FIZYKA
w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI 367 (LXIV) indeks 35810X Nr 2 marzec/kwiecień 2020 CENA 30,00 zł (w tym 8% VAT)

Stany skupienia
O wodzie i cieczach

Zadania na zderzenia

200 lat elektrochemii

ASTRONOMIA

Księżycowe pływy

Jak odkrywano promieniowanie kosmiczne

Czy Tytan może być „Planem B”?

Anomalie grawitacji

ISSN 0426-3383

eprasa.pl 2e0409c816

Tylko u nas!
Pod jednym adresem
www.aspress.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!

eprasa.pl 2e0409c816

Drodzy Czytelnicy!

Mam niesamowitą przyjemność zaprosić Państwa do lektury drugiego już w tym roku numeru „Fizyki w Szkole”. Człowiek jest zwierzęciem dominującym na naszej planecie. Dzięki swojej liczności, jak i wiedzy, potrafi on w sposób odczuwalny modyfikować warunki życia. Powszechnie jest wiadomo, że człowiek potrafi zmienić warunki klimatyczne panujące na Ziemi. Tej tematyce było poświęconych już wiele artykułów na łamach „Fizyki w Szkole”. Przypomnijmy tu serie artykułów autorstwa prof. Markowicza z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Jednakże człowiek to też wielki górnik i wielki budowniczy. Obie te działalności związane są z przemieszczaniem mas, a zmiany rozkładu mas skutkują zmianami rozkładu pola grawitacyjnego, a te z kolei mogą mieć pewien wpływ na ruch Ziemi jako takiej. Tym zagadnieniom poświęcony jest artykuł „Anomalie pola grawitacyjnego Ziemi powodowane przez człowieka” autorstwa Stanisława Bednarka.

Skoro jesteśmy przy tematyce geofizycznej to należy pamiętać, że znaczna część powierzchni ziemi pokryta jest cieczą, czyli wodą. My też jesteśmy w przeważającej części zbudowani z cieczy. Aby zrozumieć samego siebie powinniśmy więc poznać właściwości cieczy. Dlatego zapraszam do lektury artykułu poświęconego tej tematyce autorstwa Katarzyny Wyborskiej i Grzegorza Karwasza pod tytułem, rzecz jasna – „Ciecze”.

Oczywiście wspomniane dwa artykuły nie wyczerpują puli ciekawych artykułów z tego numeru. Mamy jeszcze artykuły poświęcone dydaktyce fizyki oraz artykuły dotyczące zagadnień kosmicznych. Tak więc myślę, że warto ten numer przeczytać od deski do deski.

Z wyrazami szacunku
Redaktor prowadzący
Zbigniew Wiśniewski

12 **Cztery i pół stanów skupienia. Część III. Ciecze**
Katarzyna Wyborska, Grzegorz Karwasz

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

4 **Anomalie pola grawitacyjnego Ziemi powodowane przez człowieka**
Stanisław Bednarek

10 **Kartka z kalendarza. 220 lat elektrochemii**
Zbigniew Wiśniewski
220 lat temu, Alessandro Volta, włoski fizyk i wynalazca, przeprowadził jeden z najważniejszych eksperymentów w dziedzinie elektryczności. Otóż skonstruował on pierwsze elektrochemiczne źródło prądu stałego.

22 **Ruch jednostajny po okręgu pod wpływem sił bezwładności**
Jan Kurzyk

Z naszych lekcji

19 **Warunki i sposoby realizacji programu fizyki w szkole podstawowej** Arleta Biegańska
W jakim stopniu w szkole przestrzegane są warunki i sposoby realizacji podstaw programowych?

29 **Kłopoty z wektorami (miniatura dydaktyczna)**
Waldemar Reńda

32 **Rozwiązywanie zadań na zderzenia** Czesław Surowiec

Astronomia dla każdego

36 **Oddziaływanie Księżyca na Ziemię - pływy**
Marcin Wesołowski, Piotr Gronkowski
Zjawisko pływów stosunkowo długo pozostawało tajemnicą, pomimo tego, że istniały dość wyraźne wskazówki, że jest ono związane z oddziaływaniem Księżyca na Ziemię.

44 **Czy Tytan może być „Planem B”?** Anna Janeczek

46 **Promieniowanie kosmiczne - nieoczekiwane początki (1912-1937)** Tadeusz Wibig

FIZYKA w Szkole z Astronomią
CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI
NUMER 2 MARZEC/KWIECIEŃ 2020 Nakład 3000 egz. CENA 30,00 zł (w tym 8% VAT)
367 (LXIII) indeks 35810X ISSN 0426-3383

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

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

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

Anomalie pola grawitacyjnego Ziemi powodowane przez człowieka

Stanisław **Bednarek**

Podczas nauczania fizyki uczniowie zwykle dowiadują się, że średnia wartość przyspieszenia ziemskiego $\boldsymbol{g}$ wynosi 9,81 m/s^2. Czasem jeszcze dodaje się, że na biegunach Ziemi ta wartość jest nieco większa, niż na równiku. Rozwiązując zadania obliczeniowe i testy przyjmuje się często dla ułatwienia obliczeń $\boldsymbol{g}$ = 10 m/s^2. Taki zakres wiedzy na temat wartości przyspieszenia ziemskiego jest jednak bardzo ograniczony.

Pomiarami przyspieszenia ziemskiego z dużą dokładnością, zajmuje się dyscyplina naukowa nazywana grawimetrią, a używane w tym celu przyrządy to grawimetry [1]. Zgodnie z wynikami tych pomiarów, wartość i kierunek przyspieszenia ziemskiego wykazują w pewnych miejscach na Ziemi znaczące różnice w porównaniu z wartościami w najbliższym otoczeniu. Te różnice są nazywane anomaliami pola grawitacyjnego Ziemi albo krócej – anomaliami grawitacyjnymi.

Spotyka się czasem sensacyjne informacje, że w niektórych miejscach anomalie grawitacyjne wynoszą kilka procent średniej wartości przyspieszenia ziemskiego [2]. Autorzy takich sensacji próbują tłumaczyć, że prawo grawitacji w tych miejscach „działa inaczej" lub występują od niego jakieś bliżej nieokreślone „odstępstwa". Ich sposób wyjaśniania nie ma nic wspólnego z podejściem naukowym i służy raczej przyciąganiu turystów, niż upowszechnianiu rzetelnej wiedzy na temat anomalii grawitacyjnych.

Rzeczywistymi przyczynami anomalii grawitacyjnych są różnice gęstości mas, zawartych pod powierzchnią Ziemi w obszarach, znajdujących się w pobliżu anomalii lub specyficzne ukształtowanie terenu w tym rejonie, różniące się od jego kształtu w dalszym otoczeniu [3]. Anomalie te mogą być pochodzenia naturalnego, np. zaleganie złóż surowców mineralnych o większej gęstości niż gęstość mas w dalszym otoczeniu, albo wynikać z działalności człowieka, np. z eksploatacji tych złóż. Problem anomalii grawitacyjnych jest ważny z punktu widzenia praktycznego, m.in. dla geologii poszukiwawczej, zajmującej się wykrywanie złóż użytecznych surowców oraz dla zapewnienia wysokiej dokładności pomiarów geodezyjnych.

Nie ulega też wątpliwości, że anomalie grawitacyjne wzbudzają duże zainteresowanie i wiele emocji. Z tego powodu warto przekazać bardziej dociekliwym uczniom więcej wiedzy na ten temat, tym bardziej, że do niektórych wyników mogą oni dojść sami przez wykonanie stosunkowo prostych oszacowań. W dalszych częściach tego artykułu zostaną krótko opisane i podzielone na charakterystyczne grupy obiekty będące efektem działalności człowieka, które powodują znaczące anomalie grawitacyjne. Przy użyciu prostych wzorów będą też oszacowane wartości tych anomalii.

Źródła anomalii grawitacyjnych

Każde ciało, mające masę, wytwarza pole grawitacyjne i za jego pośrednictwem oddziałuje z innymi ciałami, które również mają masy. Dlatego oddziaływanie grawitacyjne jest najbardziej powszechnym spośród wszystkich oddziaływań podstawowych, znanych w przyrodzie. Ponieważ wartość stałej grawitacji G w prawie Newtona, wyrażającym siłę oddziaływania grawitacyjnego, jest bardzo mała ($G = 6{,}6738 \cdot 10^{-11}$ Nm^2/kg^2), to praktyczne znaczenie dla wytwarzania anomalii grawitacyjnych mają tylko obiekty o dostatecznie dużych masach, liczących co najmniej setki lub tysiące ton oraz o zwartej strukturze.

Przyczyną anomalii mogą być również puste przestrzenie pod powierzchnią Ziemi (tzw. pustki), których objętości wynoszą co najmniej tysiące metrów sześciennych. Obiekty spełniające podane warunki były i są tworzone przez człowieka. Biorąc pod uwagę obecny stan rozwoju techniki te obiekty można podzielić na następujące grupy:

A. Obiekty nieruchome

I. Naziemne

1. Masywne budowle naziemne; piramidy, najwyższe wieżowce, wysokie wieże i maszty antenowe, kominy i chłodnie kominowe, gigantyczne pomniki.
2. Hałdy i usypiska.
3. Kopalnie odkrywkowe.
4. Sztuczne kratery.
5. Budowle hydrotechniczne: sztuczne zbiorniki wodne, kanały, zapory, wielokilometrowe mosty, hydroelektrownie.

II. Podziemne

6. Pustki podziemne:

a. kopalnie głębinowe
b. podziemne obiekty komunikacyjne
c. schrony specjalnego przeznaczenia
d. inne pustki podziemne

eprasa.pl 2e0409c816

7. Zbiorniki podziemne o dużej pojemności

B. Obiekty ruchome
1. Lądowe:
a. koparki i zwałowarki dla odkrywek
b. ciężkie dźwigi samojezdne
c. gigantyczne samochody ciężarowe
d. ciężkie pociągi towarowe
2. Nawodne: supertankowce, platformy wiertnicze
3. Powietrzne: ciężkie samoloty transportowe, wielostopniowe rakiety

W następnej części artykułu będą podane przykłady obiektów, należących do wymienionych grup i mających największe znaczenie dla wytwarzania anomalii grawitacyjnych. Zostanie też przeprowadzona krótka charakterystyka tych obiektów.

