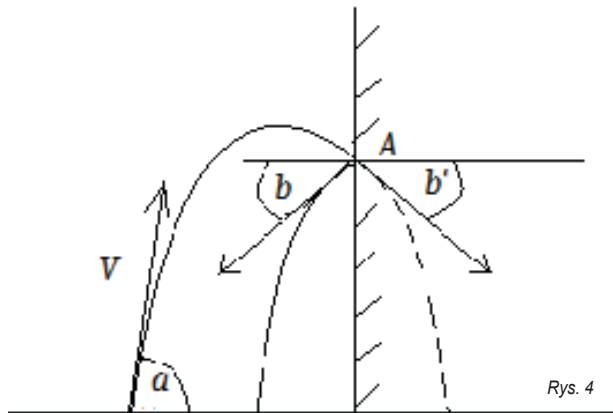
$$(\pi R^2 - 2\pi 0,25 R^2) x - 0,25 \pi R^2 (0,5 R - x) = 0$$

Rozwiązując równanie otrzymujemy

$$x = \frac{R}{6}$$

Przykład 4.

Pilkę rzucono z powierzchni ziemi z prędkością początkową v_0 , pod kątem α . W odległości l od punktu wyrzucenia piłki O znajduje się pionowa ściana. Piłka odbija się od ściany sprężysto (rys.4). W jakiej odległości x od ściany piłka uderzy o ziemię?



Rys. 4

Rozwiązanie.

Gdyby nie było ściany tor piłki byłby taki, jak przedłużenie toru zaznaczone na rys. 4 linią przerywaną. Przy zderzeniu sprężystym piłki ze ścianą nie zmienia się wartość prędkości v_0 oraz kąt padania b jest równy kątowi odbicia b' . Przedłużenie toru A B linią przerywaną i część toru po odbiciu od ściany A C wykazują symetrię zwierciadlaną względem płaszczyzny ścianki. Stad otrzymujemy

$$X = O B - l \quad (1)$$

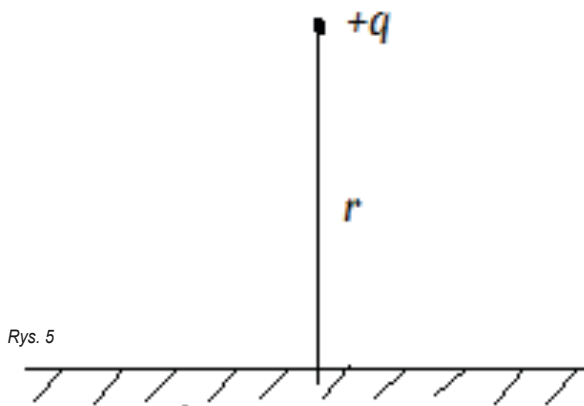
gdzie O B jest zasięgiem rzutu ukośnego o zależności

$$O B = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\alpha$$

Podstawiając za O B do (2) otrzymujemy

$$x = \frac{v_0^2}{g} \sin 2\alpha - l$$

Zadania



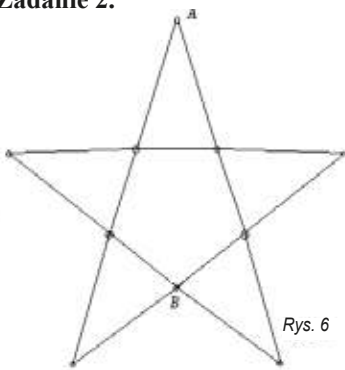
Rys. 5

Zadanie 1.

Ładunek punktowy $+q$ znajduje się nad przechodzącą płaszczyzną. Z jaką siłą przyciąga tę płaszczyznę?

$$\text{Odp. } F = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q^2}{4r^2}$$

Zadanie 2.

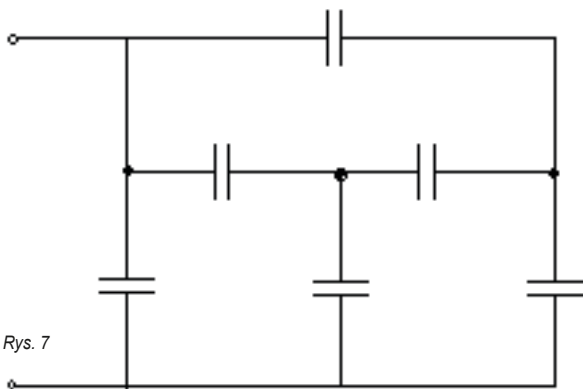


Rys. 6

Pięć jednakowych prętów o długości l , przekroju S i oporze właściwym ρ , połączono w gwiazdę (rys. 6). Punkty połączenia prętów dzielą je na 3 równe części. Oblicz opór tej figury między punktami AB.

$$\text{Odp. } R_{AB} = \frac{7}{18} \rho \frac{l}{S}$$

Zadanie 3.

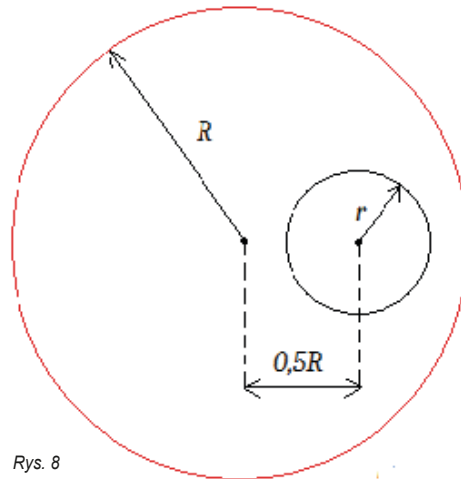


Rys. 7

Obliczyć pojemność zastępczą układu kondensatorów o jednakowej pojemności C (rys. 7).

$$\text{Odp. } C_z = 2C$$

Zadanie 4.

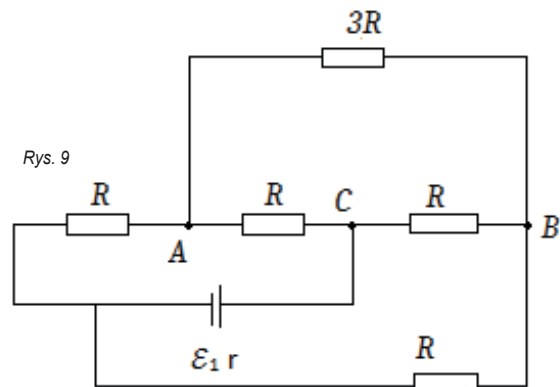


Rys. 8

Wyznaczyć położenie środka ciężkości krążka o promieniu R , z którego wycięto otwór o promieniu $r < 0,5 R$. Środek wycięcia znajduje się w odległości $0,5 R$ od środka krążka (rys. 8).

$$\text{Odp. } x = \frac{r^2 R}{2(R^2 - r^2)}$$

Zadanie 5.



Rys. 9

Jaki prąd I płynie przez opór $3R$ (rys. 9), jeśli wszystkie wielkości występujące na rysunku są znane?

$$\text{Odp. } I = 0$$

Zadanie 6.

Cztery biegacze znajdują się w wierzchołkach kwadratu o boku a . Jednocześnie zaczynają biec ze stałą co do wartości prędkością v , przy czym pierwszy biegacz kieruje się przez cały czas biegu na drugiego, drugi na trzeciego, trzeci na czwartego a czwarty na pierwszego. Czy biegacze spotkają się, jeśli tak, to po jakim czasie?

$$\text{Odp. } t = \frac{a}{v}$$

Kosmiczne pomiary z ekranu komputera

Roman **Bochanysz**

Rozmiary ciał niebieskich a także wielkość samego Wszechświata i odległości w nim zawsze były kluczowymi problemami w astronomii obserwacyjnej. Wraz z rozwojem techniki optycznej i metod obserwacji dowiadywaaliśmy się w tym zakresie coraz więcej. Dzisiaj technologia ta jest dostępna nie tylko specjalistom, ale na dość już zaawansowanym poziomie amatorom astronomicznych obserwacji. Wykonując proste zdjęcia nieba czy obiektów kosmicznych mogą oni samodzielnie zmierzyć różne wielkości i wyciągnąć z pomiarów ciekawe wnioski.

Celem naszym jest pokazanie, co ciekawego kryje się w zdjęciach Słońca, które na dodatek możemy samodzielnie wykonać.

Wielkość plam słonecznych

Najprostszy pomiar, który można wykonać wprost z ekranu komputera to określenie (przybliżonej oczywiście) wielkości plam słonecznych. Edytując zdjęcie Słońca możliwie dobrej jakości jesteśmy w stanie określić za pomocą programów do przeglądania i edycji zdjęć (jak np. IrfanView) rozmiary Słońca i plam na ekranie w milimetrach czy pikselach.

Obecnie plamy trudno sfotografować ze względu na niską aktywność Słońca, ale zawsze można sobie wyświetlić jakieś zdjęcie z czasów, kiedy było lepiej.

Aby dowiedzieć się jakie są rozmiary danej plamy czy grupy plam wystarczy wykorzystać proporcję wielkości odczytanych z ekranu. Przykład – z pokazanego zdjęcia można odczytać, że kiedy rozmiar średnicy Słońca na ekranie wynosi np. 556 pikseli, to szerokość grupy plam 54 piksele. Stosunek obu szerokości wynosi więc

$$54/556 \approx 0,0971$$

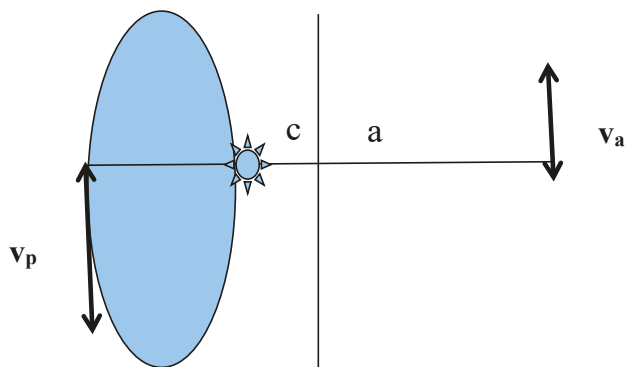
Mnożąc to przez przybliżoną średnicę Słońca odczytaną z tablic astronomicznych otrzymamy szerokość grupy plam wyrażoną w kilometrach

$$0,0971 \times 1392682 \text{ km} \approx 135\,260 \text{ km}$$

Warto sobie przy tym uświadomić, że jest to około 10 razy więcej niż średnica Ziemi!

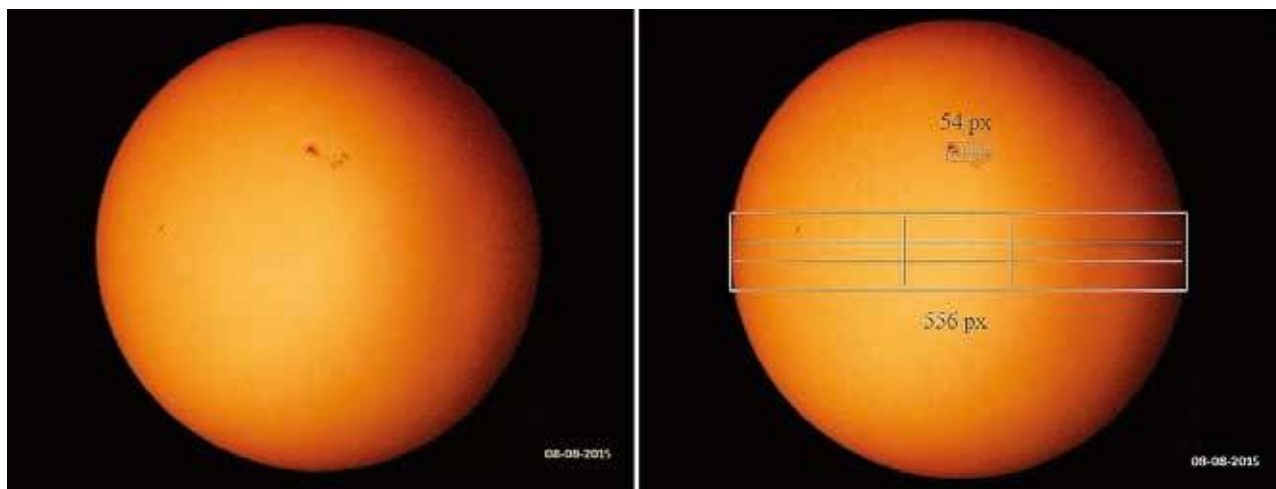
Parametry orbity ziemskiej

W układzie heliocentrycznym orbity planet są w dobrym przybliżeniu eliptyczne (I prawo Keplera) a to oznacza, że w ciągu roku odległość Ziemi od Słońca a także jej prędkość orbitalna zmienia się. Zmienia się więc wielkość obserwowana tarczy słonecznej, którą możemy właśnie uchwycić za pomocą zdjęć.



Ponieważ Słońce znajduje się w ognisku elipsy to odległość Ziemi w lipcu (aphelium) wynosi „ $a + c$ ”, a w styczniu (perihelium) wynosi „ $a - c$ ”, gdzie a jest półosią wielką, zaś c odległością ogniska od środka elipsy. Charakterystyczny dla każdej elipsy jest jej mimośród, czyli stosunek $e = c/a$

Każdy w zasadzie może sprostać długoterminowemu zadaniu polegającemu na wykonaniu serii zdjęć Słońca w półrocznym okresie od około 4 stycznia do 4 lipca (lub odwrotnie) każdego roku. Do zdjęć wystarczy aparat fotograficzny z nałożoną na obiektyw folią mylarową lub zasłoną zrobioną z prześwietlonej kliszy fotograficznej. Droższe aparaty mają już specjalne filtry. Chodzi o to, by nie uszkodzić matrycy aparatu. Zdjęcia trzeba wykonać ze statywu, maksymalnie ostro, przy tych samych

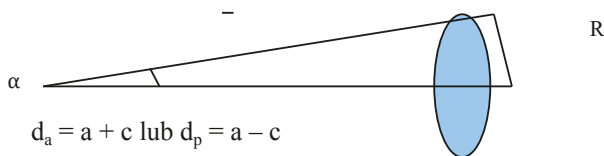


(fotografia własna)

nastawieniach aparatu. Ponieważ będzie nas interesować średnica w pikselach nie można zmieniać ustawień aparatu w czasie kolejnych zdjęć.

Wykonując pierwsze zdjęcie z początkiem stycznia, kiedy Ziemia jest w perihelium i kolejne – powiedzmy co miesiąc – zauważymy zmniejszanie się obserwowanej średnicy Słońca wywołane oddalaniem się Ziemi. Kluczowe będzie zdjęcie z początku lipca, kiedy Ziemia jest w aphelium a widoczna średnica najmniejsza. Na podstawie tej różnicy wyznaczymy mimośród orbity!

Kąt pod jakim widać promień Słońca (R) z Ziemi wyliczyć można z zależności $\sin \alpha = R/d$, gdzie d oznacza odległość od Słońca. W krańcowych położeniach Ziemi na orbicie, aphelium – „ $a+c$ ” i perihelium – „ $a-c$ ” kąt ten jest oczywiście inny.



Ponieważ rzeczywista średnica tarczy nie zmienia się, możemy napisać

$$R = (a+c)\sin\alpha_a \text{ oraz } R = (a-c)\sin\alpha_p$$

a więc

$$(a+c)\sin\alpha_a = (a-c)\sin\alpha_p$$

co daje nam

$$\frac{a-c}{a+c} = \frac{\sin\alpha_a}{\sin\alpha_p}$$

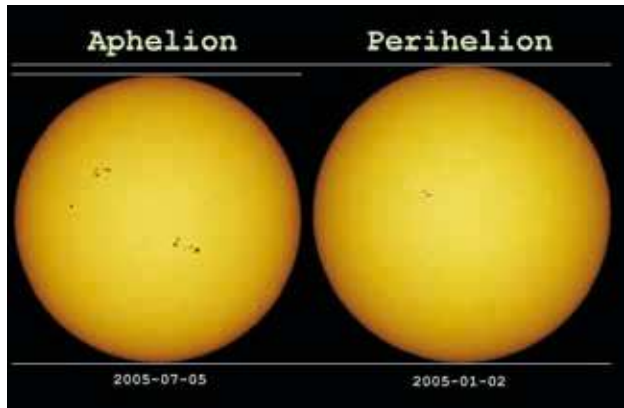
Ponieważ kąt jest mały, więc jego sinus jest w przybliżeniu równy wartości tego kąta wyrażonego w radianach. Tym samym stosunek tych kątów można wyrazić stosunkiem pikseli odczytanych ze zdjęć średnic Słońca. Ten stosunek wyznaczony obserwacyjnie niech wynosi „ s ”.

$$s = \frac{a-c}{a+c} = \frac{a(1-c/a)}{a(1+c/a)} = \frac{1-e}{1+e}$$

Po przekształceniach otrzymujemy

$$e = \frac{1-s}{1+s}$$

Z wielu zdjęć, które wykonałem 5 stycznia i 2 lipca w 2017 roku można było odczytać rozmiary średnic Słońca w pikselach (166 w styczniu i 161 w lipcu) i obliczyć $s = 161/166$. Przyjęto średnie odczyty z wielu ujęć i różnymi metodami. Nie różniły się one jednak o więcej niż jeden piksel dla dwóch różnych zdjęć.



Zródło: NASA

Po podstawieniu otrzymałem wynik $e \approx 0.0152...$ który dość dobrze zgadza się z wielkością $e = 0.0167$ zmierzoną przez specjalistów dokładniejszymi metodami. Gdyby ktoś nie miał jednak możliwości wykonania takich zdjęć, może posłużyć się podobnymi wykonanymi przez profesjonalistów, np. z NASA. Można znaleźć w Internecie.

Inne parametry orbity

1. Różnica odległości

Samo wykonanie pomiarów mimośrodu może skłaniać do pytania, jaki z tego pożytek? Co nam to daje? Wiemy tyle, że Słońce znajduje się w odległości $c = e \cdot a$ od środka elipsy. No właśnie to też możemy sobie teraz obliczyć wynajdując „ a ” w tablicach astronomicznych. Ponieważ podają $a = 1,49598261 \times 10^{11}$ m, po podstawieniu otrzymamy

$$c = 0,0152 \cdot 1,49598261 \times 10^{11} \text{ m} \approx 2273893567 \text{ m} \approx 2\,274\,000 \text{ km}$$

W takiej odległości od centrum elipsy znajduje się Słońce! Możemy się też dowiedzieć jaka jest różnica odległości Ziemi od Słońca w tych dwóch skrajnych położeniach, czyli wtedy, gdy wykonywano zdjęcia

$$\Delta d = (a+c) - (a-c) = 2c = 2 \cdot 2274000 \text{ km} = 4\,548\,000 \text{ km}$$

2. Stosunek prędkości orbitalnych

Stosując zasadę zachowania momentu pędu w ruchu orbitalnym Ziemi możemy stwierdzić, że w momentach przejścia przez perihelium i aphelium obowiązuje równanie w dość prostej

$$mV_p(a-c) = mV_a(a+c) \quad (m - \text{masa Ziemi})$$

co po przekształceniach daje

$$\frac{V_p}{V_a} = \frac{a-c}{a+c} = \frac{a(1-c/a)}{a(1+c/a)} = \frac{1-e}{1+e}$$

po podstawieniu otrzymanego w pomiarach wartości mimośrodu $e = 0.0152$ otrzymamy $V_p/V_a \approx 1,03$ co oznacza, że prędkość Ziemi w perihelium jest ok. 3% większa niż w aphelium. Ten ostatni wynik jest szczególnie ciekawy, gdyż pokazuje, że z pomiarów pewnej wielkości, powiedzmy statycznej, niedaleka droga do ustalenia niektórych wielkości kinematycznych. Wzór ten można zastosować do pozostałych planet, jeżeli znamy mimośrody ich orbit.

Roman Bochanyz

Głogów, woj. dolnośląskie

Pokazowe eksperymenty fizyczne

Działające na intelekt, wyobraźnię i emocje

Andrzej **Kuczowski**, Jarosław **Nowakowski**,
Andrzej **Kozłowski** i Leszek **Wicikowski**

Przedstawiamy pokazowe eksperymenty fizyczne, które nie tylko będą ilustrowały omawiane zagadnienia teoretycznie, lecz także w zamyśle autorów będą oddziaływały na wyobraźnię i emocje słuchaczy. Takie fizyczne eksperymenty pokazowe, głęboko zapadają w pamięć słuchaczy i często wspominają je oni jeszcze po wielu latach. Jak napisał T. Dryński w „Doświadczeniach pokazowych z fizyki” wykładowca fizyki przypomina czasem prestidigitatora, z tą różnicą jednakże, że celem jego jest nie oszukanie, a jedynie zaciekawienie słuchacza.

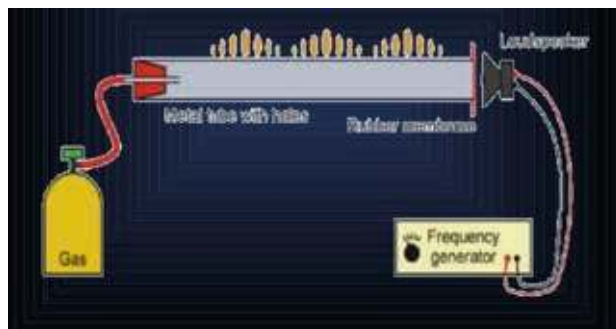
Genesis

Przykładem eksperymentu oddziałującego na intelekt, wyobraźnię i emocje może być eksperyment zatytułowany przez autorów Genesis. W eksperymencie tym wykorzystany jest przyrząd zwany rurą Rubensa. W rurze Rubensa przez wywiercone małe otworki wypływa gaz doprowadzany z butli lub z sieci Rys.1. Na końcu rury znajduje się membrana, która drga pobudzana przez zbliżony do niej głośnik. Zmieniając częstotliwość dźwięków, możemy stwierdzić, że przy niektórych częstotliwościach rura wchodzi w rezonans i powstają w niej fale stojące. Gdy wypływający z rury przez otworki gaz zapalimy, to wysokość płomyków będzie ilustrować rozkład ciśnienia w rurze.

W eksperymencie Genesis płomyki gazu drgają w rytm muzyki generowanej przy pomocy gongów rurowych, gongów symfonicznych i mis krystalicznych. [www.marektozack.pl]. Rezonans gongów i mis himalajskich pogłębia przeżycia duchowe, wycisza umysł i wprawia go w stan kosmicznej ciszy. Dodatkowo na ekran rzutowane są obrazy odległych galaktyk i mgławic, które wzmacniają ekspresję tego pokazu i sprawiają, że czujemy się świadkami powstawania Wszechświata. Eksperyment ten ma cechy eksperymentu totalnego. Widzimy obrazy odległych galaktyk, słyszymy niezwykłą muzykę oraz obserwujemy drgania w rytm muzyki płomyczków gazu.

Małpka i strzelba

Innym eksperymentem, który ma znamiona eksperymentu totalnego, jest znany eksperyment, w którym myśliwy strzela do małpki, która równocześnie z wystrzałem zsuwa się z drzewa. Eksperyment ten ilustruje również determinizm praw fizyki. Nieubłagane prawa fizyki sprawiają, że małpka nie uniknie już swego przeznaczenia. Gdy w chwili trafienia małpki przez pocisk rozlegnie się rozdzierający krzyk małpki to słuchacze długo pozostaną pod wrażeniem tego eksperymentu, jak to przedstawiono w filmie: MIT, Physics Demo—Monkey and Gun



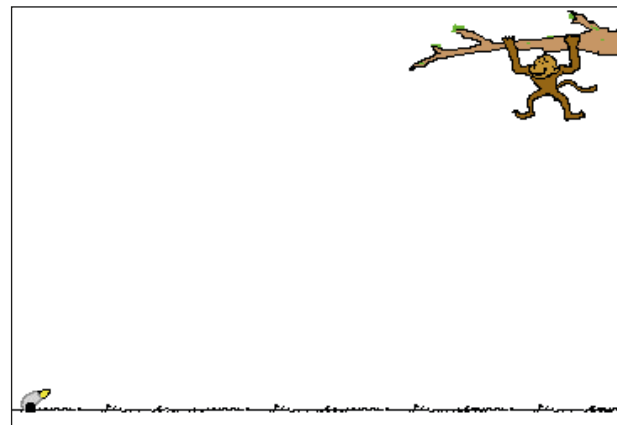
Rys.1 Rura Rubensa. Wydobywające się z rury płomyczki gazu modulowane są przy pomocy zmiany ciśnienia gazu wewnątrz rury przez drgania membrany, która pobudzana jest przez głośnik.

Źródło: <http://physicsbuzz.physicscentral.com/2015/01/the-flaming-oscilloscope-physics-of.html>



Foto. 1. Przykładowe zdjęcie jednej z mgławic prezentowanych podczas pokazu Genesis.

Źródło: https://www.google.pl/search?q=zdj%C4%99cia+mg%C5%82awic&tbm=isch&source=hp&sa=X&ved=2ahUKEwi4_vjd75jjAhX5isMKHUwzBQ4Q7A16BAgIE-A8&biw=1024&bih=62

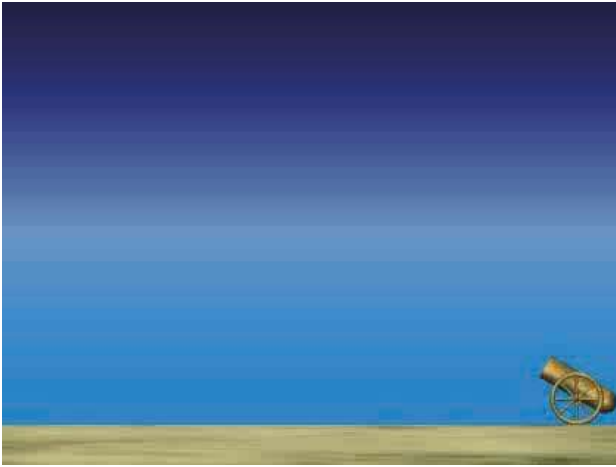


Rys. 2. Małpka w chwili wystrzału zaczyna zsuwać się z drzewa

Źródło: <https://www.physicsclassroom.com/mmedia/vectors/mzg.cfm>

Zasięg w rzucie ukośnym

Animacja pokazująca zależność zasięgu pocisku wystrzelianego z armaty od kąta nachylenia lufy będzie miała dużą siłę przekazu, gdy wystrzałom towarzyszył będzie huk wystrzału.



Rys. 3. Zależność zasięgu od kąta wyrzutu
Źródło: „Physics Animations4.2” <http://physics.nad.ru>

Duszek

Muzyka, jak również efekty dźwiękowe mogą być bardzo pomocne w rozbudzaniu zainteresowania słuchaczy. Podobno Szekspir, gdy nie udawało mu się wyrazić słowami pewnych tematów posługiwał się muzyką. Ujmując to powiedzenie, „gdy słów nie starcza przemawia muzyka”.

Tak np. zastosowanie podczas eksperymentu ilustrującego istotę siły wyporu przy pomocy duszka, który zanurza się i wypływa w zależności od ciśnienia wywieranego na plastikową butelkę, w której pływa, fragmentu niezwyklego utworu J.S. Bacha zatytułowanego „Tokata”, nie-



Foto. 2. „Duszek” zanurzający się i wypływający w zależności od ciśnienia wywieranego na butelkę. Ekspresje pokazu zwiększa zastosowana przez autorów muzyka. Fragment Tokaty Jana Sebastiana Bacha.
<https://www.youtube.com/watch?v=Y5JwNPtAqOM>

wątpliwie ubogaca i zwiększa efektywność przekazu tego pokazu.



Rys. 4. Eksperyment ilustrujący prawo zachowania pędu. a) wózek przed wyrzutem, b) wózek po wyrzucie.
Źródło: Źródło: J. Liwo, B. Porala, Materiały pomocnicze z fizyki. Materiały wewnętrzne WFTiMS PG

Prawo zachowania pędu

Eksperyment ilustrujący prawo zachowania pędu przy pomocy wózeczka, z którego przy pomocy napiętej sprężyny wyrzucany jest pręt w jedną stronę, a wózek zaczyna poruszać się w przeciwną stronę można uatrakcyjnić, gdy wyrzuceniu pocisku będzie towarzyszył huk wyrzutu realizowany przy pomocy kapiszonu, jak to prezentuje się Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej.

Eksperyment ten może pobudzić nawet znudzonych słuchaczy, gdy wyrzutowi pocisku będzie towarzyszył huk kapiszonu. W tym celu zamiast nici N, korzystne, jest użycie kapiszonu.

Kondensator wysokonapięciowy

Bardzo atrakcyjny jest również eksperyment, w którym kondensator wysokonapięciowy naładowany do napięcia

kilku tysięcy volt, przez zwarcie, gwałtownie rozładowuje się. Powstały grzmot i iskra elektryczna przypominająca uderzenie pioruna podrywa słuchaczy na równe nogi. Potem wskazane jest pokazanie, że gdy dotknie się tylko do jednej z okładek naładowanego kondensatora, to nie następuje jego rozładowanie, gdyż ładunek jest na tej okładce utrzymywany przez ładunek przeciwnego znaku na przeciwnej okładce. Dopiero zwarcie obu okładek powoduje rozładowanie kondensatora.

Transformator Tesli

Prezentacja transformatora Tesli i niezwykłych efektów z nim związanych jest przykładem jednego z niezapomnianych eksperymentów pokazowych. Wokół uzwojenia wtórnego transformatora powstaje wysokie napięcie o częstotliwości rzędu setek tysięcy herców, które pobudza do świecenia świetlówkę już z odległości kilku me-



Foto. 3. Transformator Tesli zbudowany na Wydziale Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej przez inż. Jarosława Nowakowskiego. Wyładowanie koronowe emitowane z ostrza uzwojenia wtórnego transformatora.

trów. Bardzo ciekawe jest również wyładowanie koronowe wychodzące z ostrza umieszczonego na końcu uzwojenia wtórnego w postaci rozgałęziających się włókienek Foto.3

Umieszczenie młynka Franklina na końcu uzwojenia wtórnego transformatora powoduje jego obrót przez wiatr elektryczny generowany w wyniku wyładowanie koronowe z ostrzy wiatraczka. Wyładowanie to jest dobrze

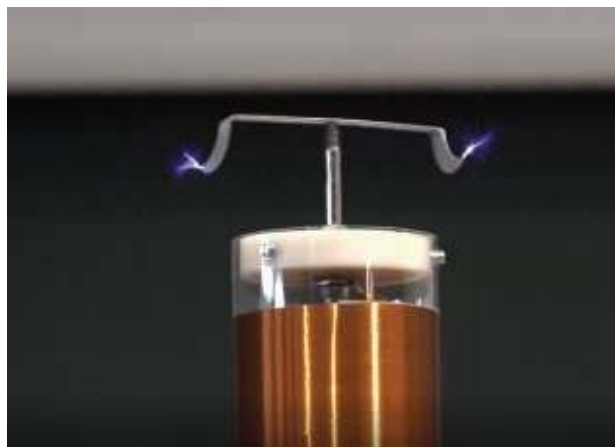


Foto. 4. Wiatr elektryczny generowany przez wyładowanie koronowe z ostrzy wiatraczka Franklina powoduje jego obrót

widoczne i jest dowodem na to, że ruch wiatraczka jest efektem siły odrzutu.

Zakończenie

Zwiększenie zainteresowania słuchaczy prezentowanym materiałem można osiągnąć przez zastosowanie ciekawych eksperymentów pokazowych, nietypową ich prezentacją, a przede wszystkim przez emocjonalny przekaz wykładowcy. Niezwykle ważny jest również przekaz do słuchaczy by zawsze wierzyli w swoje możliwości i możliwość zrobienia jeszcze czegoś pożytecznego.

**Andrzej Kuczowski, Jarosław Nowakowski,
Andrzej Kozłowski i Leszek Wicikowski**
Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej
Politechnika Gdańska

Co w fizyce piszczy

Witamy kosmicznych gości

30 sierpnia 2019 roku astronom amator Gennady Borisov zaobserwował obiekt przypominający kometa. Dokładne obserwacje tego obiektu pozwoliły wykazać, że faktycznie jest to kometa jednak niezwykle przynajmniej, jeśli chodzi o pochodzenie. Pochodzi ona bowiem spoza naszego Układu Słonecznego. Do tej pory znamy tylko dwa takie obiekty. Drugim jest odkryta w 2017 roku Oumuamua. Niezwykle pochodzenie komety spowodowało duże zainteresowanie nią profesjonalnych astronomów. Skierowali oni na nią teleskop Hubble'a i 12 października uzyskali najlepsze, jak do tej, pory zdjęcie obiektu. Wygląda ona dość zwyczajnie. Ma jądro, ogon i gazową powłokę otaczającą ten obiekt. Niezwykle jest jednak jej pochodzenie.

Naukowcy podnoszą bowiem ważne pytanie. Dlaczego dopiero teraz udało się zaobserwować poza słoneczne obiekty?

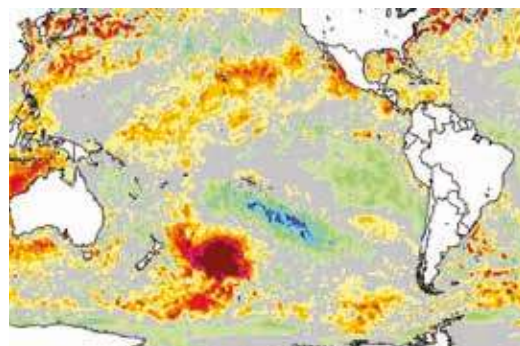
Źródło: NASA/Goddard Space Flight Center. "Hubble observes first confirmed interstellar comet." ScienceDaily. ScienceDaily, 16 October 2019. <www.sciencedaily.com/releases/2019/10/191016131236.htm>

Gorąca plama u wybrzeży Australii

Globalne ocieplenie dotyczy nie tylko atmosfery. W ślad za atmosferą ogrzewają się też oceany. Jest to proces o tyle groźny, że podniesienie temperatury oceanów powoduje zmiany w składzie wód morskich, a przede wszystkim w zawartości tlenu w wodzie. Czyli podniesienie temperatury oceanu może prowadzić do jego jałowienia. Ostatnio w okolicach Australii na obszarze trzykrotnie większym od Nowej Zelandii zaob-

serwowano podniesienie się temperatury wody z 15 do 20 °C. Obecnie trwają próby wyjaśnienia tego dość złowieszczonego zjawiska, zwłaszcza jeśli zestawimy go z wielkimi pożarami lasów w Australii.

Źródło: https://www.theguardian.com/world/2019/dec/27/hot-blob-vast-and-unusual-patch-of-warm-water-off-new-zealand-coast-puzzles-scientists?CMP=twl_gu&utm_medium=&utm_source=Twitter#Echobox=1577410936



Meteoryty, dziwne kamienie

Meteory, zjawiska świetlne obserwowane na nocnym nieboskłonie, znane były człowiekowi od zarania dziejów – czytamy w przedmowie do książki. W odróżnieniu od znanych astronomom już z antycznych czasów stałych bądź ruchomych ciał niebieskich stanowiły nie lada wyzwanie. Powszechnie uważano je za jedne z niezliczonego mrowia gwiazd, które z nieznanymi przyczyn oderwały się od sklepienia niebieskiego i spadły.

Pierwszym naukowcem, który poprawnie ocenił to niecodzienne zjawisko, był niemiecki fizyk z końca XVIII wieku Ernst Chladni. W książce wydanej w 1794 roku napisał, że ogniście, szybko poruszające się i wkrótce gasnące obiekty świetliste, które można obserwować na niebie, są niczym innym jak spadającymi fragmentami naturalnych ciał kosmicznych pochodzących z „rozbitych planet”. Ich świecenie na nocnym firmamencie objaśniał tym, że lecąc przez atmosferę, skutkiem tarcia, nagrzewają się, topią, a przez to świecą.

Jego poglądy zawarte w dziele o bardzo długim tytule *Obserwacja kawałka żelaza, które znalazł na Syberii profesor Pallas, i obserwacja innych podobnych mas wraz z niektórymi przypuszczeniami dotyczącymi związku tych mas z pewnymi zjawiskami przyrody* nieprędko zyskały powszechne uznanie. Wręcz przeciwnie, autor uznany został przez religijne gremia za heretyka, a część naukowców tamtych czasów, w tym Alexander Humboldt, nie akceptowała jego poglądów.

Meteoryty, owe dziwne kamienie czy bryły żelazne spadłe z nieba, były i do dziś w wielu kulturach są traktowane jako obiekty sakralne, czasem magiczne. Znajdowały poczesne miejsce w świątyniach, a zdarzało się, że ich rozrzucone fragmenty spożywane były jako cudowne panaceum na przeróżne choroby.

Obecnie meteoryty stanowią cenny materiał naukowy do badań nad ciałami kosmicznymi, a ich własności są ważną informacją składającą się na obraz wiedzy o naszym systemie planetarnym i jego genezie. Materiał

ten darmo spada nam z przestworzy, więc jedynie, co nam pozostaje, to skrzętnie go kolekcjonować i prowadzić badania.

Jednym z najbardziej znanych spadków meteorytu w średniowiecznej Europie był meteoryt *Ensisheim*, nazwany od miasteczka w Alzacji, koło którego spadł 7 listopada 1492 roku. Meteoryt okazał się bryłą kamienną o masie 127 kg. Umieszczono go w miejscowym kościele, w którym pozostawał aż do rewolucji francuskiej. Do dziś znajduje się w Ensisheim, choć kilka kawałków zostało odłupanych od głównej masy i przekazanych, jak podają źródła, przejeżdżającemu przez miasto cesarzowi niemieckiemu Maksymilianowi I.

30 czerwca 1908 roku, kiedy słońce świeciło już wysoko ponad horyzontem nad południową częścią centralnej Syberii pojawił się jasny bolid w postaci kuli ognistej. Przemieszczał się w kierunku z południowego wschodu na północny zachód, by wybuchnąć z olbrzymią siłą niedaleko faktorii Wanawara położonej nad brzegami rzeki Podkamienna Tunguska.

Przełot zakończył się wyjątkowo głośną eksplozją. Na podstawie porównania powstałej i mierzonej fali sejsmicznej wywołanej napowietrznym wybuchem z podobnymi pomiarami prowadzonymi w eksperymentach eksplozji atomowych ustalono prawdopodobną moc wybuchu *meteorytu tunguskiego*. Okazała się ogromna, sięgająca 1023–1024 ergów, czyli od kilkunastu do dwudziestu milionów ton TNT (trójnitoluenu, trotylu), najsilniejszego ze znanych w tym czasie materiałów wybuchowych. Była to energia tysiącrotnie większa od bomby, która doszczętnie zniszczyła Hiroszimę i porównywalna z eksplozjami bomb wodorowych. 15 lutego 2013 roku około godziny 9.20 czasu lokalnego nad południowym Uralem w rejonie Czelabińska zaobserwowano przełot niezwykle jasnego bolidu. Było to jak dotąd najlepiej udokumentowane zjawisko przełotu bolidu i spadku meteorytów w całej historii meteorytyki. Udało się ustalić, że meteoroid wchodzący w górne



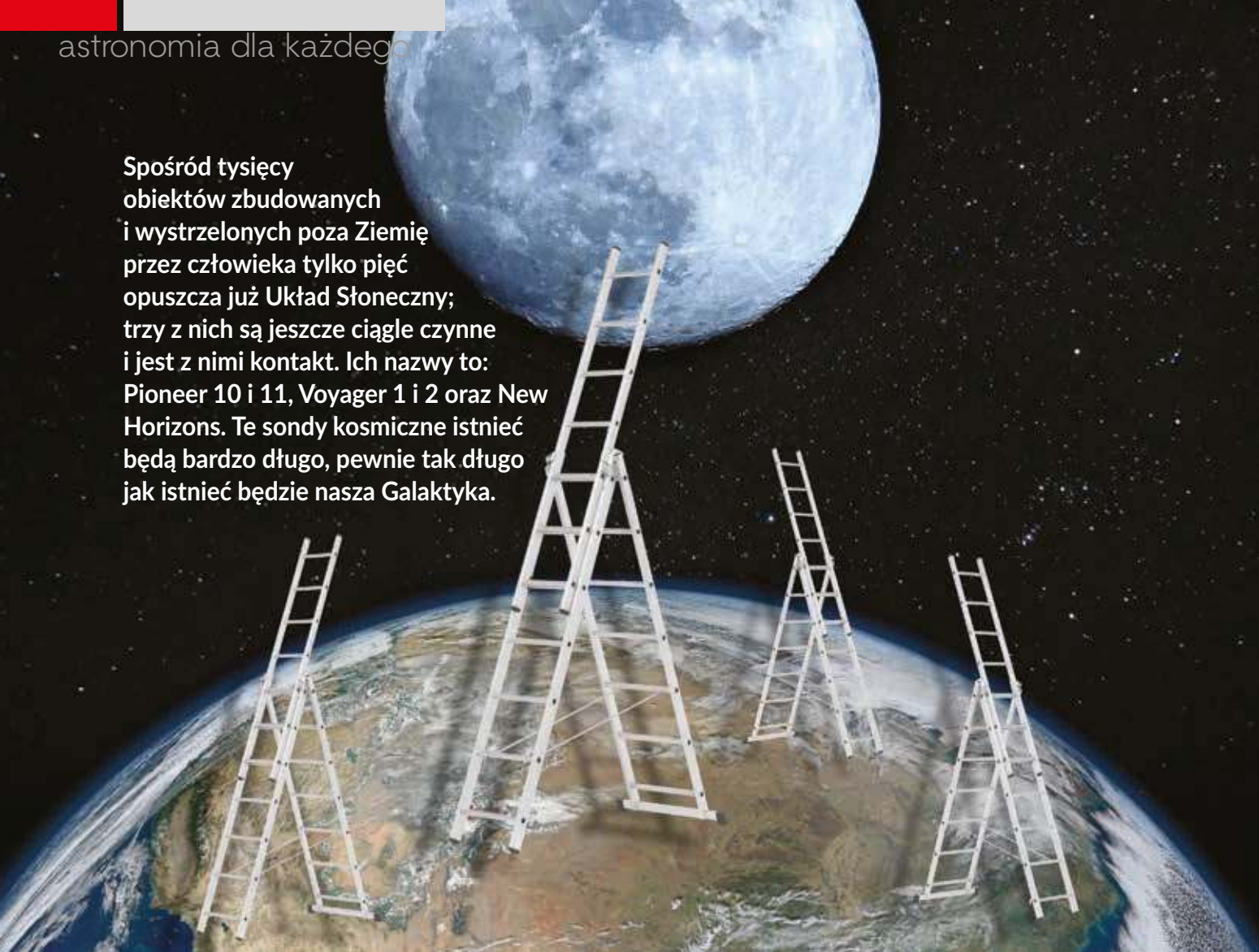
Meteory i meteoryty, autor Marek Żbik, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2020

warstwy atmosfery był bryłą o średnicy około 17–20 m i masie wynoszącej do 10 000 ton. W czasie przełotu przez atmosferę Ziemi bolid rozpadł się wybuchowo po 32,5 sekundach lotu na wysokości 29,7 km nad powierzchnią Ziemi, z mocą, jak podały źródła, 400–500 kiloton TNT, czyli około dwudziestu kilku bomb atomowych, jakie spadły na Hiroszimę. Powstała w wyniku przełotu i eksplozji silna balistyczna fala uderzeniowa spowodowała znaczne straty (uszkodzonych zostało ponad 7500 budynków), a także obrażenia u ponad 1500 osób. Meteor czelabiński był największym znanym obiektem kosmicznym, jaki zderzył się z Ziemią od czasu katastrofy tunguskiej w 1908 rok

Książka jest przeznaczona dla szerokiego kręgu zainteresowanych kosmosem i jego współdziałaniem z naturalnym środowiskiem naszej planety. Wiadomości podane zostały prosto i możliwie ciekawie, adresowane są do czytelnika nawet słabo zorientowanego w astronomii.

Niektóre trudniejsze fragmenty dotyczące badania materii meteorytów i ich klasyfikacji mogą być pomocne uczniom szkół średnich i studentom studiów wyższych o profilu przyrodniczym oraz filozoficznym, jak również pracownikom naukowym, wprowadzając ich w zawiloci badań związanych z klasyfikacją meteorytów.

Spośród tysięcy obiektów zbudowanych i wystrzelonych poza Ziemię przez człowieka tylko pięć opuszcza już Układ Słoneczny; trzy z nich są jeszcze ciągle czynne i jest z nimi kontakt. Ich nazwy to: Pioneer 10 i 11, Voyager 1 i 2 oraz New Horizons. Te sondy kosmiczne istnieć będą bardzo długo, pewnie tak długo jak istnieć będzie nasza Galaktyka.



Świadkowie naszego istnienia

Krzysztof Ziolkowski

Prawdopodobieństwo jakiegoś ich zniszczenia jest znikome. Można więc sobie wyobrazić, że za miliony czy nawet miliardy lat, kiedy nas już nie będzie, nie będzie Ziemi, nie będzie Słońca, one pozostaną we Wszechświecie jedynymi materialnymi świadkami naszego istnienia. Warto utrwalić w pamięci najważniejsze ich dokonania.

Pioneer 10 i 11

Sondą kosmiczną, która rozpoczęła sondowania wielkich planet Układu Słonecznego był amerykański obiekt Pioneer 10. Wystrzelony został 3 marca 1972 roku za pomocą rakiety Atlas-Centaur z Przylądka Canaveral na Florydzie. Prędkość, jaką Pioneer 10 uzyskał przy starcie, sięgająca prawie 14.4 km/s, była przez wiele lat największą szybkością z jaką dzieło rąk ludzkich opuściło Ziemię; rekord ten został pobity dopiero w 2006 roku przy starcie sondy New Horizons, która opuściła Ziemię z prędkością 16.3 km/s. Pioneer 10 był pierwszym statkiem kosmicznym, który przeleciał przez pas planetoid, pierwszą son-

dą Jowisza i wreszcie pierwszym obiektem zbudowanym przez człowieka, który znalazł się poza naszym układem planetarnym.

W połowie lipca 1972 roku Pioneer 10 rozpoczął kilkumiesięczny przelot przez pas planetoid. Dotychczas nie wiadomo, jak wielkim zagrożeniem dla sond kosmicznych może być rozciągające się między orbitami Marsa i Jowisza zgęszczenie materii międzyplanetarnej towarzyszące obserwowanemu pierścieniowi małych planet. Szczęśliwie Pioneer 10 minął bez żadnych uszkodzeń obszar ruchu planetoid i 3 grudnia 1973 roku przeleciał koło Jowisza w minimalnej odległości około 130 tys. km od jego warstw powierzchniowych.

W rok po Pioneerze 10 zbliżyła się do Jowisza bliźniacza sonda Pioneer 11; jej start odbył się 6 kwietnia 1973 roku. Po już mniej emocjonującym niż poprzedniczki i równie bezpiecznym przebyciu pasa planetoid Pioneer 11 przeleciał 2 grudnia 1974 roku nad południową półkulą Jowisza w odległości 43 tys. km od jego powierzchni. Te pierwsze spojrzenia z bliska na Jowisza doprowadziły do znacznego polepszenia znajomości struktury jego warstw powierzchniowych i atmosfery, odkrycia pola magnetycz-

nego i zbadania szczegółów magnetosfery, a także odkrycia pasów radiacyjnych planety (analogicznych do pasów Van Allena wokół Ziemi). Ponadto precyzyjna analiza zmian ruchu sond Pioneer w polu grawitacyjnym Jowisza pozwoliła na dokładniejsze niż dotychczas wyznaczenie masy największej planety i jej czterech satelitów galileuszowych, a także rozkładu gęstości materii wewnątrz jej globu.