Charakterystyka przykładowych źródeł

Od tysięcy lat ludzie wznosili naziemne budowle o ogromnych rozmiarach i czynią to również obecnie. Dawniej motywy tych działań miały głównie charakter religijny lub służyły upamiętnieniu zmarłych władców i pokazaniu ich potęgi. Taką rolę spełniały m.in. piramidy egipskie, świątynia Angor Wat, zbudowana przez Khmerów w Kambodży, czy gotyckie katedry w Europie.

Obecnie działania te mają świeckie i bardziej praktyczne motywy, ale czynniki ideologiczne i chęć rywalizacji nadal występują. W Polsce potwierdzają to Pałac Kultury i Nauki w Warszawie oraz wieżowiec Sky Tower we Wrocławiu. Za granicą dowodami są wieżowce w Stanach Zjednoczonych, na Dalekim Wschodzie oraz w niektórych krajach arabskich. W Dubaju (Zjednoczone Emiraty Arabskie) wzniesiono Burdż Chalifa o wysokości 828 m – najwyższy budynek na świecie, a w Dżuddzie (Arabia Saudyjska) planowana budowa Wieży Królewskiej o wysokości ponad 1000 m[1].

Do masywnych budowli naziemnych zaliczyć należy przede wszystkim piramidy egipskie i najwyższe wieżowce. Największą piramidą jest zbudowana ok. 2560 lat p.n.e. piramida Cheopsa. Składa się głównie z wapiennych bloków o masie 2500 kg i ma kształt ostrosłupa czworokątnego o wysokości 138,75 m oraz o bokach prawie kwadratowej podstawy w granicach 230,359-230,453 m. Jej masa wynosi $6\cdot10^9$ kg. Na uwagę współczesnych inżynierów zasługuje fakt, że starożytni budowniczowie ustawili tę piramidę na specjalnie wyrównanym terenie. W tym celu zredukowali różnice wysokości terenu na długości boków podstawy do 2 cm. Ponadto wytyczyli boki podstawy wzdłuż kierunków północ-południe i wschód-zachód z odchyłką nie przekraczającą czerech minut kątowych.

Masa najwyższego wieżowca jest mniejsza niż masa piramidy Cheopsa, mimo jego większej kubatury. Objętość piramidy Cheopsa, którą można traktować jako pełny ostrosłup o podstawie kwadratowej, wynosi $2{,}45\cdot10^6$ m^3.

Egipt, Giza, Piramida Cheopsa

Szacunkowa kubatura wieżowca Brudż Chalifa, przy założeniu, że jego przekrój poziomy jest kwadratem o boku 100 m, wynosi $8{,}28\cdot10^6$ m^3.

Przyjmując następnie, że jest on zbudowany z żelbetonu o średniej gęstości 2200 kg/m^3, wypełniającego 0,15 kubatury, otrzymuje się masę $2{,}73\cdot10^9$ kg. Przy jego gabarycie 3,6 razy większym, wytwarza on anomalię grawitacyjną 2,49 razy mniejszą niż piramida Cheopsa. Do podobnych wyników prowadzi powtórzenie tego oszaco-

Zjednoczone Emiraty Arabskie, Dubaj najwyższy budynek świata Burdż Chalifa o wysokości 828 m.

[1] Wszystkie dane dotyczące obiektów rozpatrywanych w tym artykule i wykorzystane do obliczeń pochodzą z następujących źródeł: M. Usidus, „Młody Technik", Nr 8, s. 26-36, 2019 r., M. Dworniczak, „Wiedza i Życie", Nr 9, s. 66-69, 2019 r. oraz z odpowiednich stron Wikipedii (dostęp: 21.02 2020).

eprasa.pl 2e0409c816

wania dla największych świątyń, które z powodu braku ścian działowych mają jeszcze mniejszy współczynnik wypełnienia objętości materiałem budowlanym.

Stosunkowo niewielkie znaczenie dla wytwarzania anomalii grawitacyjnych mają też najwyższe wieże i maszty antenowe. Powoduje to ich smukły kształt, a czasem też kratownicowa konstrukcję i wynikająca stąd relatywnie mała masa tych obiektów. Dla przykładu, masa wieży Eiffla to $1{,}01\cdot10^{7}$ kg, a wysokość (wraz z masztem antenowym) 324 m, czyli o dwa rzędy wielkości miej, niż masa rozpatrywanych wieżowców. Podobna sytuacja jest w przypadku największych, współczesnych pomników. Masę statuy Chrystusa Zbawiciela o wysokości wraz cokołem 38 m, stojącej w Rio de Janeiro, szacuje się na $2{,}14\cdot10^{7}$ kg.

Wśród największych odkrywek górniczych znajdują się kopalnie węgla brunatnego. Zasoby pojedynczych złóż osiągają masy od kilkuset milionów do miliarda ton (rzędu 10^{12} kg). Bogate złoża węgla brunatnego znajdują się w Niemczech, Polsce i USA. Zasoby złoża Szczerców w Kopalni Węgla Brunatnego Bełchatów w województwie łódzkim wynoszą 1,081 miliarda ton, a poziome rozmiary odkrywki są rzędu 1 km. Z usuniętego gruntu, który zalegał nad złożem (tzw. nadkładu) tworzone są hałdy i usypiska. Jedno z nich to sztuczna góra Kamieńsk o wysokości 386 m n.p.m. i wysokości liczonej od otaczającego ją terenu, tzw. przewyższeniu, 195 m. Ta góra zajmuje obszar 1480 ha, co odpowiada promieniowi koła 2,17 km. Szacunkowa masa góry Kamieńsk, traktowanej jako stożek, wynosi $0{,}39\cdot10^{12}$ kg.

Złoża węgla brunatnego eksploatowane w Niemczech i USA mają podobne wielkości, przy czym największy zasób 2,3 miliarda ton ma złoże amerykańskie w North Antelope Rochelle. Interesującym obiektem jest też Wieki Mur Chiński, zbudowany w celach obronnych. Jego całkowita długość wynosi 8851,8 km w tym długość właściwego muru to 6259,6 km, a resztę stanowią naturalne przeszkody – rowy i uskoki terenu. Średnie wymiary przekroju poprzecznego Muru, to wysokość 6 m i szerokość 6,5 m. Przy założeniu średniej gęstości materiału budowlanego (cegła, kamienie i ziemia) 1500 kg/m^3, otrzymuje się $0{,}537\cdot10^{12}$ kg, jako masę Muru. Oszacowanie anomalii grawitacyjnej na tej podstawie jest jednak niepewne, ponieważ znaczne odcinki Muru są obecnie zniszczone, nie ma on jednolitej struktury i nie przechodzi wzdłuż, linii prostej.

Niektóre z próbnych wybuchów bomb jądrowych były przeprowadzane pod powierzchnią Ziemi, zwykle w szybach kopalni na głębokości kilkuset metrów. Pozostałością po nich są komory albo w przypadku mniejszych głębokości, kratery. Jeden z takich kraterów na Pustyni Newada w USA, pozostały po wybuchu średniej wielkości bomby o energii 100 kt, ma średnicę 390 m i głębokość 192 m. Przy założeniu gęstości gruntu 1500 kg/m^3, jego wytworzenie spowodowało przemieszczenie masy ok. $3{,}48\cdot10^{9}$ kg. Zbiornik powstały w wyniku spiętrzenia wody przez Zaporę Trzech Przełomów na rzecze Jangcy w Chinach zawiera, 40 miliardów ton wody, co odpowiada masie $4\cdot10^{13}$ kg. Jest to największa masa przemieszczona w wyniku działalności inżynieryjnej człowieka. Szacuje się, że średnia głębokość zbiornika to 87,5 m, szerokość ok. 3 km, natomiast jego długość sięga 300 km.

Do wielkich budowli hydrotechnicznych należą też kanały Sueski i Panamski. Pierwszy z nich ma długość 163 km, średnią szerokość 530 m i głębokość 25 m. Dla drugiego odpowiednie wymiary to: 81,6 km, 49 m i 15 m. Szacunkowo, budowa Kanału Sueskiego mogła doprowadzić do przemieszczenia masy $3{,}24\cdot10^{12}$ kg, a Kanału Panamskiego $8{,}9\cdot10^{10}$ kg. Wdrążenie typowego chodnika o długości 1000 m w kopalni albo szybu o takiej samej głębokości i powierzchni przekroju poprzecznego 16 m^2, wymaga przemieszczenia masy $2{,}4\cdot10^{7}$ kg.

Przemieszczanie dużych mas związane jest również w budową tuneli komunikacyjnych. Najdłuższą sieć, wynoszącą 425 km, mają tunele metra w Szanghaju. Przy ich średniej szerokości 7 m i wysokości 4,5 m, zbudowanie tej sieci spowodowało usunięcie masy $1{,}87\cdot10^{10}$ kg. Interesującym obiektem podziemnym jest tunel największego akceleratora LHC (Large Hadrons Collider) w pobliżu Genewy. Ma on kształt pierścienia o obwodzie 27 km i średnicy przekroju poprzecznego 3,8 m. Jego wydrążenie wymagało usunięcia masy $3{,}6\cdot10^{8}$ kg.

Również budowa i eksploatacja gigantycznych maszyn i środków transportu powoduje przemieszczanie mas, przyczyniających się do wytwarzania anomalii grawitacyjnych. Najbardziej mywanymi statkami tzw. supertankowce. Jeden z nich – King Nawis miał masę $6{,}48\cdot10^{8}$ kg, długość 486 m, szerokość 50 m i zanurzenie 26,4 m. Masa ciężkiego pociągu towarowego to ok. $3\cdot10^{6}$ kg, ok. długość 750 m.