Zbliżenie sond Pioneer do największej planety zwiększyło ich prędkości i zmieniło kierunek ruchu. Pioneer 10 porusza się odtąd względem Słońca po torze hiperbolicznym (położonym mniej więcej w płaszczyźnie ekliptyki), oddalając się od niego w kierunku przeciwnym do kierunku jego ruchu w Galaktyce. Po minięciu Jowisza przyrządy Pioniera 10 nadal działały przekazując na Ziemię wyniki pomiarów dotyczących wiatru słonecznego i promieniowania kosmicznego wnikającego do Układu Słonecznego. Wskutek wyczerpywania się izotopowego ogniwa termoelektrycznego, zasilającego urządzenia sondy w energię elektryczną, po raz ostatni udało się zarejestrować dochodzący z niej sygnał 23 stycznia 2003 roku.

We wrześniu 2019 roku Pionier 10 znajdował się w odległości około 124 AU od Słońca i oddalał od niego z prędkością mniej więcej 11.9 km/s (około 2.5 AU/rok). Za około 300 tys. lat minie, w odległości około 3 lat świetlnych, gwiazdę Ross 248 odległą od Słońca o ponad 10 lat świetlnych, która znajduje się na niebie w gwiazdozbiornie Byka. W ciągu najbliższego miliona lat Pioneer 10 będzie miał 10 „zblizeń” z gwiazdami naszego otoczenia galaktycznego w odległościach od 3 do 9 lat świetlnych.

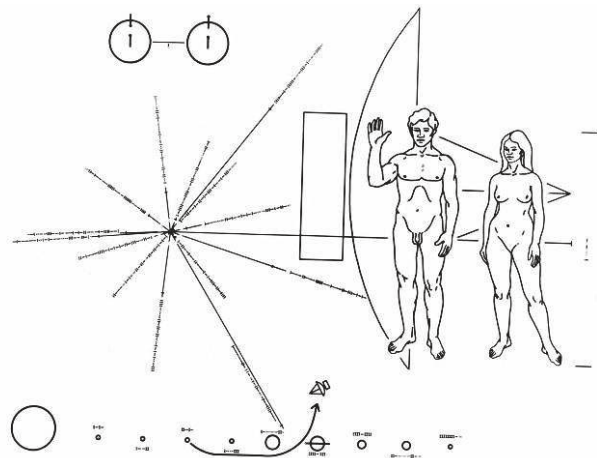
Tor sondy Pioneer 11, w wyniku oddziaływania grawitacyjnego Jowisza, został natomiast odchyłony od płaszczyzny ruchu planet, unosząc ją ponad tę płaszczyznę od strony północnej, a następnie kierując z powrotem ku płaszczyźnie ekliptyki w miejscu, gdzie właśnie znajdował się Saturn. Przelot koło Saturna nastąpił 1 września 1979 roku w odległości prawie 21 tys. km od jego warstw powierzchniowych. Po raz pierwszy w sposób kontrolowany wykorzystano wspomaganie grawitacyjne podczas przelotu sondy kosmicznej koło jednej planety w celu skierowania jej w pobliże drugiej.

Sonda Pioneer 11 dostarczyła pierwszych, rekonesansowych informacji o Saturnie: odkryto pole magnetyczne planety i jej magnetosferę, ciekawy pierścień F oraz dwa nowe księżyce. Pioneer 11 dokonał też pierwszych obserwacji „z bliska” największego satelity Saturna Tytana, przelatując 2 września 1979 roku w odległości od niego 354 tys. km. Szczegółowa analiza zmian ruchu sondy w pobliżu Saturna umożliwiła także znacznie dokładniejsze wyznaczenie mas zarówno samej planety jak też niektórych jej satelitów.

Po minięciu Saturna Pioneer 11 oddala się od Słońca w tym samym mniej więcej kierunku, w którym Słońce porusza się w Galaktyce (przeciwnie niż Pioneer 10). Łączność z sondą nawiązano po raz ostatni 24 listopada 1995 roku. We wrześniu 2019 roku Pionier 11 znajdował się w odległości około 103 AU od Słońca i oddalał od niego z prędkością mniej więcej 11.2 km/s (około 2.4 AU/



Sonda kosmiczna Pioneer



Informacja o naszej cywilizacji na sondach Pioneer



Sonda kosmiczna Voyager



Zdjęcie Jowisza wykonane z pokładu sondy Voyager 1 (czarna plamka na tarczy planety jest cieniem jednego z księżyców)

rok). Ocenia się, że za 4 miliony lat przeleci koło gwiazdy λ Aql, znajdującej się na niebie w gwiazdozbiornie Orła.

Warto jeszcze wspomnieć, że na pokładzie obu sond Pioneer 10 i 11 umieszczone zostało przesłanie ludzkości do ewentualnych cywilizacji pozaziemskich. Na przymocowanej do korpusu sondy płycie ze złota wyryte są obrazy postaci kobiety i mężczyzny na tle konturów sondy (dla ukazania ich rozmiarów). Rysy twarzy stanowią komputerowe uśrednienie wyglądu wszystkich ras ludzkich, a lekko uniesiona ręka mężczyzny ma wyrażać jego życzliwy stosunek do otoczenia. Stopień rozumienia świata przez te istoty ukazuje schemat zmian stanu atomu wodoru jako najbardziej rozpowszechnionego pierwiastka we Wszechświecie, a o ich pochodzeniu mówi rysunek Układu Słonecznego z zaznaczeniem planety, z której sonda została wystrzelona. Pomysłodawcą i jednym z autorów tak zakodowanych wiadomości o nas był Carl Sagan (1934-1996), amerykański astronom oraz wybitny popularyzator badań kosmicznych i wiedzy o Wszechświecie.

Voyager 1 i 2

Przeloty sond Pioneer 10 i 11 koło Jowisza i Saturna były poniekąd wstępem do wielkiej epopei kosmicznej jaką stała się amerykańska misja dwóch sond Voyager, której celem było zbadanie wszystkich czterech wielkich planet: Jowisza, Saturna, Urana i Neptuna. Wystrzelone zostały z Przylądka Canaveral na Florydzie na pomoc raket Titan-Centaur w 1977 roku: 20 sierpnia Voyager 2 i 5 września Voyager 1. Dwa identyczne aparaty kosmiczne (o masie startowej 825 kg, z czego na instrumenty naukowe przypadało 105 kg), zostały wyposażone w 11 bardzo starannie dobranych przyrządów dla zebrania wszechstronnej i możliwie najpełniejszej informacji o planetach, ich satelitach oraz najbliższym otoczeniu.

Po zaledwie półtorarocznym locie pierwszy do Jowisza dotarł Voyager 1, mijając go 5 marca 1979 roku w minimalnej odległości 277 tys. km od warstw powierzchniowych. Voyager 2, po 23 miesiącach lotu, zbliżył się do Jowisza 9 lipca 1979 roku, ale tym razem – dla uniknięcia niebezpieczeństwa związanego z pasami radiacyjnymi planety – zadbano, aby najmniejsza odległość sondy od jego powierzchni była większa i wyniosła 650 tys. km.

Najbardziej spektakularnym rezultatem przelotu obu sond koło Jowisza było uzyskanie ponad 52 tys. zdjęć planety i jej satelitów o zdolności rozdzielczej dochodzącej do jednego kilometra. Pozwoliły one m.in. na odkrycie aktywności wulkanicznej księżycy Io (do którego pierwsza z sond zbliżyła się na odległość zaledwie 21 tys. km), poznanie różnych osobliwości pozostałych księżyców galileuszowych: Europy, Ganimedesa i Callisto, odkrycie trzech nowych księżyców Jowisza, dostrzeżenie śladu zgęszczenia materii wokół planety tworzącego pierścienia podobny do pierścienia Saturna, choć znacznie mniej okazały od niego.

Wśród najważniejszych osiągnięć Voyagerów poczesne miejsce zajmują także rezultaty sondowań największej struktury plazmowej w Układzie Słonecznym, jaką jest magnetosfera Jowisza. Głównie z ich obserwacji i pomiarów wiadomo, że jej poprzeczny rozmiar jest dziesięć

ciokrotnie większy od średnicy Słońca, a ogon – sięgający orbity Saturna – ma długość około 4.5 AU.

Zbliżenie Voyagera 1 do Jowisza zostało tak zaplanowane, aby jego oddziaływanie grawitacyjne nie tylko skierowało sondę w pobliże Saturna, ale także umożliwiło jak najlepsze zbadanie Tytana, największego i najbardziej intrygującego księżycy tej planety. Jowisz naleźycie wywiązał się z zadanej mu roli i 12 listopada 1980 roku sonda minęła Saturna w minimalnej odległości 124 tys. km od jego warstw powierzchniowych, a do Tytana zbliżyła się na odległość zaledwie 4500 km. Przelot Voyagera 2 koło Saturna nastąpił 26 sierpnia 1981 roku w minimalnej odległości od powierzchni 101 tys. km, przy czym został on przeprowadzony w taki sposób, aby w wyniku wspomaganie grawitacyjnego planety trajektoria sondy uległa zmianie, która umożliwiłaby w przyszłości zbliżenia do Urana i Neptuna.

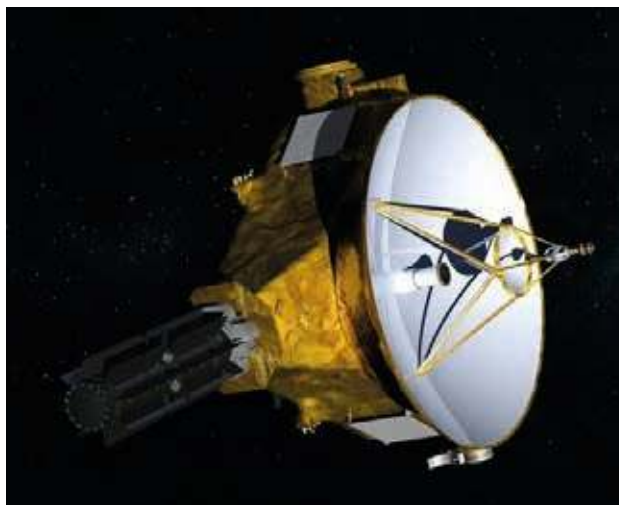
Najwięcej trudnych do rozwiązania zagadek dostarczyły Voyagery badając subtelną strukturę pierścieni Saturna. Szczególnie ciekawym odkryciem było dostrzeżenie skomplikowanej i niespotykanej dotychczas budowy pierścienia F (odkrytego w 1979 roku za pomocą sondy Pioneer 11, o czym wyżej wspomniano). Okazało się, że złożony on jest z wielu jakby włókien, ale ułożonych nie współśrodkowo, jak w przypadku innych pierścieni, lecz owijających się śrubowo wzajemnie wokół siebie. Prawdopodobnie odpowiedzialnymi za to są odkryte przez Voyagera 1 dwa małe satelity poruszające się w sąsiedztwie tego pierścienia (Prometeusz i Pandora, które określa się wspólnym mianem księżyców pasterskich). Na strukturę pierścieni mają zapewne także wpływ odkryte dzięki Voyagerom maleńkie księżyce: Pan i Atlas.

Innym ciekawym zjawiskiem zaobserwowanym przez Voyagery są radialnie rozchodzące się smugi – przypominające szprychy koła rowerowego – widoczne na powierzchni najjaśniejszego pierścienia. Rotują one zgodnie z obrotem planety i są zapewne związane z oddziaływaniem pola magnetycznego Saturna z naładowanymi cząstkami pyłowymi pierścienia. Do najciekawszych dokonań sond Voyager należy też dostarczenie informacji o atmosferze Tytana, które wydają się wskazywać, że warunki panujące dziś na tym księżycu mogą być podobne do warunków panujących na Ziemi kilka miliardów lat temu, przed powstaniem na niej życia. Sporo zagadek, a także zupełnie nowych i nieoczekiwanych danych, przyniosły ponadto zdjęcia powierzchni innych satelitów Saturna wykonane przez kamery Voyagerów.

Po przelocie przez układ Saturna tor Voyagera 1 został silnie odchylony od płaszczyzny ekliptyki, w której dotychczas sonda się poruszała, unosząc ją ponad tę płaszczyznę, czyli ku stronie północnej, pod kątem około 35°. W sierpniu 2012 roku sonda Voyager 1, znajdując się w odległości około 122 AU od Słońca, przekroczyła granicę heliosfery, czyli obszaru wokół Słońca, w którym wiatr słoneczny dominuje nad materią międzygwiazdową. We wrześniu 2019 roku Voyager 1 znajdował się w odległości około 147 AU od Słońca (będąc obecnie najbardziej oddalonym od Ziemi dziełem człowieka) i poruszał się z prędkością mniej więcej 17.0 km/s (około 3.6 AU/rok),



Zdjęcie Saturna wykonane z pokładu sondy Voyager 1



Sonda kosmiczna New Horizons



Obraz Plutona uzyskany przez sondę New Horizons

po heliocentrycznej orbicie hiperbolicznej o mimośrodku 3.7, w kierunku pokrywającym się z grubsza z kierunkiem ruchu Słońca w Galaktyce. Wysyłane z niego sygnały radiowe docierają do odbiornika po prawie 21 godzinach. Przewiduje się, że za ponad 300 lat Voyager 1 osiągnie obłok Oorta, a za około 40 tys. lat minie gwiazdę Gliese 445 z gwiazdozbioru Żyrafy w odległości około 1.6 lat świetlnych.

Po ponad ośmioletniej podróży przez Układ Słoneczny Voyager 2, który poruszał się mniej więcej w płaszczyźnie

ekliptyki, przeciął 24 stycznia 1986 roku niemal prostopadłą do niej płaszczyznę równikową Urana, będącą płaszczyzną jego pierścieni i ruchu satelitów. Dolatując do planety sonda „widziała” w pełni oświetloną jej południową półkulę. Minimalna odległość sondy od powłoki chmur spowijających glob planety wyniosła około 81 tys. km. Najbliższym księżycem, koło którego Voyager 2 przeleciał, była Miranda znajdująca się w odległości od niego zaledwie 29 tys. km.

Do najważniejszych odkryć zawdzięczanych Voyagerowi 2 należy potwierdzenie istnienia pola magnetycznego Urana, którego obecności domyślano się już wcześniej. W magnetosferze planety stwierdzono obecność pasów radiacyjnych oraz zaobserwowano wiele procesów plazmowych i falowych. W wyniku badań pierścieni okazało się, że – wbrew pierwotnym opiniom – wykazuje on sporo podobieństw do znacznie lepiej poznanego układu pierścieni Saturna. Odkryto też szeroki, cienki i niezbyt gęsty pas pyłu rozprzestrzeniający się od wewnętrznych pierścieni aż do odległości około 11 tys. km od powierzchni planety. Dzięki sondzie Voyager 2 poznano powierzchnie największych satelitów Urana, które są pokryte licznymi kraterami uderzeniowymi i różnymi strukturami świadczącymi o ich aktywności geologicznej w przeszłości; odkryto też 10 nowych księżyców.

Po 12 latach od startu, 25 sierpnia 1989 roku, Voyager 2 przemknął nad północnym biegunem Neptuna w odległości zaledwie 4850 km od powierzchni z prędkością względem mijanej planety aż 27 km/s. Tak duże zbliżenie umożliwiło poznanie bogactwa struktur i najrozmaitszych ruchów materii w warstwach powierzchniowych planety. Do najciekawszych osobliwości Neptuna odkrytych przez Voyagera 2 należy jego pole magnetyczne. Wprawdzie okazało się ono dwukrotnie słabsze od ziemskiego, ale konfiguracja tworzonej przez nie magnetosfery, świadcząca o złożoności jego struktury, ciągle budzi duże zainteresowanie. Dzięki sondzie Voyager 2 odkryto pierścienie Neptuna przypieczętowując pogląd, że struktury pierścieniowe stanowią naturalną formę obecności materii w otoczeniu gazowych gigantów w Układzie Słonecznym. Dostrzeżono aktywność wulkaniczną na powierzchni Trytona, największego księżyca planety, a także odkryto 5 nowych jej satelitów.

Po przelocie koło Neptuna tor Voyagera 2 – podobnie jak Voyagera 1 po zbliżeniu do Saturna – został odchyłony od płaszczyzny ruchu planet, w której dotychczas sonda się poruszała, kierując ją poniżej tej płaszczyzny, czyli ku stronie południowej, pod kątem około 48°. W listopadzie 2018 roku, w odległości około 119 AU od Słońca, sonda Voyager 2 przekroczyła granicę heliosfery i znalazła się w przestrzeni międzygwiazdowej. We wrześniu 2019 roku znajdowała się w odległości około 122 AU od Słońca i oddalała od niego z prędkością mniej więcej 15.3 km/s (około 3.2 AU/rok), po heliocentrycznej orbicie hiperbolicznej o mimośrodku 6.3, w kierunku pokrywającym się z grubsza z kierunkiem ruchu Słońca w Galaktyce. Przewiduje się, że za ponad 40 tys. lat Voyager 2 minie gwiazdę Ross 248 w gwiazdozbiorze Andromedy w odległości ponad 1.6 lat świetlnych, a za prawie 300 tys. lat przeleci koło

najjaśniejszej gwiazdy nieba Syriusza w odległości około 4.3 lat świetlnych.

Trzeba jeszcze dodać, że do korpusu każdej z sond Voyager została przymocowana płytka ze złota z zapisem (wykonanym w technologii połowy lat siedemdziesiątych XX wieku i przygotowanym przez wspomnianego już wyżej Carla Sagana) istotnych informacji o nas, o naszej cywilizacji, o planecie, na której żyjemy, a także o tym co wiemy o świecie, który nas otacza. Składają się na nie m.in. krótkie, jednozdaniowe pozdrowienie wypowiedziane w 55 językach (w tym również po polsku), przesłania sekretarza generalnego Organizacji Narodów Zjednoczonych Kurta Waldheima i prezydenta Stanów Zjednoczonych Jimmy Cartera, 115 zdjęć i rysunków Ziemi, ludzi oraz przedmiotów i budowli, zapis najbardziej charakterystycznych dźwięków jak śpiew ptaków, szczekanie psa czy warkot silnika samochodowego, nagranie fragmentów różnych utworów muzycznych od Bacha, Beethovena i Mozarta po muzykę ludową różnych narodów. Na płycie została też wygrawerowana obrazkowa instrukcja w jaki sposób należy odczytywać zapisane na niej informacje. Obie sondy Voyager są jeszcze ciągle sprawne technicznie i kontakt z nimi jest stale utrzymywany. Przewiduje się, że dzięki termoelektrycznym generatorom izotopowym energii, których działanie oparte jest na rozpadzie promieniotwórczym plutonu, będą funkcjonować do około 2025 roku.

New Horizons

Misja kosmiczna New Horizons jest już w całości projektem XXI wieku. W 2001 roku NASA rozpoczęła przygotowania do wysłania w kierunku najdalszej planety Układu Słonecznego, za jaką wtedy jeszcze uważano Plutona, obiektu o nazwie New Horizons (Nowe Horyzonty). Oczekiwano, że rozszerzy on horyzonty wiedzy o Układzie Słonecznym, umożliwiając poznanie procesów, które doprowadziły do uformowania się pasa Kuipera oraz do powstania w nim nietypowego układu podwójnego, jakim okazała się planeta karłowata Pluton. Start sondy New Horizons odbył się 19 stycznia 2006 roku z Przylądka Canaveral na Florydzie za pomocą rakiety Atlas V, która nadała sondzie rekordową prędkość aż 16.3 km/s, o czym już wyżej była mowa.

Po zaledwie 13 miesiącach, 28 lutego 2007 roku, przeleciała koło Jowisza w odległości 2305 tys. km. Umożliwiło to wykonanie wielu obserwacji jego powierzchni m.in. poznanie różnych subtelnosci tzw. wielkiej czerwonej plamy, a także zbadanie pierścieni planety i jej satelitów. Warto też podkreślić, że przez kilka miesięcy po minięciu Jowisza sonda znajdowała się w ogniu jego magnetosfery, co stworzyło bezprecedensową szansę sondowania tej największej struktury Układu Słonecznego. Oddziaływanie grawitacyjne Jowisza tak zmieniło tor sondy New Horizons i powiększyło jej prędkość, że po ośmioletniej podróży przez Układ Słoneczny dotarła do swojego głównego celu, znajdującego się wtedy w odległości około 33 AU od Słońca.

Sonda New Horizons przeleciała koło Plutona 14 lipca 2015 roku w odległości od powierzchni 13500 km; od



Obraz planetoidy 2014 MU69 uzyskany przez sondę New Horizons

jego największego księżycy Charona dzielił ją wtedy dystans 29500 km. Dzięki badaniom wykonanym wtedy z jej pokładu dowiedziano się, że mimo wielkiego oddalenia od Słońca Pluton jest ciągle aktywny geologicznie i ma młodą, bardzo zróżnicowaną powierzchnię lodową, pod którą być może istnieją niewielkie obszary ciekłej wody zmieszanej z amoniakiem; znaleziono też dowody na to, że w przeszłości był spowity gęstą atmosferą. Również na lodowej powierzchni Charona dostrzeżono najrozmaitsze wzgórza, depresje, żleby i kaniony.

Po owocnym zrealizowaniu głównego celu misji New Horizons znaleziono jeszcze jeden obiekt pasa Kuipera, do którego sonda mogłaby się zbliżyć. W dniu 1 stycznia 2019 roku przeleciała koło planetoidy (486958) 2014 MU₆₉, nieoficjalnie nazywanej Ultima Thule (synonim krańca świata), w minimalnej odległości zaledwie 3500 km; spotkanie to nastąpiło w odległości prawie 44 AU od Słońca. Zebrane wtedy dane pomiarowe są jeszcze ciągle transmitowane na Ziemię, co ma trwać do połowy 2020 roku. Dotychczas zdołano m.in. odtworzyć obraz planetoidy, która okazała się być jakby zlepkiem dwóch wyraźnych segmentów. Większy, którego rozmiary oszacowano na 22×20×7 km, jest silnie spłaszczony, a mniejszy przypomina kulę o średnicy 14 km; całość rotuje w okresie około 16 godzin. We wrześniu 2019 roku sonda New Horizons znajdowała się w odległości od Słońca ponad 45 AU i oddalała od niego z prędkością nieco przewyższającą 14 km/s (prawie 3.0 AU/rok). Możliwe, że uda się jej zbadać jeszcze jakiś inny obiekt pasa Kuipera, poszukiwania trwają.

Źródłem wszystkich zdjęć jest NASA.

Krzysztof Ziolkowski

Czy „gwiazdy śmierci” zagrażają Ziemi?

Niedawno astronomowie – w tym Polacy – opisali w „Nature” niezwykle energetyczny rozbłysk gamma (zaobserwowany z ziemskiej orbity). Dr Michał Michałowski z Uniwersytetu Adama Mickiewicza opowiada, że cząstki tego błysku powstały ekstremalnie daleko stąd – pokonywały Wszechświat aż 4,5 mld lat zanim udało się nam je zarejestrować. A były to fotony milion milionów razy bardziej energetyczne niż światło, które widzimy z innych gwiazd.

Naukowiec zapytany, co by się stało, gdyby tak energetyczny rozbłysk gamma powstał w naszej Galaktyce, mówi: „Byłby z tym problem. Tak silne promieniowanie mogłoby zniszczyć atmosferę Ziemi. A na pewno padłyby systemy komunikacji czy elektronika”. Wyjaśnia jednak, że powstanie takiego rozbłysku gamma gdzieś blisko nas jest mało prawdopodobne. „W naszym otoczeniu nie ma gwiazd, które mogłyby wybuchnąć tworząc błyski gamma. Pod tym względem prawdopodobnie jesteśmy bezpieczni” – uważa.

Podstarzałe gwiazdy w sąsiedztwie ziemi

A co z innymi rodzajami kosmicznych wybuchów? Inny z autorów publikacji z „Nature” – dr Mariusz Gromadzki z Obserwatorium Astronomicznego UW – pytany o najbliższe Ziemi gwiazdne zagrożenia, odpowiada o Betelgezie i Rigelu – świetnie widocznych na nocnym niebie gwiazdach z gwiazdozbioru Oriona. „Obie wybuchną – tworząc supernowe – w ciągu najbliższych setek tysięcy, a może kilku milionów lat” – mówi.