Masa największych ciężarówek używanych do przewozu gruntu na wielkich budowach i w kopalniach odkrywkowych osiąga $8{,}6\cdot10^{5}$ kg, a ich długość 20,6 m. Największa koparka przeznaczona do pracy w kopalni odkrywkowej, ma masę $7\cdot10^{6}$ kg i długość 206 m, zaś najcięższy dźwig samochodowy masę $3\cdot10^{5}$ kg i długość po złożeniu wysięgnika 26 m.

Polska, Bełchatów, Góra Kamieńsk

eprasa.pl 2e0409c816

W dziedzinie środków transportu lotniczego i kosmicznego najbardziej masywnymi obiektami są: zaprojektowany jeszcze w Związku Radzieckim samolot transportowy AN-225 o masie $6 \cdot 10^5$ kg i rozpiętości skrzydeł 88,4 m oraz rakieta Saturn V AS-501, używana m.in. do lotów na Księżyc w programie Apollo – jej masa wynosi $3{,}04 \cdot 10^6$ kg, długość 111 m, a średnica 10,5 m.

Oszacowanie wartości anomalii

Korzystając z parametrów scharakteryzowanych obiektów, należących do określonych wcześniej grup można wyznaczyć wartości przyspieszenia siły ciężkości Δg, *przyjęte* jako miara anomalii grawitacyjnych, które te obiekty powodują. Trzeba jednak zauważyć, że nawet w przypadku obiektów o kształcie, który można opisać jedną bryłą, jak czworościan foremny dla piramidy Cheopsa, występują niejednorodności. Są to korytarze i komory, obudowane z kamieniem o innej gęstości, niż reszta piramidy.

Dokładne obliczenia wymagałoby przycięcia wielu dodatkowych założeń. Dla budowli byłyby to wymiary elementów konstrukcyjnych i gęstość materiałów, z których je wykonano. Dla odkrywek górniczych konieczne byłyby mapy geologiczne złoża itd. Tak szczegółowe informacje nie są powszechnie dostępne i ich zdobycie, okazałoby się zbyt trudne dla uczniów. Dlatego szczegóły te zostaną pominięte i obliczenia zawarte w tym artykule będą przeprowadzone w oparciu o uproszczone modele. Skutkiem tego wyniki obliczeń należy traktować jako oszacowania odpowiednich wartości.

Do oszacowań zostaną przyjęte trzy modele aproksymacyjne. Pierwszy z nich będzie stosowany dla obiektów, których maksymalne wymiary (gabaryty, mierzone w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach i oznaczane literą a) są zbliżonej wielkości, np. piramidy Cheopsa. Model ten polega na zastąpieniu rzeczywistego obiektu przez masę punktową, umieszczoną w środku obiektu i równą jego całkowitej masie m. Zgodnie z tym modelem można napisać wzór

$$\Delta g = \frac{Gm}{r^2} \tag{1}$$

gdzie r – jest odległością od środka obiektu.

Drugi model będzie używany dla obiektów o wydłużonym kształcie, np. tunele i polega na zastąpieniu rzeczywistego obiektu przez walec o długości i masie takich samych jak ma je obiekt, przy czym promień walca r_w jest znacznie mniejszy od długości obiektu l *i nie wchodzi do obliczeń*. Model ten wyraża się wzorem [4]

$$\Delta g = \frac{Gm}{2\pi l r} \tag{2}$$

w którym: l – *oznacza długość obiektu,* r – *odległość od jego osi.*

W przypadku tunelu akceleratora LHC, mającego zamiast walca kształt okręgu, zostanie użyty cienki pierścień. Dla tego modelu

$$\Delta g = \frac{Gmh}{2\pi (R^2 + h^2)^{3/2}} \tag{3}$$

Chiny, Zapora Trzech Przełomów na rzece Jangcy

gdzie: R – *promień pierścienia,* h – *odległość od środka pierścienia liczona wzdłuż osi prostopadłej do jego płaszczyzny.*

Pierwszy model nazywany będzie modelem masy punktowej i oznaczany literą P, drugi – masy liniowej i oznaczany literą L, zaś model wykorzystujący cienki pierścień – modelem kołowym i oznaczany przez K. Przy takich założeniach wartości Δg *powinny być obliczane w odległości* r znacznie większej od gabarytów obiektu ($r >> a$), ponieważ wtedy szczegóły związane z kształtem i strukturą obiektu stają się nieistotne. Do oszacowań według modelu P przyjęto $r = 10\ a$, dla modelu L założono $r = 10\ r_w$, natomiast dla modelu K uwzględniono $h = R$.

Rezultaty obliczeń otrzymane przy tych założeniach zostały zamieszczone w tab. 1. Symbol grupy obiektu w tej tabeli jest taki sam jak w klasyfikacji obiektów, będących źródłami anomalii grawitacyjnych, podanej poprzedniej części tego artykułu. Znak minus występuje w przy anomaliach spowodowanych przez usunięcie masy, np. odkrywkach i tunelach. Dla porównania w końcowej części tab. 1 zamieszczono też anomalie grawitacyjne obliczone dla typowego domu jednorodzinnego o dwóch kondygnacjach i człowieka o przeciętnej masie 70 kg.

Podsumowanie i wnioski

Źródłem anomalii grawitacyjnych są obiekty wytworzone przez człowieka na skutek przemieszczenia dużych mas gruntu, wody lub materiałów budowlanych. Zgodnie z tab. 1 otrzymane z oszacowań wartości anomalii zwierają się w granicach $(0{,}01\text{-}1185) \cdot 10^{-8}$ m/s^2. Największą wartość anomalii wytwarza masa wody, spiętrzonej przez Zaporę Trzech Przełomów Jest to największa masa przemieszczona przez człowieka w wyniku jego działalności inżynieryjnej. Anomalia ta może być jeszcze większa dlatego, że w obliczeniach nie uwzględniono mas zapory i budynków hydroelektrowni.

Również wartości innych anomalii mogą okazać się znacznie większe w mniejszych odległościach od źródeł, ponieważ obliczenia wykonano na podstawie uproszczonych modeli, których nie można zastosować dla małych odległości. Celem porównania w tab. 2 zostały podane poprawki pochodzenia naturalnego do przyspieszenia siły ciężkości, które zawierają się w granicach $(1\text{-}150) \cdot 10^{-8}$ m/s^2.

eprasa.pl 2e0409c816

Tab. 1. Zestawienie wartości anomalii grawitacyjnych Δ*g*, oszacowanych dla reprezentatywnych obiektów.

Lp.	Grupa	Nazwa obiektu	Masa *m* [kg]	Gabaryt: *a*, r_w, *l* [m]	Model	Odległość *r* [m]	Anomalia Δ*g* [$\times 10^{-8}$ m/s^2]
1	AI1a	Piramida Cheopsa	$6\cdot10^{9}$	230	P	2300	7,46
2	AI1b	Wieżowiec Burdż Chalifa	$2{,}73\cdot10^{9}$	50 828	L	500	7,0
3	AI2	Góra Kamieńsk	$0{,}39\cdot10^{12}$	2170	P	$2{,}17\cdot10^{4}$	5,5
4	AI2	Wielki Mur Chiński	$0{,}54\cdot10^{12}$	6,5 $6{,}26\cdot10^{6}$	L	65	1,59
5	AI3	Odkrywka Szczerców	$1{,}08\cdot10^{12}$	≈ 1000	P	$\approx10^{4}$	–72,1
6	AI4	Krater po wybuchu jądrowym	$3{,}48\cdot10^{9}$	195 192	P	1950	–6,10
7	AI5a	Zalew Trzech Przełomów	$4\cdot10^{13}$	1500 $1{,}5\cdot10^{5}$	L	$1{,}5\cdot10^{4}$	1185
8	AI5b	Kanał Sueski	$3{,}24\cdot10^{12}$	138,8 $1{,}63\cdot10^{5}$	L	1388	–15,2
9	AI5b	Kanał Panamski	$8{,}9\cdot10^{10}$	32 $0{,}82\cdot10^{5}$	L	320	–3,6
10	AII6a	Szyb kopalni	$2{,}4\cdot10^{7}$	2,26 1000	L	22,6	–3,6
11	AII6a	Chodnik kopalni	$2{,}4\cdot10^{7}$	2,26 1000	L	22,6	–3,6
12	AII6b	Tunele metra w Szanghaju	$2\cdot10^{10}$	3,13 $4{,}25\cdot10^{5}$	L	31,3	–3,21
13	AII6d	Tunel akceleratora LHC	$3{,}6\cdot10^{8}$	1,9 4500	K	4500	–0,02
14	B1a	Koparka odkrywkowa Bagger 293	$7\cdot10^{6}$	206	P	2060	0,01
15	B1b	Dźwig Libbher LTM 11200-9.1	$0{,}3\cdot10^{5}$	26	P	260	0,03
16	B1c	Ciężarówka Biełaz 75710	$8{,}6\cdot10^{5}$	20,6	L	206	0,13
17	B1d	Ciężki pociąg towarowy	$3\cdot10^{6}$	2 750	L	20	0,21
18	B2a	Supertankowiec TT Kick Nawis	$6{,}48\cdot10^{8}$	34,4 458	L	344	0,44
19	B3a	Samolot An-225 Mrija	$6\cdot10^{5}$	88,4	P	884	0,0028
20	B3b	Rakieta Saturn V AS-501	$3{,}04\cdot10^{6}$	5,05 111	L	50,5	0,58
21	—	Dom jednorodzinny	$3{,}55\cdot10^{5}$	15	P	150	0,16
22	—	Człowiek	70	1	P	10	0,028

Tab. 2. Najważniejsze poprawki pochodzenia naturalnego do wartości przyspieszenia ziemskiego *g*.

Lp.	Przyczyna i nazwa poprawki	Wartość [$\times 10^{-8}$ m/s^2]
1	Wpływ Księżyca i Słońca (lunosolarna)	< 150
2	Pływy pionowe (pionowego ruchu mas wód oceanów i mórz)	≈ 1
3	Zmiana położenia osi obrotu Ziemi (ruchu biegunów)	≈ 4
4	Zmiany ciśnienia atmosferycznego (atmosferyczna)	≈ 10
5	Zmiany wysokości (redukcji wysokościowej)	≈ 300/m

Warto też dodać, że zmiana przyspieszenia ziemskiego na szczycie Mount Everest, obliczona z uwzględnieniem poprawki podanej w tab. 2 wynosi $-2{,}73\cdot10^{-6}$ m/s^2.

Jedne z największych anomalii grawitacyjnych powodują odkrywki w kopalniach węgla brunatnego. Wartość bezwzględna jednej z takich anomalii, powodowanej przez odkrywkę Szczerców, zajmuje drugie miejsce wśród wyników podanych w tab. 1 i stanowi 48% poprawki lunosolarnej. Na wielkość anomalii ma wpływ nie tylko sama wartość masy, ale również jej rozkład przestrzenny i odległość od obiektu.

Wśród obiektów o porównywalnej masie większe anomalie powodują obiekty o strukturze zwartej. Jest to widoczne na przykładzie wyników w tab. 1, otrzymanych m.in. dla tunelu akceleratora LHC i supertankowca King Nawis. Z kolei obiekty o mniejszej masie, ale bardziej zwarte, wytwarzają w danej odległości większe anomalie niż obiekty bardziej masywne, ale rozciągłe, których masa jest rozłożona we większej objętości.

Pomiary anomalii grawitacyjnych, spowodowanych działalnością człowieka mają istotne znaczenie dla zwiększenia dokładności pomiarów geodezyjnych, a także dla prognozowania ewentualnych ruchów gruntu, powstawania lejów depresyjnych i zapobiegania szkodom górniczym. Teledetekcja i telemetria tych anomalii, np. z pokładów satelitów lub statków powietrznych (samolotów, dro-

eprasa.pl 2e0409c816

Największy statek pasażerski Symphony of the Seas

nów), ma ważne znaczenie praktyczne również w dziedzinie militarnej, m.in. dla kontroli prób z bronią jądrową, czy rozbudowy podziemnych obiektów wojskowych.

Anomalie grawitacyjne mogą mieć także niekorzystny wpływ na dokładność funkcjonowanie satelitarnych systemów pozycjonowania GPS (Global Positioning System) i nawigacji GNSS (Global Navigation Satellites System). Powodem tego są zmiany geometrii przestrzeni i zakrzywienia kierunku propagacji fal elektromagnetycznych, spowolnienie upływu czasu (efekt Shapiro) i przesunięcie fazowe oraz deorbitacja konstelacji satelitów. Są to efekty o potencjalnym znaczeniu, które wymagają dalszych, szczegółowych badań.

Podstawowe role dla wykrywalności i pomiarów rozpatrywanych anomalii spełniają czułość grawimetrów oraz ich mała masa i łatwa eksploatacja. Obecnie najbardziej czułe i produkowane seryjnie są grawimetry, wykorzystujące lewitację nadprzewodnika w polu magnetycznym. Ich czułość jest rzędu 10^{-11} m/s^2 [42]. Niestety mają one kilka wad – są to: duża masa i rozmiary, wysoka cena oraz konieczność pracy w temperaturze ciekłego helu, czyli ok. –269°C.

Wymienione wady ograniczają dostępność i mobilność tych przyrządów. Projektowane są ultraczułe grawimetry, wykorzystujące zjawisko interferencji światła, oscylacje miko- i nanobelek oraz zjawiska kwantowe, takie jak efekt tunelowy i zmiany w kondensacie Bosego-Einsteina [5]. Budowa tych instrumentów prawdopodobnie przyspieszy rozwój grawimetrii i mikrograwimetrii oraz zwiększy wykrywalność i dokładność pomiaru anomalii. Przewiduje się m.in. możliwość pomiaru anomalii grawitacyjnych, wytwarzanych przez obiekty o masie pojedynczego człowieka przy użyciu grawimetrów, w których będzie zastosowany kondensat Bosego-Einsteina.

Przenośne, lekkie i tanie w eksploatacji grawimetry pozwolą też na monitorowanie zmian anomalii grawitacyjnych w czasie. Np. podczas eksploatacji kopalni odkrywkowej w Bełchatowie wydobywa się rocznie ok. $5\cdot10^{10}$ kg węgla brunatnego. Odpowiada temu zmienianie się anomalii grawitacyjnej, mierzonej w odległości 10 km, o ok. $-3{,}34\cdot10^{-8}$ m/s^2 w czasie jednego roku. Szczególna cecha siły grawitacji, odróżniająca ją np. od siły magnetycznej, polega na tym, że jest ona zawsze przyciągająca. Dlatego nie można usunąć zmian przyspieszenia siły ciężkości, bez zmiany rozkładu przestrzennego masy. Przez co zmiany tego rozkładu mogą być zawsze wykryte odpowiednio czułym przyrządem, dając niezwykle wnikliwe możliwości badawcze.

W najbliższych latach należy spodziewać się wzrostu wielkości i znaczenia anomalii grawitacyjnych, powodowanych przez działalność człowieka. Będzie to spowodowane rozwojem techniki i realizacją projektów na skalę globalną. Jednym z nich jest budowa gigantycznych, podziemnych zbiorników do magazynowania CO_2 w celu ograniczenia efektu cieplarnianego. Planuje się też budowę nowego akceleratora FHC (Future Hadron Collider), umieszczonego w tunelu o długości 100 km.

Rozwój miast ma doprowadzić do utworzenia supermetropolii, zamieszkałych przez setki milionów ludzi i zajmujących tereny o rozmiarach ponad 100 km. Przy gęstej i wysokiej zabudowie na takich terenach niezbędne będzie uwzględnianie tzw. poprawki urbanistycznej do przyspieszenia ziemskiego. Realizacja wspomnianych projektów może doprowadzić również do skutków na skalę globalną, które obecnie trudno jest dokładnie przewidzieć. Dla przykładu, całkowite napełnienie wodą zbiornika przed Zaporą Trzech Przełomów spowodowało zmianę orientacji osi obrotu Ziemi i spowolnienie jej rotacji o 0,06 μs na dobę.

Podobny efekt w skali globalnej wywołany działalnością człowieka zaobserwowano prawdopodobnie tylko jeszcze jeden raz. Miało to miejsce po zdetonowaniu przez Związek Radziecki bomby termojądrowej o największej energii (ok. 58 Mt), znanej jako „Car Bomba". Podczas tego wybuchu, przeprowadzonego 21 października 1961 r., zaobserwowano nieznaczne wahnięcie osi obrotu Ziemi.

Ciekawostką jest też fakt, że po uruchomieniu akceleratora LHC stwierdzono niespodziewane, okresowe zmiany ilości protonów, biorących udział w zderzeniach. Okazało się, że jest to spowodowane odkształceniami terenu, na którym znajdował się tunel akceleratora. Odkształcenia powodowała siła grawitacji między Ziemią i Księżycem. Jej wartość zmienia się z okresem około miesiąca, odpowiadającym obiegowi Księżyca wokół Ziemi i jest odpowiedzialna również za występowanie pływów i związaną z tym poprawkę do przyspieszenia ziemskiego.

Stanisław Bednarek
Uniwersytet Łódzki, Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej

LITERATURA

[1] Z. Fajklewicz, Grawimetria stosowana, Wydawnictwa Akademii Górniczo-Hutniczej, Kraków 2007.
[2] S. Bednarek, Anomalia grawitacyjna w Karpaczu – fikcja czy rzeczywistość, „Fizyka w Szkole z Astronomią, Czasopismo dla Nauczycieli", Nr 1 (354), Rocz. LXIII, s. 9-13, 2018 r.
[3] S. Bednarek, Kłopotliwe pytania Jasia, Grawitacja pod ścianą, „Fizyka w Szkole z Astronomią, Czasopismo dla Nauczycieli", Nr 3 (356), Rocz. LXIII, s. 16-20, 2018 r.
[4] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, Fundamentals of Physics Part 3, John Wiley & Sons Inc, New York, 2001.
[5] A. Semberg (red.), Sukcesy polskich fizyków w badaniach nad kondensatem Bosego-Einsteina. „Postępy Fizyki", Nr 2, s. 2-3, 2019 r.

eprasa.pl 2e0409c816

Kartka z kalendarza

220 lat elektrochemii

Zbigniew **Wiśniewski**

Fot. 1. Alessandro Volta (1745-1827)

Na początku marca 1800 roku, czyli dokładnie 220 lat temu, Alessandro Volta, włoski fizyk i wynalazca, przeprowadził jeden z najważniejszych eksperymentów w dziedzinie elektryczności. Otóż skonstruował on pierwsze elektrochemiczne źródło prądu stałego.

Wynalazek ten umożliwił rozwój badań nad przepływem prądu. Po pierwsze, naukowcy uzyskali pierwsze źródło dające w miarę niezmienną wartość natężenia przez długi czas. Po drugie, odkrycie to zwróciło uwagę na procesy przepływu prądu w roztworach, co stanowiło początek elektrochemii. Co prawda znane już były maszyny elektrostatyczne, ale po pierwsze miały one inną charakterystykę czasową a ponadto całkowita energia zgrupowana w maszynie była niewielka. Wynalazku tego Volta dokonał próbując wyjaśnić zjawisko kurczenia się mięśni żaby pod wpływem przepływu prądu.

Elektrochemia stanowi element nauki łączący w sobie najpełniej chemię i fizykę. Aby opisać procesy elektrochemiczne, będące wynikiem fizycznego zjawiska jakim jest przepływ prądu używa się pojęć typowych dla chemii, takich jak wartościowość czy masa molowa.

Fot. 2. Ogniwo Volty, źródło https://commons.wikimedia.org/wiki/File:VoltaBattery.JPG, autor GuidoB,

Źródło Volty składało się z krążków. Jak pisze on w swoim liście wysłanym do Josepha Banksa, prezesa Towarzystwa Królewskiego w Londynie na krążku srebrnym kładł on krążek cynkowy. Następnie kładł wilgotną bibułę, a na niej znów krążek srebrny a potem cynkowy. W ten sposób uzyskał stos. Podłączając do niego przewodniki uzyskał pierwotną baterie elektryczną.