Prof. Joanna Mikołajewska z Centrum Astronomicznego im. M. Kopernika PAN tłumaczy, że w wybuchach gwiazd najgroźniejsze byłoby promieniowanie wysokoenergetyczne – gamma czy rentgenowskie. „Takie promieniowanie mogłoby zmienić skład ziemskiej atmosfery” – mówi. Mogłoby ono np. niszczyć warstwę ozonową Ziemi, która chroni nas przed szkodliwym promieniowaniem UV. Drugą sprawą jest to, że pod wpływem tej energii z wybuchu gwiazdy, atomy tlenu i azotu w atmosferze łączyłyby się w tlenek azotu, którego stężenie w atmosferze mogłoby wzrosnąć. Zbyt duże stężenie tego gazu mogłoby być szkodliwe (...)

Dr Gromadzki informuje, że ostatni wybuch supernowej w naszej Galaktyce obserwowany był prawie tysiąc lat temu – w 1054 r. Umierająca gwiazda (SN 1054) była tak jasna, że widziano ją na niebie nawet w dzień. Odnotowano to choćby w chińskich czy arabskich kronikach. W wyniku tego wybuchu pozostała Mgławica Kraba.

Wybuch ten doprowadził wtedy do zauważalnych zmian w ziemskiej atmosferze. Prof. Mikołajewska tłumaczy, że w rdzeniach lodowych pobranych z Arktyki widać, że rzeczywiście w połowie XI wieku wzrosła w ziemskiej atmosferze koncentracja trójtlenku azotu. „Efekty te widać w badaniach na Ziemi, ale to wcale nie znaczy, że były one groźne dla życia na Ziemi” – mówi.

Nie wybuchajcie, białe karły!

gorzej jednak mogłoby być, gdyby bliżej Ziemi znalazła się supernowa typu Ia związana z termonuklear-

nym unicestwieniem białego karła. „Te wybuchy są bardziej energetyczne. Do takiego groźnego dla życia na Ziemi wybuchu dochodzi średnio co 1 mln – 1 mld lat. Nie jest więc to częste wydarzenie” – komentuje prof. Mikołajewska. I zapewnia, że w pobliżu Układu Słonecznego nie ma groźnego dla ludzkości kandydata na supernową typu Ia.

Dodaje jednak, że wybuch supernowej typu Ia oddalonej od Ziemi nawet o 2 tys. lat świetlnych mogłoby zniszczyć satelity czy zakłócić działanie urządzeń elektronicznych na Ziemi. „Dzisiejsza elektronika jest bowiem wrażliwa na promieniowanie kosmiczne” – zaznacza. I przyznaje, że astronomom są znani gwiazdni kandydaci, którzy mogliby – w razie kosmicznej eksplozji – w naszym świecie – tak bardzo uzależnionym od urządzeń elektronicznych – nieźle namieszać.

Jak jednak zwraca uwagę rozmówczyni PAP, elektronicznie na Ziemi zaszkodzić może nawet potężna burza na Słońcu. „Taka potężna burza słoneczna miała miejsce np. ponad 100 lat temu (w 1859 r.). Dziś jej skutki byłyby o wiele, wiele dotkliwsze niż wtedy” – ocenia (...)

I słońce będzie miało swój kres

Zagrożeniem dla Ziemi będzie jednak na pewno śmierć najbliższej nam gwiazdy – Słońca. Obecnie Słońce świeci dzięki fuzji termonuklearnej – syntezie wodoru w hel – w jego centrum. Za jakieś 5 mld lat to paliwo się wyczerpie, a Słońce zacznie się przekształcać w czerwonego olbrzymia. Jego helowe jądro zacznie się kurczyć, a zewnętrzne warstwy – puchnąć. Słońce będzie się stawało coraz większe, sięgnie nie tylko orbity Ziemi, ale i Marsa. Z czasem jednak cała otoczka zostanie odrzucona i utworzy mgławicę planetarną, z masywnym jądrem o rozmiarach Ziemi – białym karłem – w centrum. „Ale nie ma się co bać. Nasza cywilizacja i tak nie dotrwa do tego momentu” – uważa prof. Mikołajewska.

**Źródło: PAP – Nauka w Polsce,
Ludwika Tomala
Foto – NASA**

Czy system Ptolemeusza jest równoważny systemowi Kopernika?

Jan Kurzyk

Pytanie zawarte w tytule byłoby niezrozumiałe w czasach Kopernika i jeszcze długo po nim. Dzieło Kopernika miało znaczenie nie tylko naukowe, ale również, a może przede wszystkim, światopoglądowe i opór przed przyjęciem wniosków z niego wynikających był ogromny.

Dzisiaj wiemy, że wszystkie układy odniesienia są sobie równoważne. O wyborze danego układu decyduje głównie prostota opisu danego zjawiska w konkretnym układzie odniesienia. Wybór układu odniesienia związanego ze Słońcem uprościł opis ruchu planet, ale opis w układzie związanym z Ziemią jest równoprawny. Czy zatem oba układy, Ptolemeusza i Kopernika, są równoważne? Czy po przesunięciu układu odniesienia z Ziemi do Słońca, w przypadku systemu Ptolemeusza, odtworzymy system Kopernika? I odwrotnie, czy przesunięcie układu odniesienia ze Słońca do Ziemi, w przypadku systemu Kopernika, odtworzy system Ptolemeusza? Sprawdźmy.

System Ptolemeusza

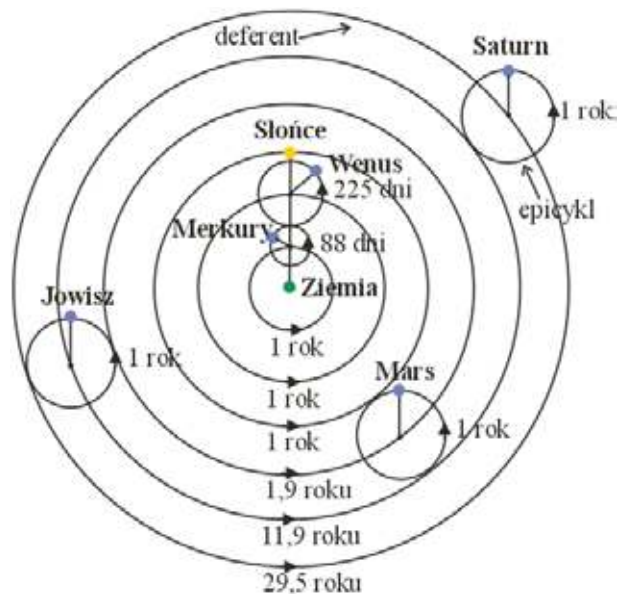
Niewiele wiemy o życiu Ptolemeusza. Żył on w drugim wieku naszej ery, najprawdopodobniej w latach od 100 do 178 w Aleksandrii, która należała wówczas do cesarstwa rzymskiego. W swoim najsłynniejszym dziele *Almagest* [1] opisał on geocentryczny system astronomiczny, który był obowiązującym i niekwestionowanym systemem aż do czasów Kopernika (1400 lat!). Dzieło Ptolemeusza opierało się na obserwacjach astronomicznych wykonanych przede wszystkim przez greckiego astronoma Hipparcha żyjącego dwa wieki przed Ptolemeuszem.

W najprostszej wersji według systemu Ptolemeusza Słońce (i Księżyc) porusza się wokół Ziemi ruchem jednostajnym po okręgu, a planety poruszają się ruchem bardziej złożonym. Krążą one ruchem jednostajnym po okręgach zwanych epicyklami, zaś środki tych epicykli poruszają się ruchem jednostajnym po okręgach zwanych deferentami. W środku deferentów znajduje się Ziemia (patrz rysunek 1). Był to pomysł zastosowany kilka wieków przed Ptolemeuszem przez Apoloniusza z Pergi [2]. Ptolemeusz wzbogacił ten układ między innymi o koła ekscentryczne i ekwant [3], które miały wyjaśnić obserwowaną przez astronomów zmienną prędkość przesuwania się planet po nieboskłonie.

System dzielił planety na dwie grupy: Merkury i Wenus, nazwane planetami wewnętrznymi i trzy pozostałe ze znanych wówczas planet – Mars, Jowisz i Saturn – nazwane planetami zewnętrznymi. Obie grupy planet różniły się zachowaniem. W przypadku planet wewnętrznych środki ich epicyklów leżały zawsze na linii łączącej Ziemię ze Słońcem. A w przypadku planet zewnętrznych linia łącząca planetę ze środkiem jej epicyklu była zawsze równoległa do linii łączącej Ziemię ze Słońcem. Obie prawidłowości nie znajdowały żadnego uzasadnienia w systemie.

Ponieważ Słońce okrążyło Ziemię w ciągu jednego roku, to konsekwencją opisanych wyżej zachowań planet było to, że środki epicyklów planet wewnętrznych okrążyły swoje deferenty w czasie jednego roku, zaś w przypadku planet zewnętrznych jeden rok zajmowało planecie okrążenie swojego epicyklu. Pozostałe okresy ruchów planet były następujące: Merkury okrążył swój epicykl w czasie 88 dni, a Wenus w czasie 225 dni. Mars okrążył swój deferent w czasie 1,9 roku, Jowisz w czasie 11,9 roku, a Saturn w czasie 29,5 roku (patrz rysunek 1 oraz tabela 1).

Kolejność obiektów Ptolemeusz ustalił intuicyjnie. Najdalej od Ziemi były gwiazdy (nazywane gwiazdami stałymi) następnie planety o najdłuższych okresach obie-



Rysunek 1. Uproszczony schemat systemu Ptolemeusza. Na rysunku nie zachowano proporcji deferentów i epicykli oraz rozmiarów ciał niebieskich.

Tabela 1. Czasy obiegów epicykli i deferentów wg. Ptolemeusza [4].

PLANETA	CZAS OBIEGU EPICYKLU	CZAS OBIEGU DEFERENTU
Merkury	88 dni	1 rok
Wenus	225 dni	1 rok
Słońce	-	1 rok
Mars	1 rok	1,9 roku
Jowisz	1 rok	11,9 roku
Saturn	1 rok	29,5 roku

Tabela 2. Odległości planet od Ziemi wg. Ptolemeusza wyrażone w promieniach Ziemi [5].

PLANETA	ODLEGŁOŚĆ MINIMALNA	ODLEGŁOŚĆ MAKSYMALNA
Merkury	64	166
Wenus	166	1079
Słońce	1160	1260
Mars	1260	8820
Jowisz	8820	14187
Saturn	14187	19865

gu deferentów, czyli Saturn, Jowisz i Mars. Kolejnym obiektem było Słońce. Rozdzielało ono symetrycznie sześć obiektów: 3 planety zewnętrzne oddalone od Ziemi dalej niż Słońce i trzy planety (licząc wraz z Księżycem, który też był zaliczany do planet) położone bliżej Ziemi niż Słońce. Najbliżej Ziemi znajdował się Księżyc, następnie Merkury, czyli planeta o krótszym okresie obiegu wokół swojego epicyklu, a za Merkurym Wenus, o dłuższym okresie obiegu wokół epicyklu od Merkurego. Każda planeta miała swój pas ruchu zawierający się pomiędzy dwiema sferami, przy czym większa sfera ruchu danej planety była jednocześnie mniejszą sferą następnej planety (patrz np. rysunki 4 (a) i 5 (a)). W przypadku Wenus większa sfera była jednocześnie sferą Słońca, a ta była jednocześnie mniejszą sferą Marsa.

Świat według Ptolemeusza był bardzo mały. Sfera Gwiazd stałych była oddalona od Ziemi o, zaledwie, 20 tysięcy promieni Ziemi, promienie innych sfer podaje tabela 2.

System Kopernika

W poprzednim punkcie opisałem najprostszą wersję systemu Ptolemeusza. W rzeczywistości był on znacznie bardziej skomplikowany. Niezgodności z obserwacjami powodowały, że system stopniowo rozbudowywano dodając coraz więcej kół, Stopień komplikacji jaki powstał w ciągu 1400 lat użytkowania systemu był niewyobrażalny. System Kopernika radykalnie przeciął ten proces.

Powszechnie uważa się, że system Kopernika jest bardzo prosty, tzn. że wszystkie planety poruszają się po orbitach kołowych, których środkiem jest Słońce. Ale w rzeczywistości system Kopernika też był skomplikowany tyle, że nieporównywalnie mniej niż system Ptolemeusza. W swoim dziele *De revolutionibus orbium coelestium* [6]

Tabela 3. Odległości planet od Słońca wg. Kopernika wyrażone w promieniach orbity Ziemi. Orz okresy obiegu wokół Słońca [2].

PLANETA	Promień orbity	Okres obiegu
Merkury	0,387	88 dni
Wenus	0,719	225 dni
Ziemia	1	365,25 dni
Mars	1,520	687 dni
Jowisz	5,219	12 lat
Saturn	9,174	30 lat

po opisanu systemu sfer, Kopernik pisze [2]: „*Tak więc mamy razem siedem kół, po których biegnie Merkury. Wenus porusza się po pięciu, Ziemia – po trzech, Księżyc wokół niej po czterech, Mars wreszcie, Jowisz i Saturn mają ich po pięć. Wystarczą więc w sumie 34 koła dla wytłumaczenia całej budowy świata i całego korowodu planet.*”

Promienie orbit planet Kopernik podał nie w promieniach Ziemi, jak zrobił to Ptolemeusz, ale w promieniach orbity Ziemi (patrz tabela 3). Wartości tych promieni są bardzo zbliżone do współczesnych. Również okresy obiegu są poprawne. Jedynie dla Jowisza i Saturna są nieco większe od znanych dzisiaj.

System Kopernika w układzie związanym z Ziemią

Do dalszych rozważań przyjmijmy najprostszą wersję obu systemów. Dla uproszczenia założymy dodatkowo, że wszystkie planety poruszają się w jednej płaszczyźnie. Jeśli środek układu współrzędnych kartezjańskich umieścimy w środku Słońca, to współrzędne Słońca wynoszą $x_S = 0$ i $y_S = 0$. Zaś współrzędne planety P zmieniają się w czasie zgodnie z równaniami

$$\begin{aligned}x_p(t) &= R_p \cos(\omega_p t + \varphi_p), \\x_p(t) &= R_p \sin(\omega_p t + \varphi_p).\end{aligned}$$

W powyższych wyrażeniach R_p jest promieniem orbity planety, ω_p prędkością kątową jej ruchu orbitalnego, a φ_p fazą początkową zależną od położenia planety w chwili $t = 0$. W przypadku Ziemi dostajemy

$$\begin{aligned}x_z(t) &= R_z \cos(\omega_z t + \varphi_z), \\x_z(t) &= R_z \sin(\omega_z t + \varphi_z).\end{aligned}$$

Przenieśmy teraz środek układu współrzędnych ze Słońca na Ziemię. Aby tego dokonać musimy od współrzędnych danego obiektu odjąć współrzędne Ziemi. Teraz dla Ziemi mamy

$$x_z = 0, \quad y_z = 0,$$

a dla Słońca

$$\begin{aligned}x_s(t) &= R_z \cos(\omega_z t + \varphi_z), \\x_s(t) &= R_z \sin(\omega_z t + \varphi_z).\end{aligned}$$

lub, jeśli zdefiniujemy $\varphi_S \equiv \varphi_z + \pi$,

$$\begin{aligned}x_z(t) &= R_z \cos(\omega_z t + \varphi_S), \\x_z(t) &= R_z \sin(\omega_z t + \varphi_S).\end{aligned}$$

A zatem Słońce porusza się względem Ziemi po orbicie kołowej o tym samym promieniu co promień orbity Ziemi

i z taką samą prędkością kątową, jaką ma Ziemia w swoim ruchu orbitalnym. W przypadku Planety P dostajemy

$$\begin{aligned} x_p(t) &= R_p \cos(\omega_p t + \varphi_p) - R_z \cos(\omega_z t + \varphi_z), \\ x_p(t) &= R_p \sin(\omega_p t + \varphi_p) - R_z \sin(\omega_z t + \varphi_z). \end{aligned}$$

Przenieśmy w obu równaniach wyrazy z większym promieniem na lewą stronę. Dla planet wewnętrznych otrzymamy równania

$$\begin{aligned} x_p(t) + R_z \cos(\omega_z t + \varphi_z) &= R_p \cos(\omega_p t + \varphi_p), \\ x_p(t) + R_z \sin(\omega_z t + \varphi_z) &= R_p \sin(\omega_p t + \varphi_p). \end{aligned}$$

Niech

$$\begin{aligned} x_0(t) &\equiv -R_z \cos(\omega_z t + \varphi_z), \\ x_0(t) &\equiv -R_z \sin(\omega_z t + \varphi_z). \end{aligned}$$

Wówczas równania ruchu planety względem Ziemi będą miały postać

$$\begin{aligned} x_p(t) - x_0(t) &= R_p \cos(\omega_p t + \varphi_p), \\ y_p(t) - y_0(t) &= R_p \sin(\omega_p t + \varphi_p). \end{aligned}$$

Równaniem toru opisywanego tymi równaniami jest okrąg o promieniu R_p i środku w punkcie (x_0, y_0) :

$$(x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2 = R_p^2$$

Ale zgodnie z definicją punktu (x_0, y_0) środek powyższego okręgu nie jest stały, lecz porusza się po okręgu o promieniu R_z i środku w punkcie $(0,0)$, czyli w środku Ziemi:

$$x_0^2 + y_0^2 = R_z^2$$

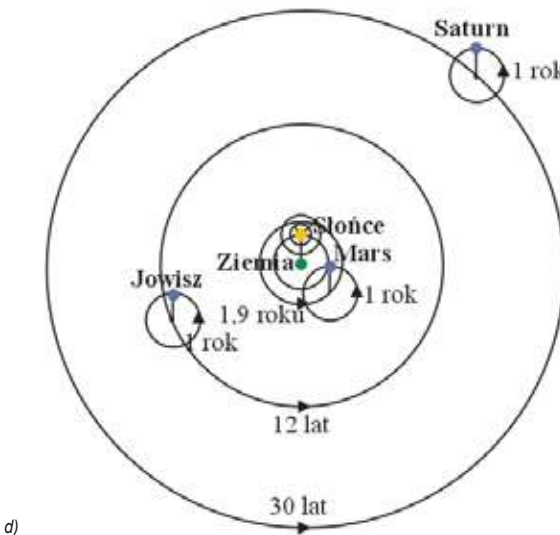
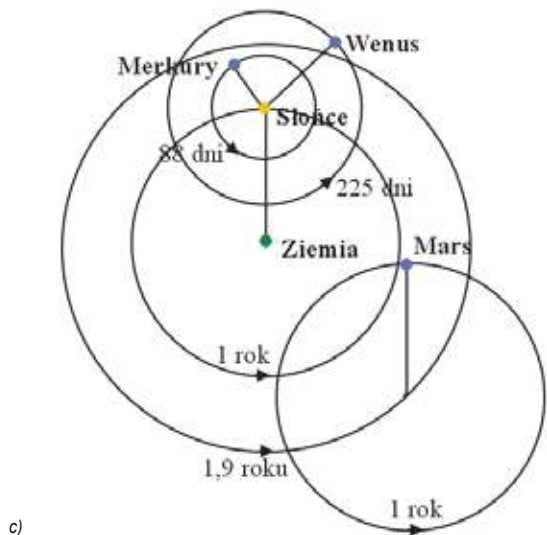
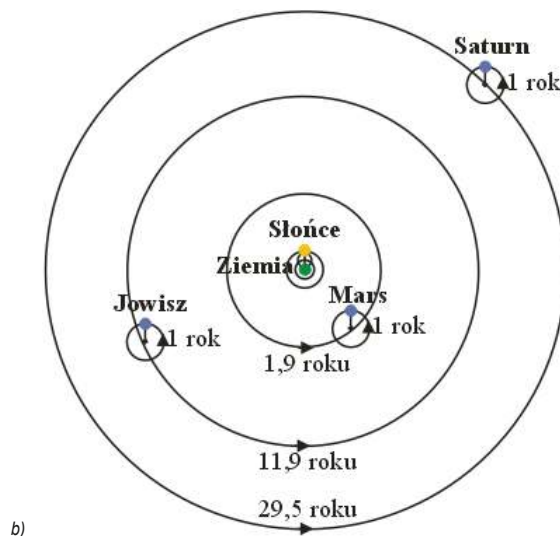
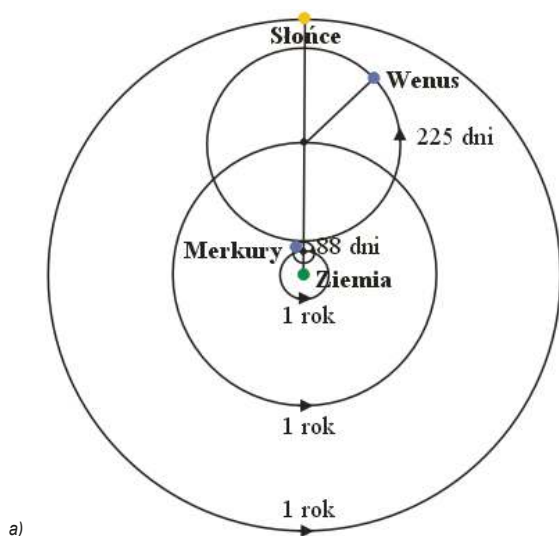
Podobną analizę toru ruchu możemy przeprowadzić dla planet zewnętrznych, lecz w tym przypadku planety poruszałyby się po okręgach o promieniach R_z

$$(x_p - x_0)^2 + (y_p - y_0)^2 = R_z^2$$

A środki tych okręgów poruszałyby się ruchem jednostajnym po okręgach z promieniami R_p i środkach w środku Ziemi

$$x_0^2 + y_0^2 = R_p^2$$

Jak widzimy zarówno ruch Słońca, jak i planet względem Ziemi jest taki, jak opisał Ptolemeusz w swoim modelu. Słońce porusza się wokół Ziemi po okręgu, zaś planety poruszają się złożonym ruchem, który możemy opisać jako ruch jednostajny po okręgu (epicyklu), którego środek porusza się ruchem jednostajnym po większym okręgu (deferencie).



Rysunek 2. System układu Słonecznego Ptolemeusza w układzie związanym z Ziemią (górne rysunki) i system Kopernika (dolne rysunki). Na rysunkach zachowano proporcje rozmiarów orbit zgodnie z oboma systemami. Rysunki (a) i (c) obejmują obszar bliższych planet (do Słońca w przypadku systemu Ptolemeusza i do Ziemi w przypadku systemu Kopernika). Rysunki (b) i (d) są wykonane w skalach pokazujących obszar do Saturna.

W przypadku planet wewnętrznych promieniami deferentów będzie promień orbity Ziemi, a promienie ich epicykli będą promieniami orbit tych planet. Prędkości kątowe w ruchach planet wewnętrznych po deferentach są równe prędkości kątowej obiegu Ziemi wokół Słońca, a prędkości kątowe tych planet w ruchach po epicyklach są równe prędkościom kątowym ich ruchów wokół Słońca. Tak samo było w systemie Ptolemeusza.

Dla planet zewnętrznych opisane związki są odwrotne. Możemy tu dostrzec wyraźnie podobieństwo z modelem Ptolemeusza zarówno co do kształtu torów, jak i okresów obiegu po deferentach i epicyklach. Widzimy też w sposób naturalny, niewytłumaczalny w modelu Ptolemeusza, związek ruchów planet z ruchem rocznym Słońca. Z matematycznego punktu widzenia jedyna różnica pomiędzy oboma systemami polega na różnych wartościach promieni deferentów i epicykli.

Widzimy też zasadniczą różnicę w przypadku planet wewnętrznych w obu systemach. W systemie Ptolemeusza planety wewnętrzne oraz Słońce miały osobne deferenty. W systemie Kopernika, po przesunięciu początku układu współrzędnych do środka Ziemi, obie planety wewnętrzne mają wspólny deferent, który jest jednocześnie orbitą Słońca.

Model Kopernika w układzie związanym z Ziemią pokazują dolne obrazki na rysunku 2. Górne obrazki pokazują ponownie model Ptolemeusza. Tym razem rysunki wykonane są w skalach odpowiednich dla obu systemów i pokazywanego obszaru, więc możemy porównać proporcje deferentów i epicykli w obu systemach – Ptolemeusza (obrazki (a) i (b)) oraz Kopernika (obrazki (c) i (d)).

System Ptolemeusza w układzie związanym ze Słońcem

Teraz zajmijmy się układem Ptolemeusza. Początek układu współrzędnych znajduje się w środku Ziemi, więc współrzędne Ziemi wynoszą

$$x_z = 0, \quad y_z = 0.$$

Słońce porusza się z prędkością kątową ω_S po okręgu o promieniu R_S i środku w środku Ziemi

$$\begin{aligned} x_s(t) &\equiv R_S \cos(\omega_S t + \varphi_S), \\ y_s(t) &\equiv R_S \sin(\omega_S t + \varphi_S). \end{aligned}$$

Planeta P porusza się po epicyklu o promieniu R_E z prędkością kątową ω_E

$$\begin{aligned} x_E(t) &= R_E \cos(\omega_E t + \varphi_E), \\ x_E(t) &= R_E \sin(\omega_E t + \varphi_E). \end{aligned}$$

Środek epicyklu planety porusza się z prędkością kątową ω_D , po deferencie o promieniu R_D i środku w środku Ziemi

$$\begin{aligned} x_D(t) &= R_D \cos(\omega_D t + \varphi_D), \\ x_D(t) &= R_D \sin(\omega_D t + \varphi_D). \end{aligned}$$

Ostatecznie ruch planety względem Ziemi opisują równania:

$$\begin{aligned} x_p(t) &= R_D \cos(\omega_D t + \varphi_D) + R_E \cos(\omega_E t + \varphi_E), \\ y_p(t) &= R_D \sin(\omega_D t + \varphi_D) + R_E \sin(\omega_E t + \varphi_E). \end{aligned}$$

Przesuniemy teraz początek układu współrzędnych do środka Słońca. Aby tego dokonać musimy od współrzędnych planet i Ziemi odjąć współrzędne Słońca. Teraz dla Słońca mamy

$$x_s = 0, \quad y_s = 0.$$

Natomiast Ziemia będzie się poruszać po okręgu o promieniu R_S z prędkością kątową ω_S

$$\begin{aligned} x_z(t) &= -R_S \cos(\omega_S t + \varphi_S), \\ y_z(t) &= -R_S \sin(\omega_S t + \varphi_S). \end{aligned}$$

lub, jeśli zdefiniujemy $\varphi_Z \equiv \varphi_S + \pi$,

$$\begin{aligned} x_z(t) &= -R_S \cos(\omega_S t + \varphi_Z), \\ y_z(t) &= -R_S \sin(\omega_S t + \varphi_Z). \end{aligned}$$

Ruchy planet względem Słońca będą opisane równaniami

$$\begin{aligned} x_p(t) &= R_D \cos(\omega_D t + \varphi_D) + R_E \cos(\omega_E t + \varphi_E) - R_S \cos(\omega_S t + \varphi_S), \\ y_p(t) &= R_D \sin(\omega_D t + \varphi_D) + R_E \sin(\omega_E t + \varphi_E) - R_S \sin(\omega_S t + \varphi_S). \end{aligned}$$

W przypadku planet wewnętrznych przesunięcie fazowe w ruchu po deferencie jest równe przesunięciu fazowemu Słońca $\varphi_D = \varphi_S$, a prędkość kątowa w ruchu po deferencie będzie równa prędkości kątowej Słońca $\omega_D = \omega_S$. Wobec tego dla planet wewnętrznych znajdujemy

$$\begin{aligned} x_p(t) &= R_D \cos(\omega_S t + \varphi_S) + R_E \cos(\omega_E t + \varphi_E) - R_S \cos(\omega_S t + \varphi_S), \\ y_p(t) &= R_D \sin(\omega_S t + \varphi_S) + R_E \sin(\omega_E t + \varphi_E) - R_S \sin(\omega_S t + \varphi_S). \end{aligned}$$

czyli

$$\begin{aligned} x_p(t) &= (R_D - R_S) \cos(\omega_S t + \varphi_S) + R_E \cos(\omega_E t + \varphi_E), \\ y_p(t) &= (R_D - R_S) \sin(\omega_S t + \varphi_S) + R_E \cos(\omega_E t + \varphi_E). \end{aligned}$$

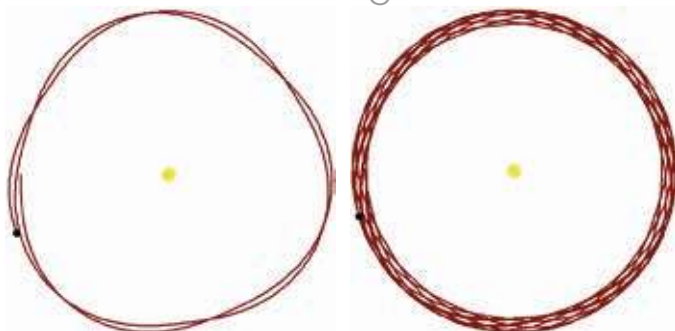
W przypadku planet zewnętrznych przesunięcie fazowe w ruchu po epicyklu φ_E jest równe przesunięciu fazowemu Słońca $\varphi_E = \varphi_S$, a prędkość kątowa w ruchu po epicyklu będzie równa prędkości kątowej Słońca $\omega_E = \omega_S$. Ostatecznie dla planet zewnętrznych dostajemy

$$\begin{aligned} x_p(t) &= R_D \cos(\omega_D t + \varphi_D) + R_E \cos(\omega_S t + \varphi_S) - R_S \cos(\omega_S t + \varphi_S), \\ y_p(t) &= R_D \sin(\omega_D t + \varphi_D) + R_E \sin(\omega_S t + \varphi_S) - R_S \sin(\omega_S t + \varphi_S). \end{aligned}$$

czyli

$$\begin{aligned} x_p(t) &= R_D \cos(\omega_D t + \varphi_D) + (R_E - R_S) \cos(\omega_S t + \varphi_S), \\ y_p(t) &= R_D \sin(\omega_D t + \varphi_D) + (R_E - R_S) \sin(\omega_S t + \varphi_S). \end{aligned}$$

Gdyby dla planet wewnętrznych zachodziła równość $R_D = R_S$, a dla planet zewnętrznych równość $R_E = R_S$, to model Ptolemeusza byłby równoważny modelowi Kopernika. Po przesunięciu początku układu współrzędnych dostalibyśmy kołowe tory planet. Planety wewnętrzne krążyłyby po okręgach o promieniach swoich epicykli, a planety zewnętrzne po okręgach o promieniach swoich deferentów. Ale tak nie jest. Przyjęte przez Ptolemeusza rozmiary deferentów i epicykli nie spełniają powyższych równości. W konsekwencji przesunięcie początku układu współrzędnych do Słońca nie upraszcza torów planet. Nadal dostajemy ruch po deferentach i epicyklach tylko o innych promieniach niż w układzie związanym z Ziemią. W przypadku planet zewnętrznych zmieniają się promienie epicykli z R_E na $|R_E - R_S|$. Zaś w przypadku planet



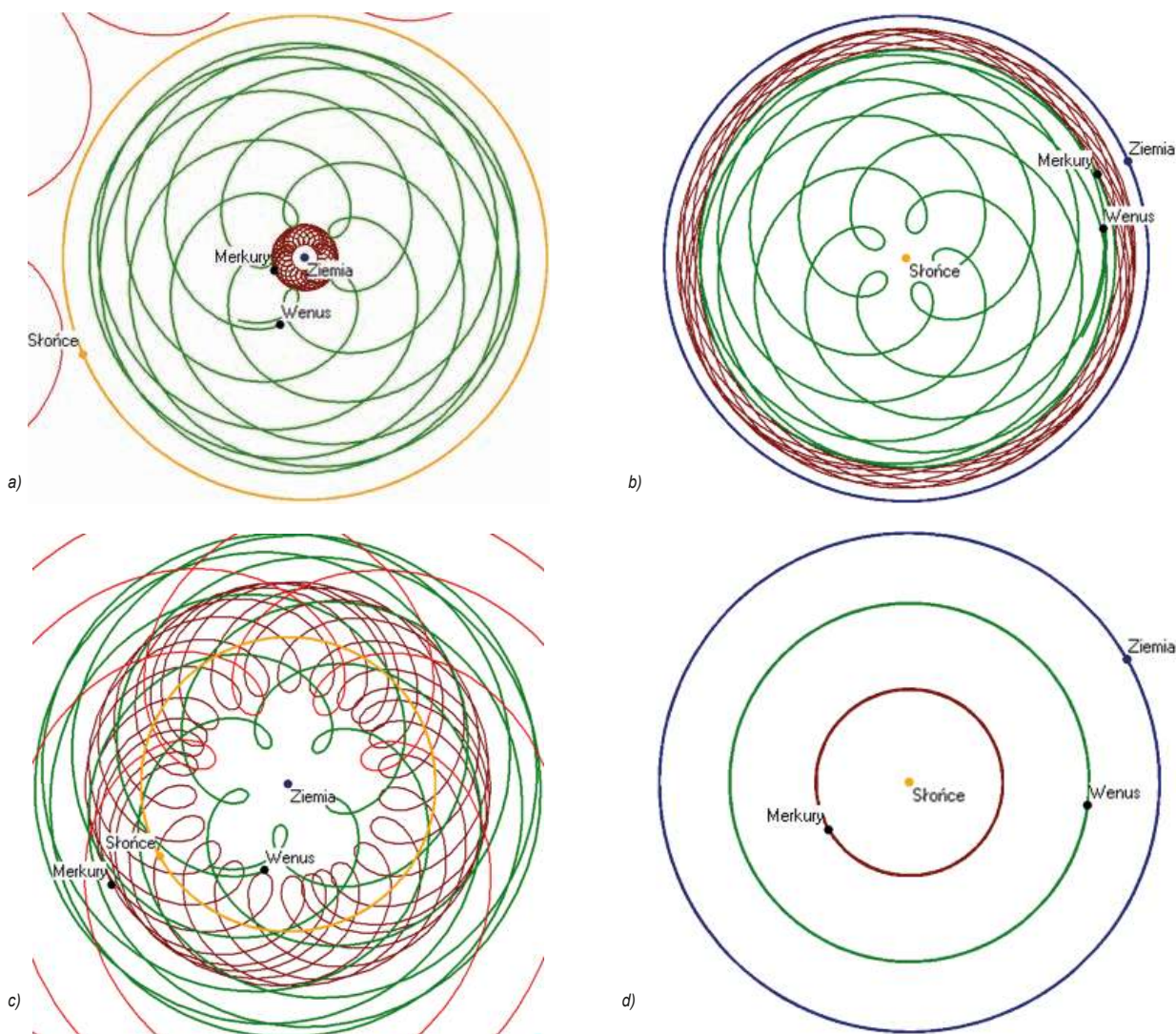
Rysunek 3. Tor Merkurego z systemu Ptolemeusza po przeniesieniu układu odniesienia na Słońce. (a) Po wykonaniu około dwóch obiegów wokół Słońca. (b) Po wykonaniu około dziesięciu obiegów.

wewnętrznych zmieniają się promienie deferentów z R_D na $|R_D - R_S|$.

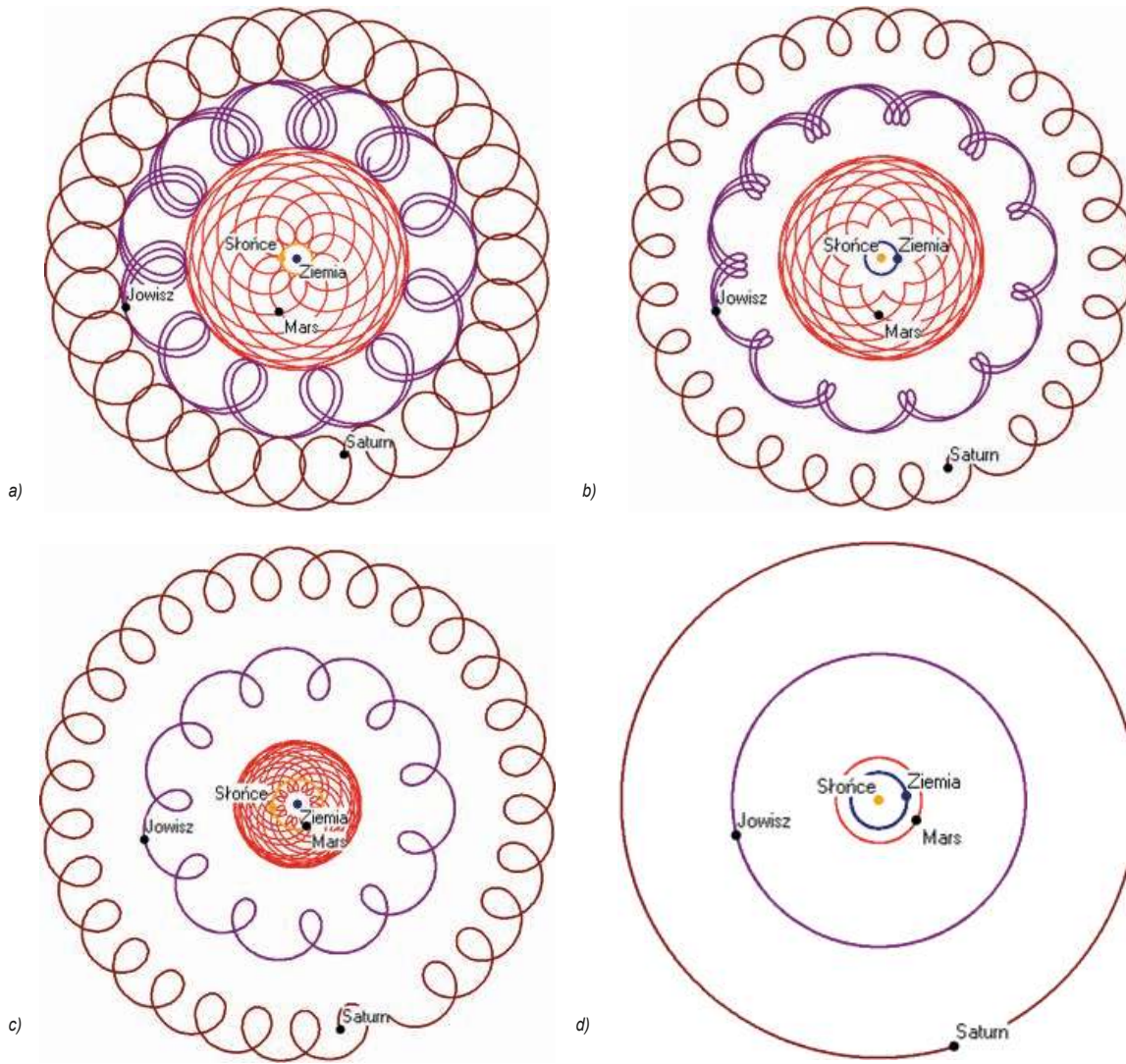
A zatem tory planet nadal będą posiadać charakterystyczne dla systemu Ptolemeusza pętle. Wyjątkiem są tory Merkurego. Jego tory nie mają pętelek i najbardziej przypominają orbity kołowe z systemu Kopernika (patrz rysunek 3). Tyle tylko, że „promień” tej orbity w układzie związanym ze Słońcem nie jest równy promieniowi epicyklu R_E , po jakim porusza się Merkury w układzie związanym z Ziemią, lecz promieniowi nowego deferentu $|R_D - R_S|$. Jest tak

dlatego, że promień nowego deferentu jest ponad 21 razy większy od promienia epicyklu ($|R_D - R_S| = 1095$ promieni Ziemi, a promień epicyklu $R_E = 51$ promieni Ziemi). Dla pozostałych planet jest znacznie gorzej. Ich tory w żaden sposób nie kojarzą się nam z okręgami.

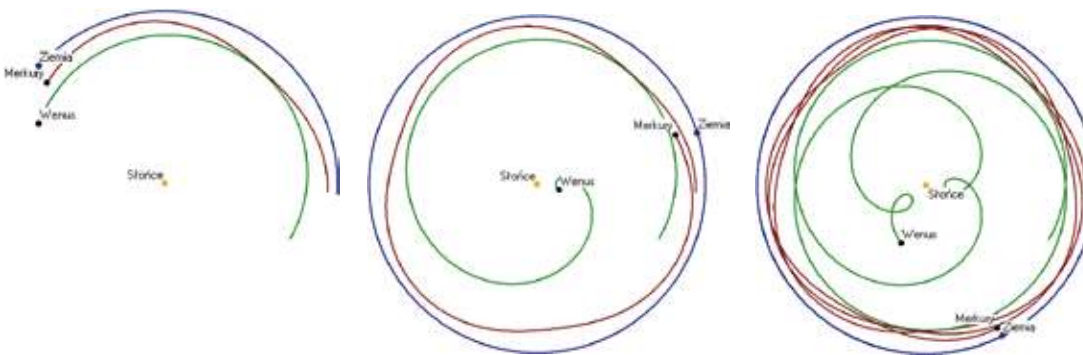
Porównanie torów ciał niebieskich według obu systemów i w obu układach odniesienia, tego związanego z Ziemią i tego związanego ze Słońcem, pokazano na rysunkach 4 i 5. Warto zwrócić uwagę na rysunki 4 (a) i 4 (c). Przedstawiają one tory planet i Słońca w układzie związanym z Ziemią, przy czym obrazek 4 (a) odwzorowuje tory według modelu Ptolemeusza, a rysunek 4 (c) według modelu Kopernika. W modelu Ptolemeusza tory kolejnych obiektów zwierają się w stykających się sferach, tak jak to zakładał system (jeszcze lepiej widać to na rysunku 5 (a)). W modelu Kopernika tory te stanowią płataninę przecinających się krzywych, co budzi obawę, że może dojść do kolizji poruszających się po tych krzywych obiektów. Ale wystarczy spojrzeć na rysunek 2, żeby zrozumieć dlaczego tory się przecinają i dlaczego pomimo tego kolizja jest niemożliwa.



Rysunek 4. Tory planet wewnętrznych (i Słońca lub Ziemi) zakreślone w ciągu około 8 lat. Górne rysunki pokazują tory według systemu Ptolemeusza w układzie związanym z Ziemią (a) i w układzie związanym ze Słońcem (b). Dolne rysunki pokazują tory według systemu Kopernika w układzie związanym z Ziemią (c) i ze Słońcem (d). Kawalki czerwonych linii na rysunkach (a) i (c) są fragmentami toru Marsa.



Rysunek 5. Tory planet zewnętrznych (i Słońca lub Ziemi) zakreślone w ciągu około 29 lat (nieco mniej niż okres obiegu Saturna wokół Ziemi/Słońca w obu systemach). Górne rysunki pokazują tory według systemu Ptolemeusza w układzie związanym z Ziemią (a) i w układzie związanym ze Słońcem (b). Dolne rysunki pokazują tory według systemu Kopernika w układzie związanym z Ziemią (c) i ze Słońcem (d).



Rysunek 6. Tory Merkurego, Wenus i Ziemi według systemu Ptolemeusza w układzie odniesienia związanym ze Słońcem. W tym systemie Merkury i Wenus nigdy nie zachodzą za Słońce.

Na koniec zwróćmy jeszcze uwagę na to, że ze względu na ułożenie Ziemi, planet wewnętrznych i Słońca w systemie Ptolemeusza, żadna z planet wewnętrznych nigdy

nie znajdzie się po przeciwnej stronie Słońca niż Ziemia. Będzie tak nawet wtedy, gdy jako układ odniesienia wybierzemy Słońce (patrz rysunek 6). Wiele osób uważa, że systemy Ptolemeusza i Kopernika są równoważne i różnią się jedynie wyborem układu odniesienia. Jednak jak pokazałem nie jest to prawdą. Ptolemeusz prawidłowo określił okresy obiegu planet po deferentach i epicyklach, ale przyjął złe wartości promieni tych kół. Przy czym nie jest ważne, że źle ocenił bezwzględne wartości tych promieni. Ważne jest, że proporcje pomiędzy nimi były nieprawidłowe.

LITERATURA

- [1] https://www.univie.ac.at/hwastro/books/1515_ptole_ColMed.pdf (dostęp 23.11.2019).
- [2] A.K. Wróblewski, J.A. Zakrzewski, Wstęp do fizyki. tom 1, PWN 1984.
- [3] https://pl.wikipedia.org/wiki/Teoria_geocentryczna (dostęp 23.11.2019).
- [4] E. Rybka: Astronomia ogólna. Warszawa: PWN, 1970.
- [5] A.Murschel, The Structure and function of Ptolemy's physical hypotheses of planetary motion,
- [6] Journal for the History of Astronomy, p.33, <http://articles.adsabs.harvard.edu/full/1995JHA...26...33M/0000033.000.html> (dostęp 23.11.2019).
- [7] Mikołaj Kopernik, *De revolutionibus orbium coelestium*. 1543.
- [8] https://la.wikisource.org/wiki/De_revolutionibus_orbium_coelestium (dostęp 02.12.2019).

Jan Kurzyk

Instytut Fizyki Politechniki Krakowskiej



Loty kosmiczne a teoria względności

Miniatura dydaktyczna

W artykule „Zalagowe loty kosmiczne – za czy przeciw?” (Fizyka w Szkole nr 4/2019) pisałem o ewentualnej możliwości dotarcia kosmonautów do układu gwiazdowego oddalonego od nas o 100 lat świetlnych. Odwoływałem się wówczas do szczególnej teorii względności (STW). Z doświadczeń doradcy metodycznego wiem, że owa teoria przysparza nauczycielom wiele problemów interpretacyjnych. Wprawdzie w Fizyce w Szkole ukazał się na ten temat obszerny cykl artykułów dra Jana Kurzyka, to jednak pozwolę sobie na krótki komentarz odnośnie ew. lotów kosmicznych.

Znane są powszechnie wzory na dylatację czasu i na kontrakcję (skrócenie) odległości. Wiemy też, że owe zjawiska są względne i wzajemnie symetryczne.¹ Symetria zachodzi również pomiędzy dylatacjami czasu a wspomnianymi kontrakcjami: wydłużeniu czasu zmierzonemu w jednym układzie odpowiada ściśle określona kontrakcja długości w drugim.² Ale czy owe efekty relatywistyczne są realne?

Za realnością tych efektów może przemawiać znane i dobrze opisane zjawisko wydłużenia czasu życia mionów, które powstają w atmosferze Ziemi w wyniku oddziaływania z nią promieni kosmicznych. Otóż owe miony wytworzone i obserwowane w układzie laboratoryjnym żyją około 2,2 μ s. W tym czasie, poruszając się z prędkością bliską prędkości światła, mogą przebyć odległość około 600 m. Tymczasem owe miony, które powstają na wysokości 10 km, docierają do powierzchni

Ziemi. Czyżby poruszały się 16 razy szybciej niż światło? Niemożliwe! Jedynym wyjaśnieniem jest to, że w naszym układzie żyją 16-krotnie dłużej. (Ze wzoru na dylatację czasu, wynika, że poruszają się one wówczas z prędkością 0,998 c.) A co stwierdziłyby owe miony, gdyby umiały mierzyć swój czas życia oraz przebytą drogę? Otóż stwierdziłyby, że nadal żyją tylko 2,2 μ s, ale dotarły do Ziemi, bo przebyły nie 10 km, lecz tylko 600 m.

Jakie stąd wynikają wnioski dla ewentualnych podróży kosmicznych?

Otóż, jeżeli poruszające się mezony żyją dłużej względem obserwatora na Ziemi, to i kosmonauci, poruszający się z podobnymi prędkościami, powinni żyć dłużej w naszym układzie odniesienia. Tak więc teoretycznie mogliby dotrzeć niemal dowolnie daleko, gdyż przebyta przez nich (i przez nich zmierzona) droga uległaby odpowiedniej kontrakcji. A jedynym warunkiem jest tu osiągnięcie prędkości porównywalnej z prędkością światła.

Wątpliwości co do wniosków płynących z w/w efektu pojawiają się jednak, gdy przeanalizujemy tzw. paradoksy bliźniąt.