Z czasem, z przyczyn ekonomicznych srebro zaczęto zastępować miedzią. Jedną z ważniejszych obserwacji jakie poczynił Volta było, że napięcie na krańcach stosu nie zależy od wielkości krążków a jedynie od ich liczby. W samym opisie działania stosu Volta założył, że ciecz między elektrodami nie jest istotna, a pełni jedynie rolę medium ułatwiającego kontakty między metalami. Nie jest to w pełni prawdą.

Druga obserwacja była już całkowicie błędna. Otóż twierdził, że otrzymał niewyczerpane źródło energii. Nie jest to prawdą, ale zasada zachowania energii była wówczas nieznana. Nie dostrzegł najwyraźniej też procesu niszczenia blaszek.

Po zapoznaniu się z pracą Volty dwóch innych naukowców, William Nicholson i Anthony Charsile przeprowadzili pierwszą elektrolizę wody. Po prostu końcówki stosu Volty zanurzyli do wody, która najprawdopodobniej nie była zbyt czysta i zaobserwowali, że na obu końcówkach pojawiały się bąbelki gazu. Na jednej końcówce był to tlen, a na drugiej wodór.

Doświadczenie to należy do tych eksperymentów, które stosunkowo łatwo powtórzyć w praktyce szkolnej. Warunkiem jego powodzenia jest, aby napięcie między elektrodami było wyższe od 2.1 V.

Innym bardziej spektakularnym osiągnięciem było otrzymanie „długo żyjącego" i długiego łuku elektrycznego. W 1800 roku Humphry Davy otrzymał stabilny łuk elektryczny o długości 15 cm. To osiągnięcie z kolei otworzyło drogę do pierwszych lamp elektrycznych, w których wykorzystywano właśnie łuk elektryczny. Potem przyszła era lamp żarowych, ale to temat na zupełnie inną opowieść. Opowieść, która przynajmniej raz została opowiedziana na łamach „Fizyki w Szkole"

Wkrótce jasny stał się potencjał nowej technologii do wytrącania pierwiastków z roztworu. Już w 1807 roku Humphry Davy użył wspomnianej metody do odkrycia potasu. Następnie przyszła kolej na bar, stront, magnez i wapń. Davy odczuwał potrzebę budowy wielkich baterii. W roku 1808 pod jego kierunkiem skonstruowano wielką baterię z ponad 2000 ogniw o całkowitej powierzchni 82,6 m^2, której użyto do eksperymentów z elektrycznym topieniem metali. W ten sposób zapoczątkowano nową gałąź metalurgii. Taką metodę używa się do dziś np. do otrzymywania bardzo czystej miedzi.

eprasa.pl 2e0409c816

Humphry Davy wyjaśnił też jakościowy procesu powstawania prądu w ogniwie jako reakcji między metalem a solami w elektrolicie. Zaobserwował też, że napięcie na końcu stosu rośnie wraz z ilością elementów zaś natężenie rośnie wraz z ich powierzchnią.

Ilościowe podstawy elektrochemii opublikował w 1832 roku Michael Faraday, wychowanek Davy'ego. Stwierdził on, że ilość materii wydzielanej na elektrodach jest proporcjonalna do ilości prądu, która przepływa przez określoną ilość substancji. Prawo to ma obecnie postać m = Itk, gdzie k nosi nazwę równoważnika elektrochemicznego, t – czas. Czasami prawo to było podawane w szkole w postaci m = kIt, która to postać jest bez wątpienia łatwiejsza do zapamiętania przez uczniów. Drugie prawo określało wartość współczynnika k =μ/nF. W praktyce szkolnej prawo to było przez uczniów mylone z prawami indukcji Faraday'a.

Kolejnym krokiem milowym w rozwoju elektrochemii było zbudowanie w 1859 r. przez Gastona Plante bardzo popularnego do niedawna akumulatora ołowianego. Jak większość z Państwa wie, akumulator to urządzenie, które po wyczerpaniu można ponownie naładować. Urządzenia takie noszą nazwę ogniw drugiego rodzaju, w odróżnieniu do ogniw nieodwracalnych noszących nazwę ogniw pierwszego rodzaju. Są jeszcze ogniwa paliwowe, do których elektrolit dostarcza się w sposób ciągły. Ich praktycznym zastosowaniem są m.in. tzw. samochody na wodór.

Istotną nowością w dziedzinie ogniw jest opracowane w 1866 roku tak zwane ogniwo Leclanchègo zwane ogniwem cynkowo-węglowym. Składa się ono z pręta grafitowego otoczonego warstwą sproszkowanego dwutlenku manganu zmieszanego z grafitem. Elektrolitem w tym ogniwie był roztwór chlorku amonu. Kolejną zewnętrzna warstwą był cynk pełniący funkcje katody. W roku 1868 wyprodukowano ponad 20 000 ogniw tego typu na potrzeby europejskiego systemu telegraficznego. Obecnie te ogniwa są sprzedawane jako baterie paluszki. W 1886 roku Carl Gassner udoskonalił te ogniwa wypełniając ich wnętrze skrobią otrzymując w ten sposób suche ogniwo.

Fot 3. Humphry Davy (1778 -1829)

Fot. 4. 1791 -1867. https://pl.wikipedia.org/wiki/Michael_Faraday

Przedstawione typy ogniw nie wyczerpują oczywiście wszystkich możliwości. Jednym z ciekawszych rozwiązań są ogniwa metal-powietrze, gdzie metal pełni rolę anody a tlen zawarty w powietrzu pełni rolę katody. Na skalę przemysłową takie ogniwa zaczęto wykorzystywać w latach trzydziestych XX wieku do zasilania sygnalizacji kolejowej. Jako metalu używano cynku.

Prawdziwą rewolucję w dziedzinie baterii przeżyliśmy w ostatnich latach, kiedy to wprowadzono baterie z anodą litową, co pozwoliło znacząco odchudzić baterie. W bateriach tych można stosować tylko elektrolity niewodne, najczęściej polimery. Jednym z ważniejszych zastosowań baterii litowych jest medycyna w tym rozruszniki serca.

Elektrochemia to jednak nie tylko ogniwa elektryczne. To również metoda otrzymywania materiałów. Jest ona stosowana zarówno w syntezie organicznej jak i metalurgii. Na przykład witaminę C otrzymuje się poprzez elektrolizę ropy naftowej.

Za moich szkolnych lat prawa elektrolizy Faradaya były obecne w programie nauczania zarówno fizyki jak i chemii. Obecnie są one głównie wykładane na zajęciach z chemii. W mojej ocenie jest to wadą, ponieważ brak informacji o procesach elektrochemicznych na lekcjach fizyki stanowi istotną lukę w nauce wiedzy o prądzie.

LITERATURA

[1] Andrzej Kajetan Wróblewski. „Historia fizyki", Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2006

[2] Andrzej Czerwiński. „Akumulatory, Baterie, Ogniwa", Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005

[3] Aleksander Ciszewski. „Technologia chemiczna. Procesy elektrochemiczne" Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2008

Cztery i pół stanów skupienia. Część III

Ciecze

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

Dwugłos o wodzie i cieczach. Trzecia, po plazmie i gazach, część serii o stanach skupienia.

Przemyślenia Kasi

– nauczycielki (w dużym skrócie):

Mówimy ciecze, myślimy woda. To całkiem naturalne, woda pokrywa ponad 70% powierzchni naszej planety. Jest jedną z najbardziej rozpowszechnionych substancji. H_2O (monotlenek diwodoru), prosty związek chemiczny, dwa atomy wodoru i jeden atom tlenu. Mamy trzy atomy w cząsteczce, a jaka siła w niej drzemie. Dzięki temu, że atomy łączą się za pomocą wiązania kowalencyjnego spolaryzowanego, cząsteczka wody ma charakter polarny. Dodatkowo między cząsteczkami tworzą się wiązania wodorowe. W jakim stopniu obecne wiązania wodorowe oraz polarność cząsteczek ma wpływ na zaskakujące właściwości wody, tj. anomalną rozszerzalność wody?

– Tak, Pani Kasiu, ma Pani rację – bez wody nie byłoby życia na Ziemi i jest jej, przynajmniej patrząc na globus – mnóstwo. Kopernik w swej pracy pierwsze pytanie jakie zadaje dotyczy grawitacji „dlaczego woda nie spływa z powierzchni kuli ziemskiej?" I zaraz odpowiada: „bo woda zapełnia wszelkie zapadliny w powierzchni ziemi." Woda zajmuje aż 70% powierzchni Ziemi, ale objętościowo (i wagowo) nie jest wcale tak wiele: 0,023% masy Ziemi, a jeśli odliczymy tę słoną, pozostaje jedynie 0,00006%, z czego większość zamrożona w lodowcach. Ale bez wody nie ma życia – znamy ponad 4 tys. planet krążących wokół różnych gwiazd, ale woda jest tylko na Wenus (w postaci pary), na Ziemi i na Marsie (w postaci czap polarnych); być może jeszcze w postaci zmrożonych oceanów na Ganimedesie [1], jednym z satelitów Jowisza. We wrześniu 2019 r. odkryto obecność pary wodnej na jednej z planet poza Układem Słonecznym – odkrycie na miarę Nagrody Nobla.

W kwestii wiązań chemicznych też ma Pani rację, ale tylko tak do połowy. Klasyfikacja wiązań na kowalencyjne, jonowe, wodorowe itd. przypomina dowcip o chińskiej klasyfikacji psów: „psy dzielą się na domowe, brązowe, małe, wypchane i te posiadane przez cesarza" [2]. Podana przez Panią Kasię klasyfikacja wiązań chyba nie została stworzona przez fizyków: dla fizyków siły oddziaływania dzielą się na 1) elektro-magnetyczne, 2) grawitacyjne i 3) inne, np. tzw. „silne" – w jądrze atomowym polegające na wymianie pionów (tzn. mezonów π) między protonami i neutronami a w samych protonach polegające na wymianie gluonów między kwarkami [3]. W chemii wszystkie wiązania są elektro-magnetyczne.