Jak wiemy, paradoks to efekt rozumowania, gdy z pozornie w pełni poprawnych założeń uzyskujemy wnioski wewnętrznie sprzeczne, lub też sprzeczne z obserwowaną rzeczywistością. W tym przypadku z faktu, iż w poruszającej się rakiecie czas biegnie wolniej względem obserwatora zewnętrznego (założenie) wynikałoby, że po ponownym spotkaniu braci, ów brat-

¹ Zgodnie z zasadą względności (zauważoną już przez Galileusza), we wszystkich układach inercjalnych zjawiska przebiegają dokładnie tak samo. Układy te są więc równoprawne i fizycznie nierozróżnialne. Dodam, że układem inercjalnym nazywamy układ, w którym spełniona jest I zasada dynamiki Newtona oraz że każdy układ spoczywający lub poruszający się ruchem jednostajnym prostoliniowym względem danego układu inercjalnego jest też układem inercjalnym.

² Pamiętajmy, że skrócenie to dotyczy odległości mierzonych w kierunku ruchu ciała (cząstki).

-podróżnik powinien być młodszy od bliźniaka, który pozostał na Ziemi (wniosek), Na czym w tym przypadku polega ów paradoks? Otóż, zgodnie z STW, poruszający się w rakiecie bliźniak-kosmonauta, wyda się nam młodszy, bo wg **naszych** zegarów czas w rakiecie będzie biegł wolniej niż w naszym układzie. Ale dokładnie to samo stwierdzi ów bliźniak-kosmonauta odnośnie swego brata na Ziemi, wszak wg obserwatora w rakiecie to Ziemia oddala się od niego z tą samą prędkością, z jaką on oddala się od Ziemi. Który bliźniak ma więc rację? Należy odpowiedzieć, że obaj, bo **w fizyce to jest prawdą, co jest wynikiem poprawnie przeprowadzonego pomiaru**. Tak więc oba wnioski, mimo że są wzajemnie sprzeczne, są prawdziwe.

W powyższej analizie nie uwzględniliśmy jednak faktu, że STW odnosi się **wyłącznie** do układów **inercjalnych**, a bliźniak-kosmonauta, chcąc ponownie spotkać się ze swoim bratem, musi powrócić na Ziemię, a więc przez jakiś czas być w układzie **nieinercjalnym**. Takie jednak przypadki opisuje już nie STW, lecz ogólna teoria względności (OTW).

W teorii tej obowiązuje zasada równoważności sił bezwładności i grawitacji. Z owej teorii wynika również, że w polu grawitacyjnym czas trwania danego zjawiska będzie biegł wolniej i tak, że $\Delta t/t = \Delta V/c^2$, gdzie ΔV to różnica potencjałów grawitacyjnych pomiędzy punktami, w których znajdują się zegary. Jeżeli przyjmiemy $\Delta V = -GM/r$, to: $t_0 = t(1 - GM/rc^2)^{1/2}$, gdzie t_0 – czas własny zegara znajdującego się w odległości r od ciała o masie M w porównaniu z zegarem znajdującym się w nieskończoności (tam, gdzie $V = 0$). Zgodnie jednak z zasadą równoważ-

ności, efekt ten powinien wystąpić również w przypadku sił bezwładności.³ Aby uzyskać odpowiedni wzór, można porównać wartość siły bezwładności działającej na ciało o masie m w ruchu jednostajnym po okręgu z wartością siły dośrodkowej, wywołanej masą centralną M . Wówczas: $mv^2/r = GMm/r^2$. Stąd: $v^2 = GM/r$. Wstawiając to do wzoru na t_0 , otrzymamy: $t_0 = t(1 - v^2/c^2)^{1/2}$. Jak widać, otrzymamy znany z STW wzór na transformację czasu. Z tym, że – w odróżnieniu od efektu opisanego w tej teorii – w tym przypadku dylatacja czasu jest zjawiskiem bezwzględnym i tłumaczy realne wydłużenie czasu trwania danego zjawiska w układach nieinercjalnych.⁴

Czy zatem kosmonauci mogą dotrzeć dowolnie daleko? Odpowiedź: **teoretycznie** – tak. Dodam jednak, że rozpędzenie statku kosmicznego do prędkości bliskiej prędkości światła wymagałoby kolosalnej ilości paliwa, gdyż w miarę wzrostu prędkości rośnie bezwładność rakiety w kierunku ruchu. Nic więc dziwnego, że prof. Janusz Gil swój artykuł o teorii względności i podróżach międzygwiazdowych kończył słowami:⁵ „Nawet gdyby [rozpędzenie statku do tak dużej prędkości] było technicznie możliwe, to jednak oznaczałoby kosmiczne marnotrawstwo energii. Myślę, że żadna inteligentna cywilizacja na takie marnotrawstwo by sobie nie pozwoliła.” I dodaje: „... podróże kosmiczne są absurdalne z punktu widzenia energetycznego, bezsensowne i niemożliwe do wykonania.”⁶ Z czym się w pełni zgadzam.

Waldemar Reńda
Olkuś

³ Efekt ten jest uwzględniany w działaniu GPS.

⁴ Układem nieinercjalnym jest każdy układ, który porusza się ruchem zmiennym względem dowolnego układu inercjalnego.

⁵ J. Gil, *O teorii względności, paradoksy bliźniąt i podróżach międzygwiazdowych*, Fizyka w Szkole, nr 5/1995 r.

⁶ Choćby dlatego, że nie mamy (i mieć nie będziemy) odpowiedniego paliwa zapewniającego prędkość wylotową spalin porównywalną z prędkością światła (zob. wzór Ciołkowskiego). Teoretycznie mogłaby to być jedynie antymateria. Ale skąd wziąć jej tyle, jak ją utrzymać w izolacji od materii zwykłej i jak miałby wyglądać ów silnik napędzany tego typu materia?

I. PRENUMERATĘ NA 2020 ROK MOŻNA ZAMÓWIĆ BEZPOŚREDNIO U WYDAWCY

- **Przez internet:** zakładka *Prenumerata 2020* na stronie www.aspress.com.pl i wypełniając formularz zamówienia na podstronie prenumeraty
- **e-mailem:** szewczyk24@gmail.com ■ **telefonicznie:** 606 201 244 ■ **listownie:** Agencja AS Józef Szewczyk, ul. Warchałowskiego 2/58, 02-776 Warszawa

Cena prenumeraty w 2020 roku

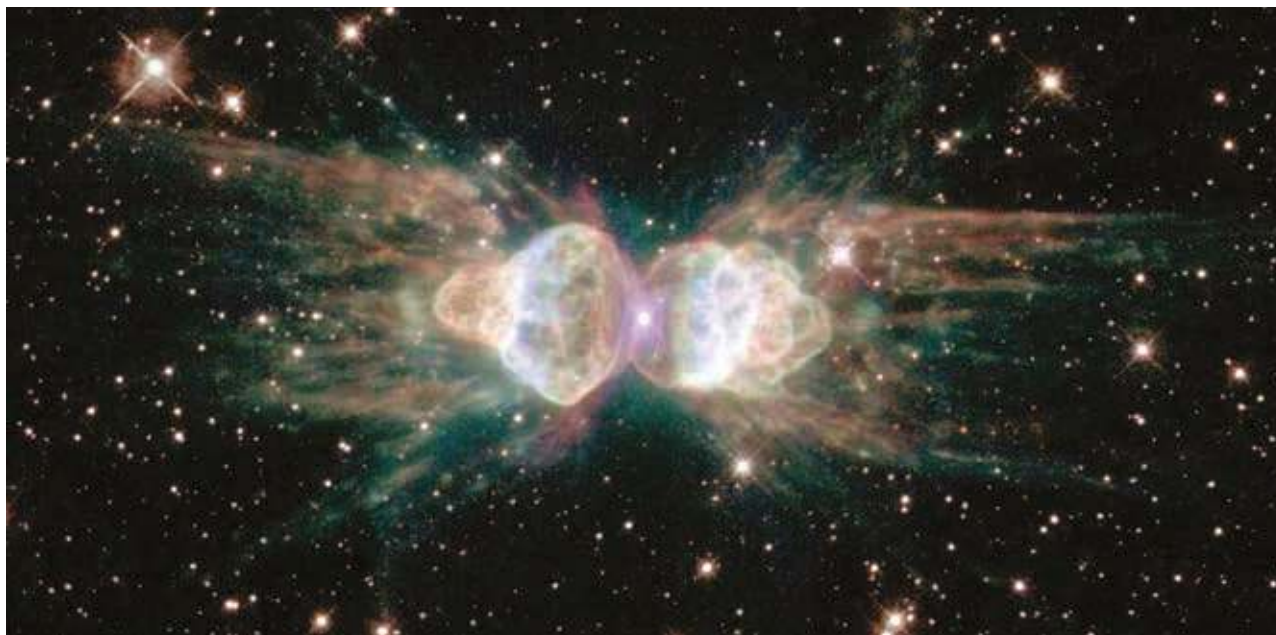
Tytuł	Liczba wydań (I i II półrocze)	Cena egzemplarzowa	Cena prenumeraty rocznej	Cena prenumeraty w II półroczu
Dwumiesięczniki				
Chemia w Szkole	6 (3+3)	27,50	165,00	82,50
Geografia w Szkole	6 (3+3)	27,50	165,00	82,50
Fizyka w Szkole z Astronomią	6 (3+3)	30,00	180,00	90,00
Wiadomości Historyczne z WOS	6 (3+3)	30,00	180,00	90,00

Zamów prenumeratę przez Internet
www.aspress.com.pl/prenumerata-2020/

II. PRENUMERATA DOSTARCZANA PRZEZ FIRMY KOLPORTERSKIE:

1. **RUCH** – zamówienia na prenumeratę w wersji papierowej i na e-wydania można składać bezpośrednio na stronie www.prenumerata.ruch.com.pl. Ewentualne pytania prosimy kierować na adres e-mail: prenumerata@ruch.com.pl lub kontaktując się z Centrum Obsługi Klienta „RUCH” pod numerami: 22 693 70 00 lub 801 800 803 – czynne w dni robocze w godzinach 7.00–17.00. Koszt połączenia wg taryfy operatora.
 2. **GARMOND PRESS** – tel. 22 836 69 21 prenumerata.warszawa@garmondpress.pl.
 3. **KOLPORTER S.A.** – prenumeratę instytucjonalną można zamawiać w oddziałach firmy. Informacje: www.kolporter.com.pl.
 4. **POCZTA POLSKA** – zamówienia we wszystkich urzędach pocztowych lub u listonoszy, drogą elektroniczną: www.poczta-polska.pl. Infolinia w godz. 8.00–22.00: 801 333 444 (dla telefonów stacjonarnych) i 801 333 444 (dla telefonów komórkowych i z zagranicy).
- III. **NUMERY ARCHIWALNE DRUKOWANE** dostępne są w ograniczonym zakresie. Przed złożeniem zamówienia prosimy o kontakt pod adresem: szewczyk24@gmail.com.

Konstrukcyjne wyjaśnienie nadświetlnych dżetów w kwazarach



Grzegorz M. Koczan¹

Sensacyjne doniesienia włoskich naukowców z 2012 roku o rzekomym² nieznacznym przekroczeniu prędkości światła przez neutrino to zaledwie aperitif względem spaghetti, czy nawet pieczeni rzymskiej jaką oferują kwazary. Otóż obserwacje dżetów kwazarów dostarczają wyniki, w których w czasie 1 roku obserwacji dżety przebywają na sferze niebieskiej drogę rzędu 10-30 lat świetlnych. Jakże takiego zjawiska nie nazwać nadświetlnymi prędkościami dochodzącymi do 30 c?

Uchylając rąbka tajemnicy trzeba powiedzieć o pozorności tych prędkości nadświetlnych. Jednak w przeciwieństwie do innych zjawisk mogących symulować nadświetlny ruch w zespołach ciał (w szczelinach, w fazach fal lub w refleksach czy cieniach) w kwazarach mamy do czynienia z pozorną obserwacją ruchu nadświetlnego tylko jednego ciała jakim jest dżet. Ponadto okazuje się, że horyzontalne prędkości nadświetlne mogą być, przy pewnym założeniu, interpretowane jako obserwowalne odpowiadające czteroprędkości.

Artykuł szybko i prosto wyjaśnia fenomen zjawiska nadświetlności na poziomie jakościowym i ilościowym. Nie poprzestając na tym autor konstruuje wektory pozornych prędkości nadświetlnych w oparciu o twierdzenie Talesa lub w analogii do konstrukcji obrazu w soczewce. To ujęcie geometryczne uświadamia, że jeżeli składowe horyzontalne pozornych prędkości dochodzą do 30 c to wartości tych wektorów mogą wynosić nawet ponad

400 c. W takiej sytuacji następuje pozorne wyjaśnienie dżetu przeciętnie około 25 000 razy. Warto dodać, że rzeczywista prędkość takich ekstremalnych dżetów jest większa niż 0.9994 c, ale jest jednak mniejsza niż c.

Wstęp

We współczesnej fizyce dominuje pogląd, że prędkość światła w próżni c jest największą możliwą prędkością w przyrodzie. Są prowadzone spory czy wynika to jednoznacznie ze szczególnej teorii względności (STW) Einsteina czy jednak teoria ta dopuszcza prędkości nadświetlne. Uważam zasadniczo, że teoria względności w ramach pojęć przyczynowości jest sprzeczna z nadświetlnymi punktowymi cząstkami (tachionami). Nie wyklucza to jednak nadświetlnych prędkości cienia, nadświetlnej prędkości fazy fali czy też pozornej prędkości obserwacji obiektu.

Co więcej – zagadnienia prędkości nadświetlnych mają niewiele wspólnego z teorią względności – w sensie natury efektu, a nie w sensie pozornej sprzeczności z tą teorią. Może właśnie dlatego oba fenomeny mogą istnieć w jednej rzeczywistości fizycznej. Warto jednak jasno stwierdzić, że do zrozumienia tego artykułu nie jest istotnie potrzebna żadna znajomość teorii względności (nie dotyczy relatywistycznego efektu Dopplera i prawa składania prędkości). Dlatego opis efektów retardacyjnych jest tutaj, żartobliwie nazywany, relatywistyką dla ubogich (RDU).

Zainspirowałem się artykułem Sokołowskiego w „Fotonie” o prędkościach nadświetlnych [12]. Zawarte w nim in-

¹ gkoczan@fuw.edu.pl, SGGW.

² Włoski eksperyment OPERA z 2012 początkowo potwierdzał tylko mniej głośno wyniki amerykańskiego eksperymentu MINOS z 2007, ale ostatecznie naukowcy znaleźli błąd i wycofali się z doniesień o nadświetlności neutrino.

formacje o nadświetlnych dżetach były dla mnie nowością i zaskoczeniem. Zapewne wynikało to z faktu, że o prędkościach nadświetlnych fizycy raczej głośno nie mówią, bojąc się posądzenia o bluźnierstwo. W każdym razie po dwukrotnym przeczytaniu artykułu Sokołowskiego odnosiłem błędne wrażenie, że efekt nadświetlności jest wynikiem przybliżeń wzorów, a nie efektem fizycznym. Wobec tego postanowiłem wyjaśnić efekt bardziej przejrzysto, a nie tylko w kategoriach efektu geometrycznego i wzorów (przybliżonych), ale przede wszystkim w ramach efektu retardacji światła.

Następnie poszukiwałem wizualizacji konstrukcyjnej wektorów prędkości rzeczywistej oraz pozornej dżetu w odniesieniu do wektora prędkości światła. Znalezienie praktycznej dla obliczeń konstrukcji było już dostatecznym przyczynkiem oryginalności do napisania tego artykułu. Na zakończenie zaś został przeanalizowany niezwykle silny efekt pojaśnienia.

Skrócenie retardacyjne czasu

Najpierw dla uproszczenia i zrozumienia istoty zagadnienia rozważmy ciało niebieskie, które porusza się z dużą prędkością $0 < v < c$ zwróconą dokładnie w naszą stronę Rys. 1.

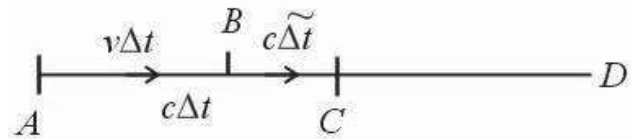
Ciało świeci w sposób ciągły, więc możemy go obserwować. W ciągu przedziału czasu o długości Δt ciało przebywa drogę $v\Delta t$. Okazuje się, że światło docierające do nas z pewnym opóźnieniem podczas obserwacji tego fragmentu ruchu przybywa do nas w ciągu krótszego czasu $\Delta \tilde{t} < \Delta t$ względem odstęp czasu wysłania światła. Przyczyna tego efektu jest prosta i polega na tym, że światło z początku obserwowanego odcinka ruchu musiało przebyć dłuższą o $v\Delta t$ drogę. Zatem początek obserwacji opóźnił się ekstra o $v\Delta t/c$, więc czas obserwacji się zmniejszył:

$$\Delta \tilde{t} = \Delta t - \frac{v\Delta t}{c} < \Delta t \quad (1)$$

Mimo, że efekt jest wynikiem retardacji (opóźnienia) światła, to w przypadku zbliżania obiektu jest on w istocie skróceniem odcinka czasu. Dlatego jest on tutaj nazywany skróceniem retardacyjnym czasu. Oczywiście dla oddalającego się ciała niebieskiego występowałyby wydłużenie retardacyjne czasu. Ani retardacji, ani tym bardziej skrócenia retardacyjnego, a nawet wydłużenia retardacyjnego nie należy kojarzyć z relatywistyczną dylatacją czasu. Skrócenie retardacyjne czasu jest prostym efektem kinetycznym, który jest odpowiedzialny za pozorne prędkości nadświetlne. Można powiedzieć, że wzór (1) wyraża istotę całego artykułu. Mimo to warto wprowadzić pewne dodatkowe oznaczenia, które ułatwią dalej wyznaczanie prędkości pozornych. Głównym pomocnikiem będzie czynnik dżeta ζ nazwany tutaj od greckiej litery dżeta i nawiązujący do słowa dżet:

$$\zeta = \frac{\Delta t}{\Delta \tilde{t}} = \frac{1}{1 - v/c} = \frac{c}{c - v} > 1 \quad (2)$$

Jest to bezwymiarowy czynnik, który mówi ile razy skrócenie retardacyjne zmniejszyło czas obserwacji.



Rys. 1. Ciało niebieskie poruszające z prędkością v przebywa w czasie Δt odcinek AB . Podczas ruchu ciało nieustannie wysyła światło w kierunku dalekiego obserwatora D . W czasie ruchu ciała światło wysłane z punktu A dociera do punktu C . Światło wysłane z punktu B dociera zaś do punktu C z opóźnieniem czasu $\Delta \tilde{t}$ równym czasowi potrzebnemu światłu na przebycie odcinka BC . Jednocześnie czas $\Delta \tilde{t}$ jest krótszy od czasu Δt o czas w jakim światło przebywałoby odcinek AB . To skrócenie odcinka czasu obserwacji ciała nazwane jest w tym artykule skróceniem retardacyjnym czasu. Na dalszej drodze CD światła skrócenie odcinka czasu obserwacji nie ulega już dalszym zmianom, a jedynie opóźnia się w czasie.

W tym miejscu celowo została wprowadzona pewna analogia z czynnikiem gamma Lorentza $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$ znanym z teorii względności (STW). Czynnik dżeta ζ jest prostszy od czynnika gamma γ , ale mówiąc brzydko wielu uczniów stojących na bakier z pierwiastkiem tak by go mogło błędnie obliczyć, że czynniki zostałyby utożsamione. Ten ryzykowny komentarz ma służyć lepszemu zapamiętaniu czynnika dżeta, skoro błędy utrwalają się rzekomo lepiej od zabiegów poprawnych. Ponadto używanie czynnika dżeta w takim kontekście może być też usprawiedliwieniem określenia relatywistyka dla ubogich (RDU)³, które można odnieść do wzoru (2).

Skrócenie retardacyjne jako efekt Dopplera

Skoro skrócenie retardacyjne czasu poszło jak po maśle to można teraz trochę pokomplikować. Dla lepiej znających fizykę będzie to potwierdzenie drugą metodą skrócenia retardacyjnego. Zaś dla innych może będzie to zapoznanie z samym efektem Dopplera. Najbardziej zagubieni mogą pominąć tę i następną sekcję bez straty dla zrozumienia artykułu. Tym bardziej, że w zasadzie nierelatywistyczne ujęcie RDU jest trochę na bakier z teorią względności. Skolei ujęcie relatywistyczne jest nieco trudniejsze i generalnie miało go nie być, ale nie do końca ten cel się udał (psss).

Efekt Dopplera polega na zmianie częstotliwości odbierania fali w wyniku ruchu źródła lub obserwatora. Potraktujmy długość przedziału czasu ruchu Δt jako okres fali źródłowej. Częstotliwość jest odwrotnością okresu. Faktem jest, że źródło porusza się z prędkością v , a fala świetlna z prędkością c . W takim przypadku można zastosować wzór z aktualnej karty wzorów KE, w którym występuje prędkość źródła w mianowniku⁴:

$$\frac{1}{\Delta \tilde{t}} = \frac{c}{c - v} \cdot \frac{1}{\Delta t} = \frac{1}{1 - v/c} \cdot \frac{1}{\Delta t} \quad (3)$$

Co można zapisać za pomocą czynnika dżeta:

$$\Delta \tilde{t} = \Delta t / \zeta \quad (4)$$

Warto tutaj zrobić komentarz, że wzór KE w zasadzie dotyczy fali dźwiękowej, a nie świetlnej, na którą jest nieco inny wzór relatywistyczny. Mamy tutaj jednak pewien

³ Wbrew tej skromnej nazwie czynnik dżeta jest znacznie większy od czynnika gamma ($\zeta \gg \gamma$ dla $v > 0$).

⁴ W poprzedniej edycji karty wzorów KE (przed rokiem 2015) zawarty był ogólniejszy wzór uwzględniający również prędkość obserwatora w liczniku.

korzystny układ. Otóż mimo ruchu źródła światła, światło porusza ze stałą prędkością c podobnie do dźwięku poruszającego się w jakimś ośrodku. W ten sposób działa tutaj wzór CKE na efekt Dopplera dla ruchu źródła. W przypadku rozpatrywania wzoru na efekt Dopplera z ruchem obserwatora taka analogia dźwięk-swiatło by nie wystąpiła. Ponadto drugim korzystnym elementem wpływającym na ścisłość wzoru (3) jest brak transformacji czasu do układu źródła i transformacji odwrotnej spowrotem, które i tak by się skasowały. Można powiedzieć, że dla nierelatywistów (albo ubogich relatywistów RDU) problem nie istnieje, a wyjaśnienie dla relatywistów STW znajduje się poniżej.

Użycie relatywistycznego efektu Dopplera

Można pominąć czytanie tej sekcji bez straty dla zrozumienia artykułu – a być może nawet z korzyścią dla tego zrozumienia. Wzór na relatywistyczny efekt Dopplera różni się od wzoru (3) czynnikiem gamma:

$$\frac{1}{\Delta \tilde{t}} = \frac{1}{\gamma(1-v/c)} \cdot \frac{1}{\Delta t'} \quad (5)$$

Jednak we wzorze tym zamiast czasu Δt ruchu ciała występuje czas $\Delta t'$ mierzony w układzie ciała. Zgodnie z relatywistyczną dylatacją czasu ten pierwszy czas jest dłuższy $\Delta t = \gamma \Delta t'$. Dzięki temu równanie (5) przechodzi w równanie (3). Zestawny kluczowe wzory w zwartej postaci:

$$\Delta \tilde{t} = \gamma \Delta t' / \zeta \quad , \quad \Delta t = \gamma \Delta t' \quad , \quad \Delta \tilde{t} = \Delta t / \zeta \quad (6)$$

Relacje te konstytuują wprowadzenie osobnego terminu skrócenia retardacyjnego czasu (4) względem relatywistycznego efektu Dopplera. Innymi słowy są to nieco inne nie-żadne efekty, które w obrazie nierelatywistycznym RDU mogły uchodzić za zupełnie ten sam efekt (1) lub (3). Dla dalszych zastosowań wprowadźmy jeszcze explicite relatywistyczny czynnik Dopplera skalujący częstotliwość w (5):

$$D = \frac{1}{\gamma(1-v/c)} = \frac{\zeta}{\gamma} \approx \zeta \quad (7)$$

Ostatnie przybliżenie pokazuje, że poprawka relatywistyczna gamma na czynnik Dopplera jest niewielka w porównaniu do efektu nierelatywistycznego. Warto dodać, że inspirujący artykuł Sokołowskiego [12], nie odnosił się ani do efektu Dopplera, ani bezpośrednio do żadnego efektu z czasem. Natomiast Kurzyk w Fizyce w Szkole z Astronomią [9, 10] rozważa wiele efektów z czasem (efekt Dopplera, dylatację czasu, odbieranie sygnałów). Ostatni z nich jest efektem zbliżonym lub tożsamym ze skróceniem retardacyjnym czasu. Jednakże brak wyodrębnienia nazwy tego zjawiska u Kurzyka utrudnia jego zrozumienie oraz identyfikację przez czytelnika – niezależnie od tego, że artykuły [9, 10] nie odnosiły się do obserwacji dżetów w kwazarach.

Radialna prędkość pozorną

Skrócenie retardacyjne czasu jest przyczyną występowania prędkości pozornej:

$$\tilde{v} = \frac{\Delta s}{\Delta \tilde{t}} = \frac{\Delta s}{\Delta t / \zeta} = \zeta v = \frac{cv}{c-v} \quad (8)$$

Zatem ta prędkość pozorną jest dzęta ζ razy większa od prędkości rzeczywistej. Zobaczmy na kilku przykładach jak działa tyldowanie, czyli przeliczanie na prędkość pozorną:

$$\widetilde{c/2} = c \quad , \quad \widetilde{3c/4} = 3c \quad , \quad \widetilde{c} = \infty \quad (9)$$

Użycie symbolu tyldy nawiązuje do falowego dopplerowskiego rodowodu skrócenia retardacyjnego czasu, a z drugiej strony jest połową symbolu nieskończoności.

Wzory (8) i (2) na razie dotyczą tylko kierunku radialnego, ale bez problemu będą uogólnione na dowolne składowe oraz cały wektor prędkości. W przypadku dżetów raczej nie obserwuje się tych składowych radialnych, ale przede wszystkim składowe horyzontalne, szczególnie w kontekście nadświetlności. Jednak dla potrzeb konstrukcyjnych warto rozpocząć od najprostszego ruchu w jednym wymiarze radialnym. Zaczniemy od określenia proporcji wynikającej z równania (8):

$$\frac{v}{\tilde{v}} = \frac{c-v}{c} = 1 - \frac{v}{c} \quad (10)$$

Co można zapisać w formie pewnego rozkładu jedynek⁵:

$$\frac{v}{c} + \frac{v}{\tilde{v}} = 1 \quad (11)$$

Każdy rozkład jedynki na sumę liczb dodatnich musi przypominać sumę udziałów dwóch części podzielonego odcinka o długości $a+b$:

$$\frac{a}{a+b} + \frac{b}{a+b} = 1 \quad (12)$$

Możemy zatem konstruować dwie proporcje zawarte w (11) w odniesieniu do proporcji podzielonego odcinka HK jak na Rys. 2. Ponieważ proporcje w (11) mają równy odcinek w liczniku, a proporcje w (12) w mianowniku, to dwie drabinki konstrukcji Talesa ($HEKFG$ i $KEHFL$) będą ustawione przeciwnie, ale będą miały wspólny szczybel v (EF) oraz wspólne ramię $a+b$ (KEH).

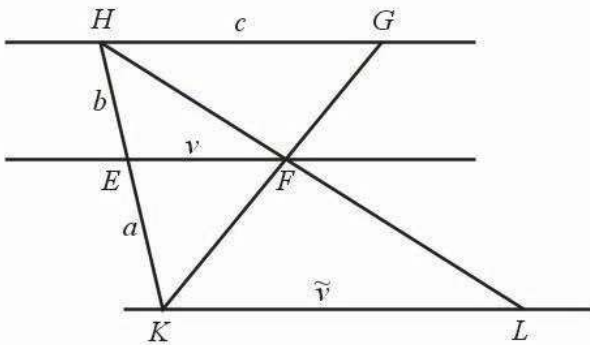
$$\frac{v}{c} = \frac{a}{a+b} \quad , \quad \frac{v}{\tilde{v}} = \frac{b}{a+b} \quad (13)$$

Proporcje te są realizowane przez konstrukcje prędkości pozornej pokazanej na Rys. 2.

Horyzontalna składowa prędkości pozornej i wektor prędkości pozornej

Musimy teraz uogólnić wzory odnoszące się do Rys. 1 na sytuację z Rys. 4, w której prędkość dżetu v skierowana jest pod kątem α do kierunku obserwacji ciała niebieskiego. Okazuje się, że jest to bardzo proste i wystarczy zamienić kluczowe wartości na składowe radialne (podłużne):

⁵ Zauważmy, że równanie (10) ma postać równoważną matematycznie z równaniem soczewki $1/x+1/y=1/f$, więc konstrukcja przedstawiona w artykule może być zastosowana również w optyce. Można też postąpić odwrotnie i wykorzystać konstrukcje optyczną do dżetów (patrz dalej).



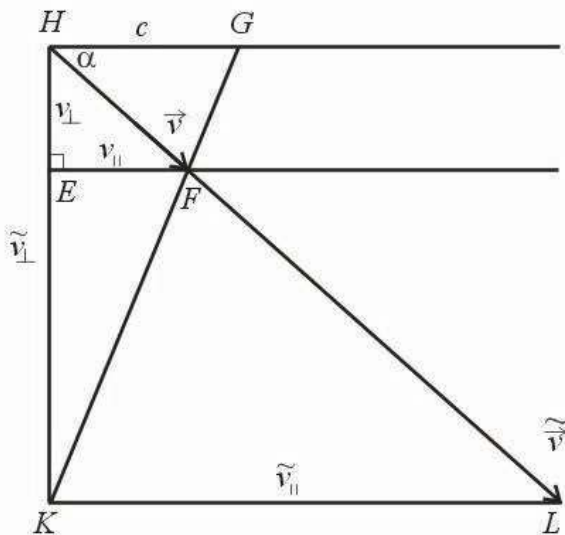
Rys. 2. Na jednej z dwóch prostych równoległych odkładamy odpowiednio odcinek o długości prędkości światła c oraz końcach G i H , a na drugiej odcinek o długości prędkości v ciała niebieskiego o końcach E i F . Końce tych odcinków tworzą trapez $EFGH$, którego przedłużone ramiona przecinają się w punkcie K . Z punktu K rysujemy trzecią prostą równoległą do dwóch dotychczasowych. Rozważmy teraz przedłużenie przekątnej HF trapezu, aż do przecięcia z trzecią prostą równoległą w punkcie L . W ten sposób skonstruowany odcinek KL ma długość radialnej prędkości pozornej \tilde{v}

$$\zeta_{||} = \frac{1}{1 - v_{||}/c}, \quad v_{||} = v \cos \alpha \quad (14)$$

Procesowi upodłużnienia podlega także czynnik Dopplera (7), ale bez upodłużniania czynnika Lorentza γ . Zatem skrócenie retardacyjne czasu podlega teraz podłużnemu czynnikowi dżeta. Oznacza to, że cały wektor prędkości ulega pozornemu zwiększeniu o ten podłużny czynnik dżeta:

$$\tilde{v}_{||} = \zeta_{||} v_{||}, \quad \tilde{v}_{\perp} = \zeta_{||} v_{\perp} = \zeta_{||} v \sin \alpha \quad (15)$$

Łatwo się przekonać, że pierwszy z tych wzorów po rozpisaniu ma taką samą strukturę jak równanie (11), więc można zapisać go analogicznie do (13). Innymi słowy konstrukcja składowej podłużnej prędkości pozornej (Rys. 3) przebiega tak samo jak konstrukcja radialnej



Rys. 3. Konstrukcja wektora prędkości pozornej różni się od przypadku radialnego (Rys. 2) w zasadzie tylko dwoma szczegółami. Po pierwsze trapez $EFGH$ musi być teraz prostokątny od strony ramienia EH . Po drugie wektor prędkości odpowiada teraz odcinkowi HF , zaś EF stanowi tylko jego składową radialną (równoległą). Odcinek HL pokrywa się z wektorem prędkości pozornej, a odcinek HK stanowi jego obserwowaną horyzontalną (prostokątną) składową, która jak na tym rysunku może być nadświetlna.

prędkości pozornej. Aby udało się za jednym zamachem skonstruować poprzeczną prędkość pozorną wystarczy zapewnić, aby odcinek HE na Rys. 3 odpowiadał składowej poprzecznej prędkości. Oznacza to, że odcinek musi mieć odpowiednią długość oraz, że kąt HEF musi być prosty. Poprawność tej łatwej łącznej konstrukcji obu składowych bazuje na jednokładnym charakterze wspomnianych już drabinek Talesa. Chodzi o to, że ramiona tych drabinek skalują się tak samo jak ich szczeble.

Teraz zobaczymy, że nasza konstrukcja nie jest tylko sztuką dla sztuki, ale umożliwi ona szybkie rozwiązanie problemów optymalizacyjnych bez stosowania rachunku różniczkowego (pochodnych). Przykładowo, aby uzyskać maksymalną składową horyzontalną prędkości pozornej dla danej prędkości ciała wystarczy, aby odcinek HF był wysokością trójkąta KGH . Sytuacja ta odpowiada warunkowi kątowemu $\cos \alpha = v/c$. Można też odwrotnie w takiej sytuacji wyznaczyć minimalną wartość prędkości ciała potrzebną do obserwacji danej nadświetlnej składowej horyzontalnej:

$$v_{\min} = \frac{c \tilde{v}_{\perp}}{\sqrt{c^2 + \tilde{v}_{\perp}^2}} \quad (16)$$

Ciekawą interpretację ma zależność odwrotna:

$$\tilde{v}_{\perp} = \frac{v_{\min}}{\sqrt{1 - v_{\min}^2/c^2}} = \gamma(v_{\min}) \cdot v_{\min} = u(v_{\min}) \quad (17)$$

gdzie występuje czynnik Lorentza, który zależy od prędkości minimalnej podobnie jak tzw. czteroprędkość u . Zatem udało się znaleźć bardzo ładną interpretację dla obserwabli horyzontalnej prędkości nadświetlnej. Obserwabla ta może być traktowana jako czteroprędkość dla możliwie minimalnej szybkości obserwowanego ciała. Czteroprędkość jest to odpowiednio przeskalowana prędkość stosowana w STW, która nie podlega ograniczeniu do prędkości światła. Można zatem powiedzieć, że pozorna prędkość nadświetlna została zastąpiona rzeczywistą czteroprędkością. W każdym razie tak by to wyglądało w opisie STW.

Jeżeli natomiast interesowałaby nas możliwa minimalna⁶ wartość prędkości pozornej (przy ustalonej pozornej składowej horyzontalnej) to odcinek HF powinien dążyć do c . Wykorzystanie trójkątów równoramiennego i prostokątnego prowadzi do wzoru:

$$\tilde{v}_{\min} = \frac{\tilde{v}_{\perp}^2 + c^2}{2c} \quad (18)$$

Wzory (16) i (18) dotyczą innego przypadku geometrycznego, więc nie opisują tego samego minimum w innych zmiennych. Jednak minimum wartości wektora prędkości pozornej implikuje również minimum składowej radialnej tego wektora, a więc także minimum czynnika dżeta:

$$\zeta_{||\min} = \frac{\tilde{v}_{\min}}{c} = \frac{\tilde{v}_{\perp}^2 + c^2}{2c^2} \quad (19)$$

⁶ Ścisłe ta wartość jest infimum zbioru, a nie minimum, gdyż nie należy ona do tego zbioru.

Minimum (ściśle infimum) wartości wektora prędkości pozornej oraz czynnika dżeta odpowiada maksimum kąta (supremum):

$$\sin \alpha_{\max} = \frac{2c\tilde{v}_{\perp}}{\tilde{v}_{\perp}^2 + c^2} \quad (20)$$

Ten graniczny kąt będzie jeszcze potrzebny dalej do zbadania najmniejszej wartości pojaśnienia dżetów.

Promieniowanie kwazarów i czarnych dziur

Natura kinematyczna zjawiska nadświetlności dżetów została już dostatecznie wyjaśniona matematycznie, fizycznie oraz geometrycznie. Pora zatem, aby powiedzieć coś więcej o kwazarach będących źródłem tego niezwykłego efektu.

Pozornie nadświetlne strugi dżetów wydobywają się z obiektów zwanych kwazarami. Można powiedzieć, że kwazary to najmocniejsze, najodleglejsze oraz najszybsze obiekty w obserwowalnym Wszechświecie. Są one odkrywane na peryferiach obserwowanego Wszechświata, więc pochodzą z początków Wszechświata z powodu retardacji (opóźnienia) sygnału elektromagnetycznego nawet o 13 miliardów lat. W tym sensie można powiedzieć z jednej strony, że są to obiekty najstarsze, a z drugiej, że najmłodsze we Wszechświecie. Zatrważające jest jedynie to, że obiekty te w swym kształcie pewnie już nie istnieją w naszym teraźniejszym czasie kosmologicznym.

O potęgę mocy kwazarów może świadczyć fakt, że były one jedynymi rozważanymi kandydatami dla promieniowania nasyconej fotosfery czarnej dziury. Zgodnie z obliczeniami statystycznymi autora w pracy [7] dobrze „karmiona” materia/energija czarna dziura ma praktycznie nieograniczoną moc. Ta największa moc rozważana kiedykolwiek w układzie fizycznym wyszła rzędu 1/10 mocy Plancka, czyli 1/10 największej mocy o jakiej jest jeszcze sens myśleć fizycznie albo już nawet takiego sensu nie ma (odnośnie mocy Plancka).

Opisywane hipotetyczne promieniowanie miałyby w pewien sposób unifikować potencjalności trzech idei: akrecji, promieniowania Plancka oraz promieniowania Hawkinga. Podejście to jednak nie spotkało się jeszcze z dostatecznymi reperkusjami naukowymi⁷. Warto jednak zauważyć, że ilościowo oryginalne promieniowanie Hawkinga czarnej dziury o masie Słońce jest równe numerycznemu zeru⁸. Natomiast obserwowane lub szacowane promieniowanie akrecyjne jest bardzo duże. Ponadto promieniowanie w modelu fotosfery bardzo zależy od wspomnianego „karmienia” materia/energija czarnej dziury.

Należy jednak obiektywnie dodać, że najmocniejszym kwazarom o mocy 10^{41} W brakuje jeszcze dziesięć rzędów wielkości do 1/10 mocy Plancka. Jednak można znaleźć oszacowania [11], że gdyby kwazary promieniowały izotropowo z intensywnością dżetów to ich moc sięgałaby milion razy więcej, to jest mocy 10^{47} W (10^{54} erg/s). Skła-

nia to do zastanowienia czy rzeczywiście promieniowanie akrecyjne oraz promieniowanie dżetów jest podyktowane jedynie obrotem czarnej dziury, czyli momentem pędu.

A może jest wprost przeciwnie i moment pędu zmniejsza całkowite możliwe promieniowanie. Rozważmy to w kontekście promieniowania Hawkinga i promieniowania sfery fotonowej. Hawking wyprowadził swoje promieniowanie metodami kwantowopolowymi dla przypadku nieobrótowej czarnej dziury. W książce popularnonaukowej „Krótka historia czasu” z tego uproszczenia uczynił atut. Hawking opisał w niej, że zainspirowała go podróż do Moskwy. Mianowicie Zeldowicz i Starobinski twierdzili, że obrót czarnej dziury umożliwia wydostawanie się z czarnej dziury cząstek. Hawking zaś potrafił wykazać, że w jego modelu promieniowania obrót czarnej dziury nie było potrzebne. W opowieści tej Hawking umniejszył rolę (choć nie pominął) J. Bekensteina, który pierwszy wprowadził entropię i temperaturę czarnej dziury z rotacją i bez. Dlatego słusznie w niektórych specjalistycznych pracach kwantowe promieniowanie czarnych dziur nazywane jest promieniowaniem Bekensteina-Hawkinga.

Analiza pracy Bekensteina z 1972 roku (referencja w [7]) na poziomie matematyki licealnej pokazuje, że nienaładowana czarna dziura ma największą temperaturę, gdy się nie obraca. Zatem obrót zmniejsza temperaturę czarnej dziury i na logikę zmniejsza jej moc promieniowania. Rzeczywiste ciała niebieskie zawsze mają pewien niezerowy moment pędu. Ponieważ ogromne promieniowanie 1/10 mocy Plancka sfery fotonowej czarnej dziury zakłada brak rotacji, to właśnie rotacją można by argumentować rzeczywiste zmniejszenie tej hipotetycznej mocy.

Warto przypomnieć, że pierwszym argumentem dla zmniejszenia mocy było wyczerpywanie się materii/energii fotosfery czarnej dziury. Wcześniej było to opisane w terminach „karmienia” czarnej dziury, a teraz możemy mówić o jej „głodzie”. Efekt ten zawarty jest we wzorach w pracy [7], ale dla uproszczenia główne syntetyczne wyniki odnoszą się do „sytej” czarnej dziury, której energia zawarta jest w fotosferze.

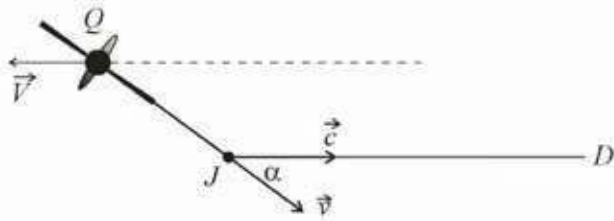
Osoby zainteresowane wizualizacją geometryczną samych czarnych dziur i pojęć, takich jak horyzont lub osłoniwość mogą zapoznać się z inną pracą autora w Fizyce w Szkole z Astronomią [6].

Obserwacje nadświetlnych dżetów

Tematem artykułu nie są czarne dziury ani nawet same kwazary, ale dżety będące skutkiem szybkiej rotacji kwazarów oraz potencjalności do wypromieniowania energii przez materię otaczającą czarne dziury stanowiące jądra kwazarów. Wieloaspektowy mechanizm powstawania dżetów nie będzie tutaj wyjaśniany. Dość powiedzieć, że gdzie drwa rąbią tam wióry lecą, a czarna dziura kwaza-

⁷ Poza redaktorem i recenzentem Fotonu szerzej do artykułu [7] odniósł się redaktor naczelny Delti Szymon Charzyński, za co mu dziękuję. Stwierdził on, że artykuł narusza pewien utarty porządek klasyfikacji zjawisk typu kwantowego promieniowania Hawkinga i klasycznego promieniowania akrecyjnego. Jednocześnie wyraził zaskoplenie jak zakwalifikować zaproponowany model promieniowania fotosfery czarnej dziury.

⁸ Temperatura Hawkinga dla Słońca wynosi $T = \hbar c^3 / (8\pi k G M) \approx 6 \cdot 10^{-9}$ K, zaś moc $P = \hbar c^6 / (15360\pi G^2 M^2) \approx 9 \cdot 10^{-29}$ W.



Rys. 4. Rysunek schematyczny przedstawiający sytuację umożliwiającą obserwację pozornej nadświetlnej prędkości dżetu J. Dżet pochodzi z kwazaru lub czarnej dziury Q. Promieniowanie radiowe (lub widzialne) dociera do obserwatora D i tworzy obserwowalny efekt nadświetlności dżetu.

ru jest potężnym piecem dla materii kwazaru stanowiącej jego uniwersalne paliwo. Natomiast dżety stanowią w tym porównaniu wióry, które wylatują z prędkością niemal równą prędkości światła c .

Prędkość dżetów jest rzeczywiście tak duża, że istotnie nie umniejsza jej oddalanie kwazarów również z prędkościami rzędu c (Rys. 4). Jak to jest zatem możliwe, że różnica prędkości bliskich c jest dalej równa około c , a nie bliska zero. Fenomen ten wyjaśnia relatywistyczne prawo odejmowania prędkości odkryte przez Einsteina:

$$v = (v' - V)_{rel} = \frac{v' - V}{1 - v'V / c^2} \quad (21)$$

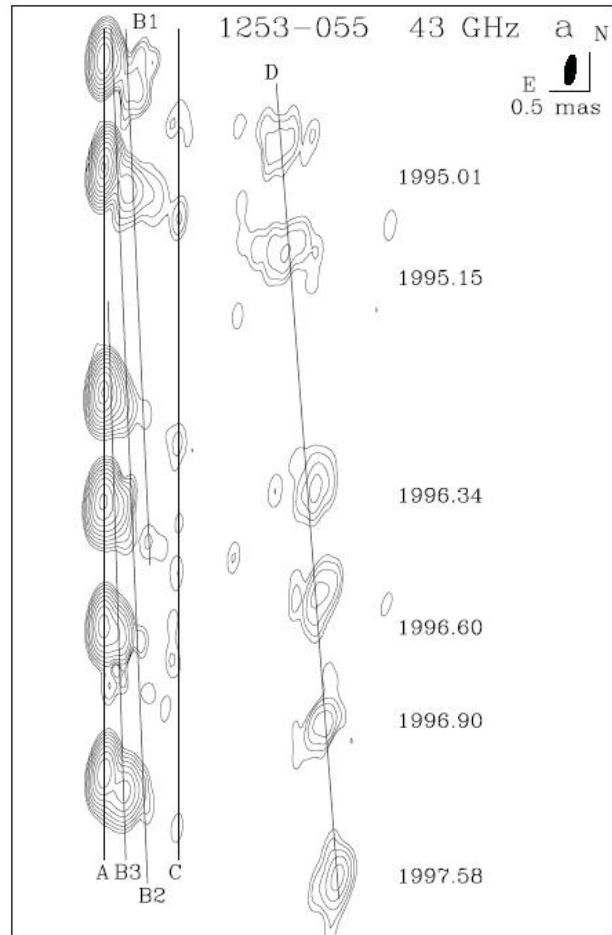
Które na przykładowych wartościach podświetlnych wygląda następująco:

$$v = (0.999c - 0.9c)_{rel} = 0.98c \quad (22)$$

Zatem jeżeli zbliżający się dżet jest bardziej relatywistyczny od oddalającego kwazaru to i tak dżet może się zbliżać do nas relatywistycznie⁹. Wektorowe prawo składania relatywistycznego prędkości można znaleźć na przykład w preprincie autora [5]. Wzór (21) został użyty w tym preprincie do zdefiniowania nowego rodzaju przyspieszenia relatywistycznego, które w przeciwieństwie do zwykłego przyspieszenia w STW jest zawsze równoległe do siły.

Przejdźmy teraz bezpośrednio do wyników obserwacyjnych opisanych w pracy [3]. Dane zawarte w Tab. 1 charakteryzują kwazary w których zaobserwowano najszybsze dżety. Natomiast Tab. 2 zawiera oszacowanie pozostałych wielkości kinetycznych pozwalających opisać układ kwazara i dżetu z rysunku 4. Na uwagę zasługują oczywiście obserwowane prędkości nadświetlne z przedziału od $6.14 c$ do $29.6 c$.

Podane w tabelach odchylenie standardowe tych prędkości zaświadcza w pewien sposób o ich obserwacyjnym rodowodzie. Podanie wartości wektorów prędkości pozornych z przedziału od $19 c$ do $439 c$ może być zaskoczeniem. W każdym razie takich wartości raczej nie spotyka się w publikacjach. Nie są to wartości bezpośrednio obserwowane, ale pozwalają one sobie uświadomić, że np. podczas rocznej obserwacji widzimy dżet, który przebył fizyczną drogę 439 lat świetlnych. Co więcej trudno taką drogę nawet nazwać drogą pozorną. Wręcz przeciwnie dżet obserwowany rok temu znajdował się rzeczywiście



Rys. 5. Obraz obserwacji w widmie radiowym nadświetlnego dżetu w kwazarze 3C 279 z pracy [3]. Struga D dżetu w czasie 2.57 roku przemieściła się na sferze niebieskiej o 16.2 lat świetlnych. Zatem takiemu dżetowi można przypisać (pozorną) prędkość nadświetlną 6.3 c. Ta nadświetlna prędkość jest obserwabłą, którą można interpretować w ramach STW jako czteroprędkość.