W cząsteczce O_2 dwa atomy „uwspólniają" najbardziej zewnętrzne elektrony – krążą one dookoła obu atomów i jakiś czas znajdują się między dwoma chwilowo ogołoconymi z nich jonami O^+: więc „wiążą" te dwa atomy. W cząsteczce wody elektrony wiążące (z tzw. orbitali molekularnych) więcej czasu spędzają w okolicach atomu tlenu, więc wiązanie nazywamy „przesuniętym", czyli spolaryzowanym. Z kolei wiązanie wodorowe, to podobne „uwspólnienie" protonu – cząstki o takiej samej wartości ładunku tylko cięższej: siłą rzeczy wiązanie słabsze, ale o zasadniczych znaczeniu dla stabilności DNA. Ale jak powstają orbitale molekularne z atomowych, jakie wiązania są najsilniejsze, jak to wpływa na własności kryształów – to tematy obszerne i pozostawimy je na kolejny artykuł.

Rozszerzalność termiczna

Anomalia rozszerzalność termiczna wody jest absolutnie niezbędna dla życia na Ziemi: nawet w czasie globalnych zlodowaceń prawie całego globu, np. 600 mln lat temu [4], życie przetrwało pod skorupą lodu. Wyjaśnienie, skąd się ta anomalia bierze – tzn. dlaczego cząsteczki wody w fazie ciekłej w 4ºC są gęściej upakowane niż w lodzie (w temperaturze 0º) jest również kluczem

eprasa.pl 2e0409c816

Tabela 1. Współczynniki rozszerzalności termicznej (objętościowej) wybranych cieczy i ciał stałych w temperaturze pokojowej. Źródło danych: Wikipedia i [5].

Substancja	Temperatura topienia (°C)	Temperatura wrzenia (°C)	Współczynnik rozszerzalności objętościowej α (10^{-6}/K)
Alkohol etylowy	– 114	78	1100
Octan etylu	-83	77	1380
Woda	0	100	210
Rtęć	-38,83	356,7	181
Ołów	328	1750	87
Żelazo	1535	2750	33,3
Molibden	2620	4800	14,4

do zrozumienia różnicy między fazą ciekłą a stałą. Ale to wyjaśnimy dopiero na końcu artykułu.

O ile faza gazowa i ciekła zasadniczo się różnią – odległościami między atomami, to odległości między atomami (cząsteczkami) w fazie ciekłej i stałej są podobne: obie te stany skupienia są *gęsto* upakowane. W obu stanach rozszerzalność termiczna jest niewielka, choć większa dla cieczy, a szczególnie dla wody. Dzięki temu od czasów Galileusza budowane są termometry cieczowe.

Jak widać z tabeli dla ciał stałych, im niższa temperatura topnienia, tym większy współczynnik rozszerzalności; dla cieczy – im niższa temperatura wrzenia tym większa rozszerzalność. Co więcej, współczynnik rozszerzalności dla danej substancji rośnie z temperaturą: im bliżej temperatury wrzenia, tym ruch termiczny cząsteczek/ atomów narasta – siły wzajemnego przyciągania maleją i rozszerzalność rośnie. Odnajdujemy w zjawisku rozszerzalności termicznej cieczy i ciał stałych tę samą atomową strukturę materii, jaka objawia się w prawach gazu, choć nie tak „doskonałą".

Znany szkolny wzór na przyrost objętości przy przyroście temperatury o ΔT

$$V(T) = V_0(1 + \alpha\,\Delta T) \qquad (1)$$

jest więc tylko przybliżeniem (V_0 jest objętością w temperaturze T_0, V – objętością w temperaturze T, gdzie $\Delta T = T\text{-}T_0$). I dla rozszerzalności liniowej $l(T)$ i objętościowej $V(T)$ rzeczywiste wzory są skomplikowane: przedstawiamy jest w postaci szeregu o składnikach zależnych od wyższych potęg przyrostu temperatury, chociaż poprawki wyższego rzędu są zazwyczaj niewielkie:

$$l(T) = l_0\,[1 + \lambda_1\,\Delta T + \lambda_2\,(\Delta T)^2 + \ldots] \qquad (2)$$

Dodajmy, że między współczynnikami (liniowymi) rozszerzalności objętościowej i liniowej zachodzi związek $\lambda_1 = 3\alpha$. Logiczne, bo objętość to iloczyn wymiarów w trzech kierunkach, ale bezpieczniej jest to sprawdzić.

$$V(T) = l(T)^3 = l_0^3\,(1 + \lambda\,\Delta T)^3 = l_0^3\,[1 + 3\lambda\Delta T) + 3(\lambda\,\Delta T)^2 + (\lambda\,\Delta T)^3]. \qquad (3)$$

Ponieważ współczynnik α jest mały (niewiększy niż 10^{-3}/K), jego kwadrat i sześcian są pomijalnie małe. Mamy więc

$$V(T) = l_0^3\,[1 + 3(\lambda\,\Delta T)] = V_0\,(1 + \alpha\,\Delta T), \text{ czyli } \alpha = 3\lambda \qquad (4)$$

Rozszerzalność termiczną cieczy odkrył Galileusz w 1603 roku, kiedy był profesorem matematyki w Padwie.

Rys. 1. Co jest prawdziwym termometrem Galileusza? (a) Czy pływające w nafcie, odpowiednio wyważone szklane bańki? Galileusz odkrył rozszerzalność termiczną cieczy, ale termometr z bańkami skonstruował dopiero jego uczeń Toricelli. Ta „zabawka" została zaprojektowana w Science Museum w Londynie, w 1990 roku. (b) Czy dwa naczynia połączone rurką, tzw. termoskop Galileusza, jak ten eksponat w Londynie? (c) Czy długa poskręcana rurka z wodą jak rekonstrukcja w Muzeum Galileusza we Florencji? (d) Czy „termometr miłości" ze zbiorów „Fizyki zabawek"? Źródło: GK, [7].

Termometry „Galileusza"

Termometrem Galileusza [6] jest nazywana „zabawka" przedstawiona na rys. 1a: pływające szklane bańki w cieczy o dużej rozszerzalności termicznej, jak np. nafta (heptan, $\alpha = 1{,}24\text{x}10^{-3}$/K). Kiedy temperatura się podnosi, gęstość cieczy się zmniejsza (a objętość baniek pozostaje praktycznie niezmieniona), więc bańki z odpowiednimi obciążnikami zaczynają tonąć. Podobno tego typu termometr skonstruowali dopiero uczniowie Galileusza, m.in. Ewangelista Torricelli, twórca barometru rtęciowego.

Termometr Galileusza, pokazany w Muzeum Nauki w Londynie jest inny: dwie bańki z wodą połączone długą rurką, rys. 1b. Galileusz zauważył, że gdy przytrzymamy ręką dolną bańkę, poziom cieczy w rurce podnosi się. Nazwał to urządzenie termoskopem.

W Muzeum Nauki we Florencji, im. Galileusza jest jeszcze inny termometr – długa i poskręcana rurka z wodą, z całym mnóstwem znaczników, rys. 1c. Ale woda okazała się niepraktyczna w termometrach. Dopiero w 1710 roku Fahrenheit, gdańszczanin z urodzenia, Holender z wyboru, zastąpił wodę rtęcią i stworzył termometr, stosowany aż do czasów współczesnej elektroniki.

Woda nie jest stosowana w termometrach, gdyż jej współczynnik rozszerzalności termicznej silnie rośnie znacznie w miarę zbliżania się do temperatury wrzenia: z $207\text{x}10^{-6}$/K w 20ºC do $457\text{x}10^{-6}$/K w 50ºC i $640\text{x}10^{-6}$/K w 80ºC. Dla rtęci, mimo, że wzór na rozszerzalność zawiera składniki wyższe niż liniowe, współczyn-

eprasa.pl 2e0409c816

nik pozostaje prawie stały między 0, 100 a 200ºC (181,3; 181,7 i 183,9x10^{-6}/K, odpowiednio [8]). W termometrach rtęciowych wykreślenie skali jest więc bardzo proste, czego nie można powiedzieć o termometrze wodnym.

Czy termoskop Galileusza był już termometrem? Autorzy podejrzewają, że to nie ciecz się rozszerzała pod wpływem ciepła dłoni, ale gaz zawarty nad cieczą. Albo jeszcze dokładniej: zwiększało się ciśnienie pary nasyconej nad cieczą (bo rosło parowanie cieczy) i to ciśnienie pary nasyconej wypychało ciecz do góry. Tak działa „termometr miłości" z naszych (realnych i wirtualnych) zbiorów „Fizyki zabawek" [9]. Oczywiście, potrzebna jakaś ciecz dość „lotna", tzn. o niskiej temperaturze wrzenia, jak eter dietylowy, $(C_2H_5)_2O$.

Zadanie: Spróbuj samodzielnie skonstruować termoskop Galileusza i wyskaluj go, korzystając z innego termometru.

Rys. 3. Porządek strukturalny w cieczach: położenie atomów wodoru (niebieskie kontury) w cząsteczkach wody otaczających centralną drobinę H_2O („misiek z białymi uszyma"). Pomiędzy trzema cząsteczkami ułożona jest czwarta, poprzecznie – modelowanie metodami chemii kwantowej [10], rok 1994.

Ciecze i naczynia

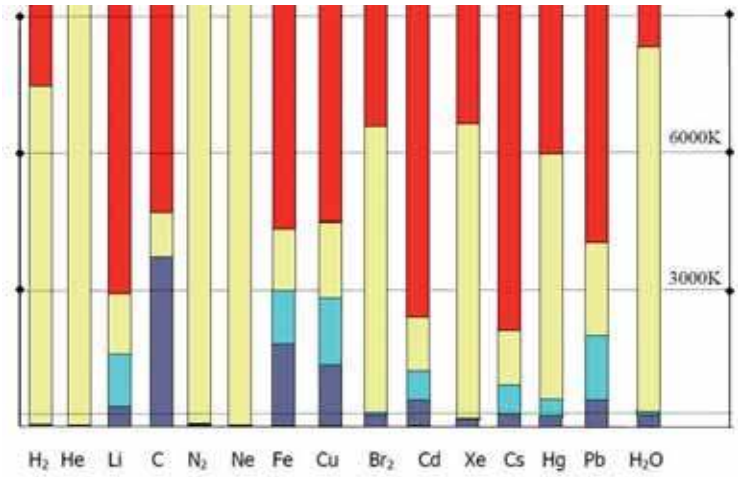
Jako cechę charakterystyczną ciekłego stanu skupienia podaje się brak określonego kształtu – ciecze (w polu grawitacyjnym, jak to pisał Kopernik) przyjmują kształt naczynia, zob. rys. 2. Ciała stałe mają własny kształt, gdyż atomy (cząsteczki) są w nich ułożone w ściśle określonych odległościach i pozycjach. Jeśli dodatkowo są to ciała o strukturze krystalicznej, jak sól NaCl, kwarc, SiO_2, czy wszystkie metale, te pozycje można opisać wzorami matematycznymi. Cząsteczki cieczy mogą się natomiast przemieszczać.

Rys. 2. Pelugo (Trentino), kościół św. Antoniego Opata, Jaki błąd popełnił ten średnio-wieczny malarz? A może to nie wino a krew? Źródło: Spis telefonów Telecom Italia.

Nie oznacza to, że w fazie ciekłej nie ma żadnego uporządkowania: fizycy, specjaliści od promieniowania rentgenowskiego (a właściwie synchrotronowego) i rozpraszania neutronów szukają uporządkowania, choćby bliskiego zasięgu. Wspomagają ich chemicy kwantowi. Okazuje się, że cząsteczki wody układają się w swego rodzaju struktury, rys. 3. Dziś wiemy, że struktury uporządkowania w ciekłej wodzie mogą być bardziej skomplikowane (o tym pod koniec artykułu). Ale rys. 3 pozostaje aktualny: w podobny sposób wygląda rozpuszczanie w wodzie np. soli – jony otaczane są przez „powłoki" cząsteczek wody.

Dlaczego jest tak mało cieczy w tablicy Mendelejewa?

Pytanie powinno brzmieć: „dlaczego jest tak mało cieczy w temperaturze pokojowej?" A odpowiedź jest natychmiastowa: „A co to jest temperatura pokojowa?" Otóż taka, że woda pozostaje w niej ciekła. O właśnie! Wszystkie pierwiastki (z wyjątkiem helu) w odpowiednio niskich temperaturach przechodzą w stan stały, w odpowiednio wysokich – gazowy, a jeszcze wyższych - w plazmę. Zakres temperatur „pokojowy" jest niewielki – stąd też tylko rtęć i brom pozostają ciekłe. Gdyby temperatura pokojowa wynosiła 27ºC to ciekły byłby cez, gdyby 40ºC – również rubid, a 64ºC - potas. Z kolei „gazy" pozostają cieczami w niewielkim zakresie, bardzo niskich temperatur: H_2 między 14-20 K, Ne 24,6-27 K, N_2 63-77 K, Xe 161-165 K (używamy zarówno skali Celsjusza jak Kelvina, dla pozyskania dydaktycznej obrazowości). Jak pokazujemy na rys. 4 zakres „pokojowy" 0º-100ºC jest na



Rys. 4. Stany skupienia wybranych pierwiastków i zakres temperaturowy ich występowania. Ciemno-niebieski- ciała stałe, modry – ciecze, żółty – gazy, czerwony – plazma. Przejście do plazmy jest umowne – przyjęliśmy 1/20 energii jonizacji. Dla węgla – pokazana faza grafitu. Pokazujemy 5 „gazów", 3 „ciecze" (Br, Hg i H_2O) i 7 „ciał stałych". Źródło danych: wikipedia.
Cieczy jest w układzie Mendelejewa mnóstwo lit, żelazo, miedź, kadm, ołów - tylko nasz zakres temperatur „pokojowych" jest bardzo wąski (linia kropkowana nisko na wykresie). Temperatura powierzchni Słońca to 5800 K, wewnątrz jest 15 mln K

eprasa.pl 2e0409c816

skali temperatur bezwzględnych rzeczywiście niewielki, wręcz trudny do zauważenia.

Jest jeszcze kwestia siły wiązań (i ich kierunkowości). Ciecz to faza *skondensowana*, ale nieuporządkowana. Orbitale *s*, dla Cs, Rb, K (i He) te najbardziej zewnętrzne, nie są ukierunkowane (są sferycznie symetryczne). Orbitale *p* – są ukierunkowane. Stąd węgiel, z trzema elektronami na orbitalach *p*, każdy w innym kierunku, tworzy bardzo silne, ukierunkowane, kowalentne wiązania: nie topi się, ale bezpośrednio, w 3915 K, sublimuje. Hel natomiast (^{4}He) pod ciśnieniem normalnym (tj. atmosferycznym) nie zamarza, a poniżej 2,17 K przechodzi w stan nadciekły.

Woda zimą: dlaczego lód jest śliski?

W wielu różnych podręcznikach można znaleźć wyjaśnienie, że jazda na łyżwach jest możliwa, bo pod ostrzem łyżwy, wskutek wysokiego ciśnienia, lód topi się i łyżwiarz ślizga się po cienkiej warstwie lodu. Wyjaśnienie, z końca XIX wieku, pochodzi od wybitnego fizyka Osborna Reynoldsa (nazwisko jeszcze się pojawi), ale rodzi szereg wątpliwości: narty (ani sanki) nie wywierają tak dużego ciśnienia na powierzchnię lodu (czy śniegu) a mimo to jazda jest możliwa. A w trakcie szybkiej jazdy na łyżwach lód zdąży się stopić pod płozą? A jeśli zamarznie, to przecież łyżwa się przyklei.

Wyjaśnienie Reynoldsa to przykład kilku podobnych „kołaczących się", czyli niesprawdzonych wyjaśnień w dydaktyce fizyki, jak zasysanie wody po zgaśnięciu świeczki w słoiku („wypalił się tlen"), czy pytanie, jaki obraz powstaje, jeśli przysłonimy połowę soczewki (zależy, jak ta soczewka jest umieszczona w stosunku do przedmiotu).

Badania doświadczalne pokazały, że jazda na nartach jest możliwa nawet przy -30ºC, gdy nie ma mowy o topieniu się lodu pod płozą. Jak pisze Robert Rosenberg [11] optymalna temperatura dla jazdy figurowej to -5,5ºC (lód jest dość miękki w razie upadku) a dla hokeja to -9ºC (lód jest „szybszy", tzn. współczynnik tarcia jest najniższy).

Otóż jazda na łyżwach jest możliwa, gdyż powierzchnia lodu różni się od jego wnętrza: cząsteczki wody na powierzchni są słabiej związane niż we wnętrzu kryształu, a ich nieuporządkowany, wibrujący układ przypomina fazę ciekłą, rys. 5a. Hipotezę o warstwie wody na powierzchni lodu postawił jeszcze Michael Faraday, w 1867 roku, ale dopiero kilka lat temu fizycy przeprowadzili odpowiednie symulacje komputerowe. Na powierzchni lodu, w temperaturach niezbyt niskich występuje cienka warstwa nieuporządkowanych drobin H_2O o grubości kilkudziesięciu atomów (tj. cieńsza niż 100 nm), rys. 5a. To po niej ślizga się łyżwa. Podobnie, dwa kawałki lodu położone na sobie w zamrażarce skleją się – to dwie stykające się powierzchniowe warstwy ciekłej wody zamarzną.

Ale i inne czynniki, jak topnienie pod wpływem tarcia i nacisku też wpływają na jazdę na nartach, bobslejach, łyżwach czy ślizganie się kamienia w szkockich zawodach *curlingu*, fot. 5. Komitet Olimpijski w Vancouver sfinansował w 2010 przeglądowy artykuł fizyków [12]

Rys. 5. Powierzchniowa, quasi-ciekła warstwa lodu [13], rys. 5a, umożliwia ślizganie się kamienia w zawodach curlingu [14]. Źródło: University College Davies, New England Curling Team.

na temat tarcia (a raczej jego braku) na lodzie. Badania trwają…

Napięcie powierzchniowe

Jak na powierzchni lodu występuje warstwa quasi-ciekła, tak na powierzchni wody występuje błona powierzchniowa – elastyczna i wytrzymała.

Znany wszystkim uczniom pokaz z odwróconą szklanką pełną wody, woda nie wylewa się. Kto przykleił kartkę do szklanki? Wiemy, że obecność wody ma tutaj kluczowe znaczenie. Dlaczego z przechylonej szklanki woda jednak wycieka? Dlaczego nie można powtórzyć tego doświadczenia z użyciem płynu do mycia naczyń?

Rys. 6. Trzy doświadczenia „kuchenne" z cieczami. (a) Kartka papieru (ale nawet metalowa płytka) „przykleja się" do odwróconej szklanki z wodą. To ciśnienie atmosferyczne dopycha kartkę do szklanki, a napięcie powierzchniowe wody uszczelnia styk. Widoczny menisk w górnej części szklanki. (b) Słodkie wino tworzy „frędzle" na ściankach kieliszka: to współgrają napięcie powierzchniowe i lepkość. (c) Zuzia Wyborska robi kisiel, a właściwie eksperymentuje z cieczą nie-niutonowską. (Foto KW i Maria Karwasz).

Doświadczenie służy zazwyczaj do pokazania obecności ciśnienia atmosferycznego: to ono równoważy nacisk wody na kartkę. Ale jak słusznie zauważa Kasia, istotną rolę w „doklejeniu" kartki do brzegu szklanki odgrywa napięcia powierzchniowe. Płyn do naczyń to napięcie zmniejsza, więc doświadczenie się „nie udaje" (a raczej udaje, bo pokazuje dwa efekty na raz).