Rys. 6. Zdjęcie nadświetlnego dżetu w galaktyce M87 gwiazdozbioru Panny wykonane w zakresie widzialnym przez kosmiczny teleskop Hubble'a (HST). Najszybsze fragmenty strugi wykazują horyzontalną prędkość pozorną rzędu 6 c. Widać, że dżet ulega ogromnemu pojaśnieniu i niemal dorównuje jasnością reszcie galaktyki, gdy jednocześnie dżet po drugiej stronie nie jest widoczny nawet w szerszym kadrze. W jądrze aktywnej galaktyki M8, czyli w zasadzie kwazarze (tyle, że bliskim), znajduje się słynna czarna dziura o masie $6.5 \cdot 10^9$ mas Słońca, której obraz obiegił świat w kwietniu 2019. Zdjęcie HST zostało udostępnione w publikacji [4].

⁹ Wbrew angielskiemu zapożyczeniu relative czyli względny słowo relatywistyczny w fizyce oznacza albo przypadek prędkości bliskich c albo stosowanie teorii względności Einsteina.

Tab. 1. Wybrane wyniki obserwacyjne z pracy [3], oraz wynik dla M87 z pracy [1]. Przedstawione są kwazary o trzech największych horyzontalnych prędkościach pozornych oraz źródła dżetów z Rys. 5 i Rys. 6. Wielkości Hubble’a zostały policzone ze standardowych wzorów dla stałej Hubble’a $H = 70$ km/s/MPc.

Lp.	Kwazar Oznaczenie Katalogowe	Przesunięcie Ku czerwieni z	Prędkość Hubble’a Oddalania kwazaru V	Odległość Hubble’a Kwazaru (ly - rok świetlny)	Horyzontalna pozorna Prędkość dżetu $\tilde{v}_\perp = u$
1	0235+164	0.94	0.580 c	$8.10 \cdot 10^9$ ly	(29.6±5.1) c
2	1406-076	1.494	0.723 c	$10.10 \cdot 10^9$ ly	(28.4±2.3) c
3	0827+243	2.046	0.805 c	$11.25 \cdot 10^9$ ly	(27.0±5.1) c
4	1253-055 (3C 279)	0.538	0.406 c	$5.67 \cdot 10^9$ ly	(6.3±0.4) c
5	M87 (NGC 4486)	0.00428	0.004 c	$0.06 \cdot 10^9$ ly	(6.14±0.58) c

Tab. 2. Opracowanie wyników obserwacji wybranych najszybszych nadświetlnych z jetów z Tab. 1. Wyniki zostały opracowane zgodnie z wzorami z niniejszego artykułu. Horyzontalna prędkość pozorna jako obserwabla posiadająca interpretacje czteroprędkości została powtórzona dla przejrzystości.

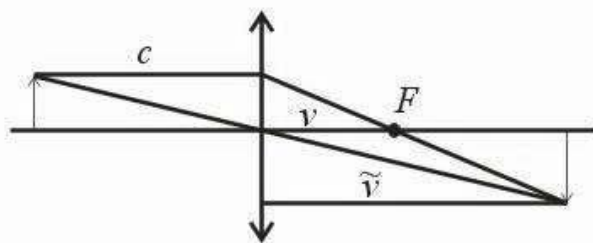
Lp.	Maksymalny kąt Odchylenia dżetu α_{\max}	Przeciętne Pojasnienie dżetu $(I/I_0)_{sr}$	Pozorna prędkość Minimalna dżetu $\tilde{v}_{\min} = \zeta_{\parallel \min} \cdot C$	Prędkość minimalna Dżetu v_{\min}	Horyzontalna pozorna Prędkość dżetu $\tilde{v}_\perp = u$
1	3.9°	25979	439 c	0.99943 c	(29.6±5.1) c
2	4.0°	22949	404 c	0.99938 c	(28.4±2.3) c
3	4.2°	19724	365 c	0.99931 c	(27.0±5.1) c
4	18.0°	260	20 c	0.98764 c	(6.3±0.4) c
5	18.5°	241	19 c	0.98700 c	(6.14±0.58) c

439 lat świetlnych dalej niż ten sam dżet obserwowany dzisiaj. Nieco wolniejszy, ale wyraźny ruch nadświetlnego dżetu obserwowanego w falach radiowych przedstawiony jest na Rys. 5. Parametry tego dżetu i kwazara zostały podane w wierszach o numerze 4 w Tab. 1 i Tab. 2.

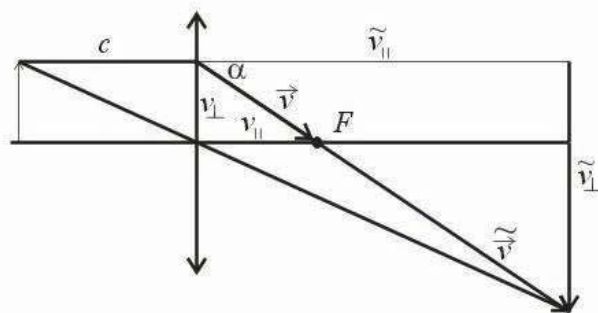
Trudno o większy konkret jak prawdziwe zdjęcie w widmie widzialnym nadświetlnego dżetu przedstawione na Rys. 6. Jego parametry podane są w ostatnim wierszu 5 Tab. 1 i Tab. 2. Widoczna na zdjęciu żółta galaktyka M87 (kwazar) to po części najbardziej znana z „widenia” w społeczeństwie czarna dziura.

Konstrukcja soczewkowa prędkości pozornej

W przypisie „⁵” do równania (11) zostało zauważone, że równanie na radialną prędkość pozorną ma postać równania soczewki. Wykorzystanie tej analogii nie wymagałoby nawet żadnych dodatkowych przekształceń, a konstrukcja byłaby dostępna bez potrzeby dowodu. Jednak takie podejście nie doprowadziłoby nas do Rys. 3 i prosto uzyskanych wyników optymalizacji (16-20). W każdym razie warto wykonać jednak konstrukcję soczewkową. Wersja tej konstrukcji dla prędkości radialnej (odpowiednik Rys. 2)



Rys. 7. Konstrukcja soczewkowa radialnej prędkości pozornej. Prędkość światła $c=x$ pełni rolę odległości przedmiotu od soczewki o ogniskowej równej prędkości ciała $v=f$. Odległość obrazu stanowi konstruowaną prędkość pozorną $\tilde{v} = y$. Powiększenie obrazu określa czynnik nadświetlności i jest o 1 mniejsze od czynnika dżeta.



Rys. 8. Konstrukcja soczewkowa pełnego wektora prędkości pozornej i jej składowych. W tej konstrukcji rolę ogniskowej pełni składowa radialna (równoległa) prędkości zaś składowa horyzontalna (poprzeczna) stanowi rozmiar przedmiotu. Obserwowalna nadświetlna składowa horyzontalna (poprzeczna) prędkości pozornej jest równa sumie rozmiarów przedmiotu i jego obrazu.

jest przedstawiona na Rys. 7. Konstrukcja soczewkowa różni się od konstrukcji na Rys. 2 głównie tym, że zamiast drugiego promienia, który przechodziłby przez ognisko (GFK) występuje promień przechodzący przez środek soczewki (odpowiednik LE).

Dzięki temu, że oś optyczna jest prostopadła do soczewki to wektorowa konstrukcja soczewkowa (Rys. 8) przebiega niemal tak samo jak konstrukcja składowej radialnej. Warto jeszcze obliczyć formalne powiększenie dla tej konstrukcji soczewkowej:

$$p = \frac{\tilde{v}_\parallel}{c} = \frac{\zeta_\parallel v_\parallel}{c} = \zeta_\parallel - 1 \quad (23)$$

Takie powiększenie informuje nas o stopniu nadświetlności składowej radialnej prędkości pozornej i jest ono o 1 mniejsze od radialnego czynnika dżeta. Natomiast czynnik dżeta (radialny) informuje nas ile razy wzrosła prędkość pozorna względem rzeczywiście.

Pojaśnienie nadświetlnych dżetów

Po tym jak zobaczyliśmy obserwowalne nadświetlne prędkości horyzontalne dochodzące do $30c$ (nieważne, że pozorne) oraz wartości prędkości rzędu $400c$, trudno spodziewać się jeszcze mocniejszego uderzenia. Jednak ci co znają efekty towarzyszące prędkości naddźwiękowej mogą słusznie oczekiwać pewnego rodzaju fali uderzeniowej. O ile nadświetlność jest mimo wszystko pozorna to potężne pojaśnienie obserwowalne dżetów jest faktem, który trudno nazywać zwykłym złudzeniem. Wyobraźmy sobie, że podczas opalania na plaży przez kilka minut Słońce pojaśnieje „pozornie” np. 100 razy, a my „pozornie” spalimy się na węgiel. Wówczas chyba daremnie będzie szukanie układu odniesienia, w którym, zwęglenie wygląda jak tzw. czekolada¹⁰. Całe szczęście Słońce nie dostarcza nam takich atrakcji. Jednak w układzie podwójnym szybko krążącej pary gwiazd podobny efekt mógłby wystąpić.

Do efektu pojaśnienia dżetu gładko nas wprowadzają konstrukcje soczewkowe pozornych prędkości. Przecież powstawaniu obrazu w soczewce towarzyszy w tym przypadku duże powiększenie. Jednak efekt pojaśnienia może być znacznie większy od wartości tego powiększenia (abstrahując od tego, że zwiększanie powiększenia np. lunety nie pojaśnia, lecz przyciemnia).

Pojaśnienie jest efektem aż trzeciego rzędu względem czynnika Dopplera (lub czynnika dżeta). Za pierwszy stopień czynnika pojaśnienia odpowiada dobrze omówione skrócenie retardacyjne czasu. Chodzi o to, że ta sama energia fali elektromagnetycznej dociera do obserwatora w skróconym czasie. Za kolejne dwa stopnie odpowiadają dwa wymiary frontu falowego, który ulega kolimacji. Innymi słowy ze względu na zjawisko zmiany kąta promieni światła wywołanego ruchem (tzw. aberracji światła) wiązka zacieśnia się w dwóch wymiarach swojego przekroju poprzecznego. W łącznym efekcie pojaśnienie natężenia dżetu przybiera wartość trzeciej potęgi czynnika Dopplera („podłużnego”) [6]:

$$I = D_{||}^3 I_0 = \frac{\zeta_{||}^3}{\gamma^3} I_0 \approx \zeta_{||}^3 I_0 \quad (24)$$

Zatem główna część efektu pojaśnienia dżetu jest równa trzeciej potędze czynnika dżeta. Tą główną część efektu można opisywać wspomnianą już relatywistyką dla ubogich (RDU). Jej istotą jest stała skończona prędkość światła c w układzie obserwatora i wynikające z niej efekty retardacyjne. Efekt aberracji światła polegający na zmianie kąta widzenia promienia światła w układzie obserwatora względem źródła też można podciągnąć pod efekty retardacyjne. Czyli istotę pojaśnienia i główną część wyrażenia (24) dla przypadku radialnego można jeszcze w umiarkowanie prosty sposób wyprowadzić. Ponieważ jednak wyprowadzenie komplikuje się dla niezrownego kąta α to nie jest one tutaj przedstawiane. Tym bardziej, że wyprowadzenie pełnego efektu z czynnikiem gamma wymagałoby stosowania transformacji Lorentza. Zainteresowanych można odesłać do publikacji [8].

Okazuje się, że wzór (24) na pojaśnienie zakłada izotropowość źródła promieniowania. W rzeczywistości promieniowanie dżetów nie jest izotropowe, a wręcz przeciwnie zawiera zwykle tzw. promieniowanie synchrotronowe, które charakteryzuje się dużą kolimacją. Opis zjawiska trochę się komplikuje, ale efektywnie wystarcza modyfikacja wykładnika potęgi. Parametr potrzebny do modyfikacji wykładnika 3 określa się terminem indeksu spektralnego [2].

Jednakże wzór (24) bez dodatkowych komplikacji jest już sam w sobie dość złożony do analizy, ale bynajmniej nie przez wykładnik 3. Wzór komplikuje czynnik gamma Lorentza, bo przecież sam czynnik dżeta umieliśmy zoptymalizować geometrycznie we wzorze (19). Mimo komplikacji rozważmy dla uproszczenia funkcję kwadratu czynnika Dopplera, który opisuje pojaśnienie:

$$D_{||}^2(v, \alpha) = \frac{c^2 - v^2}{(c - v \cos \alpha)^2} \quad (25)$$

Dla kąta zero, czyli w przypadku radialnym, funkcja ta będzie dowolnie duża dla prędkości v dążącej do c , tzn.:

$$D_{||}^2(v, 0) = \frac{c + v}{c - v} \xrightarrow{v \rightarrow c^-} +\infty \quad (26)$$

Również wartość możliwie mała funkcji (25) nie będzie liczbą skończoną, tzn.:

$$D_{||}^2(v, 90^\circ) = \frac{c^2 - v^2}{c^2} \xrightarrow{v \rightarrow c} 0 \quad (27)$$

W relatywistyce osobliwości typu (26) nie są czymś bardzo zaskakującym i wbrew pozorom nie są niefizyczne. Jednak powinno się tutaj rozważyć bardziej fizyczną optymalizację opartą na ustalonej wartości parametru obserwacji \tilde{v}_\perp przy nieznanym kącie prędkości. Po pewnych przekształceniach algebraicznych możemy nadać (25) postać:

$$D_{||\tilde{v}_\perp}^2(\alpha) = c^2 - \tilde{v}_\perp^2 + 2c\tilde{v}_\perp \text{ctg}\alpha \quad (28)$$

O dziwo nawet ta funkcja jednej zmiennej kątowej również prowadzi do wartości skrajnych 0 i ∞ :

$$D_{||\tilde{v}_\perp}^2(\alpha) \xrightarrow{\alpha \rightarrow 0^+} +\infty \quad (29)$$

$$D_{||\tilde{v}_\perp}^2(\alpha) \xrightarrow{\alpha \rightarrow \alpha_{\max}^-} 0 \quad (30)$$

Nie możemy zatem wybrać ani minimalnej ani maksymalnej wartości pojaśnienia. W tej sytuacji warto wybrać coś pośredniego. Przyjmijmy zatem nazwę przeciętne pojaśnienie odpowiadające minimalnej wartości prędkości rzeczywistej (16) i kątowi prostemu HFG na Rys. 3. To przeciętne pojaśnienie wyraża się wzorem:

$$\left(\frac{I}{I_0} \right)_{sr} = \sqrt{1 + \frac{\tilde{v}_\perp^2}{c^2}} \quad (31)$$

¹⁰ Mimo drastyczności porównania ma ono wymiar edukacyjny zarówno w kontekście medycznym (szkodliwości opalania) oraz ekologicznym (smog i efekt cieplarniany są realnymi zagrożeniami ludzkości).

Tab. 1 pokazuje, że takie przeciętne wyjaśnienie może być rzędu 10^4 . W przypadku dżetu galaktyki M87 takie przeciętne wyjaśnienie wynosi tylko 241, ale zdjęcie na Rys. 4 oraz praca [1] uświadamiają, że rzeczywiste wyjaśnienie jest tutaj znacznie większe nawet od 10^4 . Po prostu wyjaśnienie przeciętne ma tylko wartość pogładową, żeby nie powiedzieć zaniżoną. Natomiast najbardziej prawdopodobne są obserwacje dużych wyjaśnień, więc rozsądne jest przyjąć, że rzeczywiste wyjaśnienie zaobserwowanych dżetów jest ogromne i znacznie większe od przeciętnego wyjaśnienia (31).

Podsumowanie

Dżety oraz ich źródła kwazary to najbardziej relatywistyczne obiekty we Wszechświecie. O ile kwazary oddalają się od nas z prędkościami rzędu c , to obserwuje się dżety, które zbliżają się do nas z prędkością niemal równą prędkości c . Jednak ta prędkość zbliżania dżetów nie jest obserwowalną. Obserwablą stanowi natomiast widoma prędkość horyzontalna dżetu na sferze niebieskiej, która osiąga często wartość nadświetlną od $6c$ do $30c$. Takie prędkości widome są jednak prędkościami pozornymi, które znalazły też, przy pewnych założeniach, interpretację czteroprędkości.

Wyjaśnienie nadświetlności zostało podane ściśle bez konieczności odwołania się do szczególnej teorii względności (STW). Opiera się ono na efekcie skrócenia retardacyjnego czasu. Skrócenie czasu oraz prędkości nadświetlne zostały opisane prostym czynnikiem dżeta. Użyta metodyka była nazwana relatywistyką dla ubogich (RDU) celem uniknięcia hybrydy językowej typu nierelatywistyczna kinematyka prędkości bliskich c . W ramach tej metodyki skrócenie retardacyjne czasu jest równoważne efektowi Dopplera. Jednakże wyjaśnienie oparte na STW bazuje aż na dwóch efektach, efekcie Dopplera oraz dyatacji czasu, abstrahując od tego jak te efekty są ze sobą powiązane.

Ponieważ skrócenie retardacyjne i czynnik dżeta wyrażają się bardzo prostymi wzorami to z powodzeniem udało się konstrukcja wektora prędkości pozornej (nadświetlnej). W sytuacji radialnej konstrukcja ta umożliwiła bezpośrednie porównywanie prędkości ciała, prędkości światła i prędkości pozornej na odcinkach równoległych. Przedstawione konstrukcje zaowocowały prostą optymalizacją prędkości minimalnej dla obserwowanego dżetu oraz optymalizacją maksymalnego kąta odchylenia ru-

chu dżetu od kierunku obserwacji. Mały kąt obserwacji uświadamia jak ogromna (np. 400 c) częstokroć musi być wypadkowa wartość pozornego wektora prędkości. Konstrukcja prędkości pozornych została utrwalona dodatkowo w pełnej analogii do konstrukcji obrazu w soczewce skupiającej.

Jeszcze bardziej niezwykłym efektem od samej nadświetlności dżetów okazał się efekt ich wyjaśnienia. Wraz ze zbliżaniem prędkości dżetu do prędkości światła wyjaśnienie może dążyć do dowolnie dużej wartości, ale także do dowolnie małej. To ostatnie wiąże się z występowaniem czynnika gamma Lorentza we wzorze na wyjaśnienie. Oznacza to, że wyjaśnienia nie można dokładnie opisać relatywistyką dla ubogich (RDU), ale należy stosować STW. Warto w tym miejscu podkreślić, że wyniki przedstawione w pracy mają ścisły charakter w sensie STW. W dużej mierze dotyczy to także ścisłości opisu RDU, który jest przybliżony jedynie dla relatywistycznego efektu Dopplera i wyjaśnienia oraz nie opisuje poprawnie odejmowania prędkości.

LITERATURA

- [1] J. A. Biretta, W. B. Sparks, F. Macchetto (1999): „Hubble space telescope observations of superluminal motion in the M87 jet”, *The Astrophysical Journal* 520:621-626.
- [2] M. H. Cohen, M. L. Lister, D. C. Homan, M. Kadler, K. I. Kellermann, Y. Y. Kovalev, R. C. Vermeulen (2006): „Relativistic beaming and the intrinsic properties of extragalactic radio jets”, arXiv:astro-ph/0611642v1.
- [3] S. G. Jorstad, A. P. Marscher, J. R. Mattox, A. E. Wehrle, S. D. Bloom, A. V. Yurchenko (2001): „Multi-Epoch VLBA Observations of EGRET-Detected Quasars and BL Lac Objects: Superluminal Motion of Gamma-Ray Bright Blazars”, www.researchgate.net/publication/277238950, arXiv:astro-ph/0101570v1, *ApJS* 12/31/00.
- [4] K. I. Kellermann, Y. Y. Kovalev, M. L. Lister, D. C. Homan, M. Kadler, M. H. Cohen, E. Ros, J. A. Zensus, R. C. Vermeulen, M. F. Aller, H. D. Aller (2007): „Doppler Boosting, Superluminal Motion, and the Kinematics of AGN Jets”, www.researchgate.net/publication/1761505, arXiv:0708.3219v1, *Astrophysics and Space Science* 311(1).
- [5] G. M. Koczan (2019): „Definiowanie trójwymiarowego przyspieszenia oraz masy bezwładnej prowadzące do prostej postaci $F=MA$ relatywistycznego równania ruchu”, www.researchgate.net/publication/337147013, wersja angielska: arXiv:1909.09084v2.
- [6] G. M. Koczan (2019): „Zobaczyć osobliwość czarnej dziury i przeżyć”, *Fizyka w Szkole z Astronomią* nr 4/2019, str. 36-45.
- [7] G. M. Koczan (2018): „Wyprowadzanie promieniowania Hawkinga. Część II: Mechanika kwantowa i statystyczna stanów fotonowych”, *Foton 141 Lato*, str. 4-32, www.foton.if.uj.edu.pl/archiwum/2018/141.
- [8] P. Kumar, B. Zhang (2014): „The Physics of Gamma-Ray Bursts & Relativistic Jets”, arXiv:1410.0679v1.
- [9] J. Kurzyk (2019): „Paradoksy szczególnej teorii względności. Cześć IV”, nr 4/2019, str. 28-33.
- [10] J. Kurzyk (2019): „Paradoksy szczególnej teorii względności. Cześć V”, nr 5/2019, str. 46-50.
- [11] A. Sądowski (2011): „Mikrokwazary”, *Urania – Postępy Astronomii* nr 1/2011 (751, tom LXXXII), str. 10-14.
- [12] L. Sokolowski (2006): „O prędkościach nadświetlnych”, *Foton 94 Jesień*, str. 17-25, www.foton.if.uj.edu.pl/archiwum/2006/94

Co w fizyce piszczy

Oba Voyagery uciekły

Wskazana wiadomość ma za pewne charakter sensacyjny i w dużym stopniu jest sensacyjna. Nie ma ona wiele wspólnego z kroniką kryminalną, choć opowiada ona w pewnym sensie o sensacyjnej ucieczce. Ale powoli. Pasjonatom badań kosmicznych z pewnością nie obcy jest termin Voyager. Był to program budowy sond kosmicznych do badania dalekich rejonów Układu Słonecznego. Na początku planowano wystrzelenie czterech sond choć ostatecznie zdecydowano się na dwie. Były to sondy Voyager 1 i Voyager 2. Obie wystrzelono w 1977 roku. Nieprzypadkowo. Otóż dzięki temu, że sondy zostały wystrzelone w tym a nie innym roku możliwe było wykorzy-

stanie tzw. asysty grawitacyjnej, czyli takie wykorzystanie siły grawitacji, aby napędzać sondy. Sondy obfotografowały gazowych olbrzymów i wyruszyły w dalszą podróż. Podróż ta doprowadziła najpierw Voyagera 1 poza Układ Słoneczny. Obecnie ten sam wyczyn udało się sondzie Voyager 2. Naukowcy z low badając dane dotyczące plazmy, przez którą przelatuje Voyager 2 wykryli, że jest ona gęstsza i zimniejsza, co jest charakterystyczne dla plazmy spoza Układu Słonecznego. Czyli człowiekowi udało się skonstruować już dwa obiekty, którym po wielu latach wędrówki udało się opuścić strefę wpływów naszego Słońca.

Źródło: D. A. Gurnett & W. S. Kurth. Plasma densities near and beyond the heliopause from the Voyager 1 and 2 plasma wave instruments. *Nature Astronomy*, 2019 DOI: 10.1038/s41550-019-0918-5

Wydania specjalne

w wersji elektronicznej – pliki PDF



Ceny już
od 10 zł!



Szczegóły i formularz zamówienia: www.aspress.com.pl/specjalne/

eptasa.pl ceu5d96dbd

Prenumerata 2020

Od pierwszego wydania!

Jeszcze zdążysz!



Wiemy, jak poruszyć wyobraźnię

Formularz zamówienia na: www.aspress.com.pl/prenumerata-2020/

eprasa.pl/ce05d96d6d