Napięcie powierzchniowe (konsekwencja wzajemnego oddziaływania na siebie cząsteczek - siły spójności (kohezji)) i przylegania (adhezji). [Oj! Pani Kasiu, po co tyle trudnych słów. Już nikt nie uczy greki w polskiej szkole. Dlaczego mają to czynić nauczyciele fizyki?] *Dzięki temu zjawisku, nasza ciecz (powierzchnia swobodna) zachowuje się jak błona, dążąca do zajmowania jak najmniejszej powierzchni. Dlaczego błonę można jednak rozciągać? Przykładana do niej siła zewnętrzna jest dość duża, a sama błona cieniutka?*

Napięcie powierzchniowe również wpływa na powstawanie zakrzywionej powierzchni cieczy, zwanej meniskiem

eprasa.pl 2e0409c816

Rys. 7. Napięcie powierzchniowe. (a) Woda układa się w gigantyczne krople na liściach grążeli (Mareeba Wetlands, Australia): są one hydro-fobowe. (b) Do szklanego dzbana włożono dość obcisłą, plastikową obwolutę: siły adhezji między plastikiem a wodą są tak duże, że poziom wody podnosi się, aż do brzegu dzbana. Foto: Maria Karwasz; GK.

wklęsłym lub wypukłym. Siły napięcia powierzchniowego odpowiedzialne są za kulisty kształt kropli wody. Zjawisko napięcia powierzchniowego zmniejszamy poprzez dolanie detergentów (substancji powierzchniowo czynnych). Stosujemy te sposoby w życiu codziennym (mycie i pranie). Napięcie powierzchniowe wykorzystuje się do opracowania materiałów wodoodpornych (nieprzemakalne kurtki, parasol).

A dzieci wykorzystują zmniejszone napięcie powierzchniowe do rozciągania kropel wody do postaci cienkich powierzchni sferycznych, zwanym popularnie mydlanymi bańkami. Zajmował się bańkami (a raczej ich kolorami) i Robert Hook i Izaak Newton.

Na stronach „Fizyki zabawek" [15] dyskutujemy szerzej o zjawisku menisku i zmniejszania napięcia powierzchniowego przez dodanie nie tylko detergentów, ale choćby alkoholu czy cukru. Woda, związek polarny (tzn. taki, którego cząsteczki mają rozdzielony ładunek dodatni i ujemny) ma wysoki współczynnik napięcia powierzchniowego. Wraz ze wzrostem temperatury napięcie powierzchniowe wody nieznacznie zmniejsza się, od wartości 75,6 jednostek (dyn/cm, nie do końca SI, ale przydatne) w 0°C do 69,6 jednostek (w 40°C). Lepszy efekt uzyskuje poprzez sporządzenie roztworów wodnych np. z alkoholem. Wzrost stężenia substancji rozpuszczanej w wodzie powoduje, że napięcie powierzchniowe maleje znacznie szybciej. Na przykład 10% roztwór alkoholowy zmniejsza napięcie powierzchniowe do 48,2 jednostek w temperaturze 40°C, natomiast 24% roztwór alkoholu aż do 35,5 jednostek. Dobry koniak rozlewa się na ściankach kieliszka, bo ma inne napięcie powierzchniowe (i lepkość objętościową) niż woda, rys. 6b.

Włoskowatość cieczy jest wynikiem występowania sił napięcia powierzchniowego i sił przylegania. Zjawisko to odgrywa niesamowicie ważną rolę w przyrodzie oraz w życiu codziennym. Kto z nas nie używa ręcznika do rąk? Dzięki temu zjawisku odżywiają się rośliny i drzewa.

Życie bezustannie korzysta ze specjalnych własności wody: naczynia włoskowate są w łodygach roślin i drzew – dzięki zjawisku włoskowatości woda jest podciągana aż do koron drzew. Ale i to zjawisko nie do końca rozumiemy. Fizyka uczy, że pompowanie wody metodą podciągania (jak w starych, ręcznych pompach) jest możliwe jedynie do 10 metrów, bo to raczej nie pompa podciąga, ale ciśnienie atmosferyczne „wypycha" wodę w górę, jak w barometrze rtęciowym. Ale rekordowa sekwoja ma 155 metrów wysokości. Dlaczego? Autorzy nie wiedzą. Wiemy jedynie, że bambus rozwiązuje to w sposób „inteligentny" – pompuje każdorazowo do pojedynczej sekcji (węzła) a w kolejnej sekcji – ponownie.

Opisując zjawiska: napięcia powierzchniowego, włoskowatości, oddziaływań międzycząsteczkowych, dyfuzji, kontrakcji objętościowej w cieczach, ciśnienia cieczy, można wykonać szereg szkolnych (i jak ważnych) doświadczeń:
- badanie napięcia powierzchniowego różnych cieczy, uciekający pieprz, woda i etanol (kontrakcja objętościowa), wędrująca woda itp.

Uciekający pieprz [16] (i żyletka [17]) są widowiskowymi doświadczeniami, oba bardzo ważnymi, ale ich zasady działania są zupełnie odmienne. Uciekający pieprz to niezwykle proste doświadczenie, autorstwa Jeana Perrina, m.in. za które dostał nagrodę Nobla w 1926 roku: jest to pomiar „grubości" cząsteczek, czyli potwierdzenie hipotezy atomowej, zanim mogliśmy obejrzeć pojedyncze atomy za pomocą mikroskopii sił atomowych (AFM). W wersji, która autor zna ze swych włoskich doświadczeń, na powierzchni wody (potrzebna duża kuweta) rozsypywana jest bardzo cienka warstwa pyłku widłaka (*Lycopodium*) a następnie spuszczana kropla roztworu (1:100) kwasu olefinowego w alkoholu, rys. 8a. Kropla rozlewa się na placek o średnicy 20-30 cm. Przeliczenie objętości kwasu (zawartego w kropli o objętości około 1/30 cm^3) na objętość placka daje wysokość placka jakieś 15-20 nm, co odpowiada „długości" drobiny kwasu. Potwierdziliśmy, że cząsteczki (atomy) mają rozmiary pojedynczych nanometrów.

Doświadczenie z żyletką i naelektryzowanym przez pocieranie plastykowym mieszadełkiem do koktajli, fot. 8a, również korzysta ze zjawiska napięcia powierzchniowego, i podobnie jest zaskakujące. O ile papierki rzucone na wodę są przez naelektryzowane mieszadełko przyciągane, żyletka wydaje się być odpychana. Ale to nie żyletka jest opychana, ale powierzchnia wody przez żyletką jest do mieszadełka *przyciągana* a żyletka po prostu spływa z powstałego wybrzuszenia w dół.

Rys. 8. Dwa filmy ze stron Zakładu Fizyki Dydaktyki UMK, parafrazy fizyki współczesnej za pomocą zjawiska napięcia powierzchniowego. (a) Polaryzacja próżni w elektrodynamice kwantowej (=odpychanie żyletki, a w zasadzie przyciąganie powierzchni wody przez naładowaną elektrycznie plastykową łyżeczkę). http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/dscn1561.mov
(b) Pomiar Perrina „wysokości" drobin kwasu olefinowego: powierzchnia wody posypana pyłkiem widłaka. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/filmy/atom2.flv

eprasa.pl 2e0409c816

Przepływy laminarne i turbulentne

Skoro wspomnieliśmy już Reynoldsa, trzeba powiedzieć o współczynniku charakteryzującym przepływy cieczy, czyli o tzw. liczbie Reynoldsa. Bez trudu zauważamy różnicę między wodą wypływającą z kranu a miodem spływającym z łyżki: i miód, i woda to ciecze, ale różnią się tzw. lepkością. Pojęcie lepkości (i przepis na jej pomiar) pochodzą, jak zwykle, od Newtona.

Według definicji Newtona, rys. 9a, współczynnik lepkości μ (zwanej dynamiczną) definiujemy z pomiaru siły F, jaka jest niezbędna do przemieszczenia z prędkością v warstwy cieczy (o powierzchni S) jeśli dolna warstwa cieczy, odległa o y, spoczywa

$$F/S = \mu\, dv/dy \qquad (5)$$

gdzie w powyższym równaniu przez pochodną dv/dy zaznaczamy, że dwie warstwy można wybrać jako nieskończenie bliskie wzdłuż kierunku y.

Ten wybór bliskich siebie warstw jest ważny: tylko w idealnym, rysunkowym przykładzie prędkość poszczególnych warstw rośnie *liniowo* z odległością od dna. W przepływach cieczy przez rury, profil prędkości jest *paraboliczny*: największy w środku rury, teoretycznie zerowy przy ściankach, rys. 9b. W rzeczywistości, przy ściankach też obserwuje się niezerową prędkość: nazywamy ją „prędkością poślizgu". Hydraulika, to skomplikowana nauka.

Po co te wszystkie detale? Aby umieć zaprojektować instalację centralnego ogrzewania we własnym domu albo kanały wentylacyjne w fabryce (lepkość dotyczy również gazów). Otóż, ilość przepływającej przez rurę cieczy zależy liniowo od różnicy ciśnień na jej końcach, jest odwrotnie proporcjonalna do lepkości, ale rośnie jak *czwarta* potęga średnicy rury. Innymi słowy, przez rurę o średnicy ¾ cala przepływa, przy tej samej różnicy ciśnień, aż 5 razy więcej cieczy niż przez rurę ½ cala.

Prawo nazywamy Poiseuille'a i jego dokładne sformułowanie jest następujące

$$Q = \pi r^4 \Delta p / 8 \mu l \qquad (6)$$

gdzie Q oznacza objętość przepływającej cieczy na jednostkę czasu, r to promień wewnętrzny przewód, l jego długość, μ – lepkość cieczy, Δp różnica ciśnień między końcami przewodu.

Rys. 10. Turbulentny przepływ wody: (a) Opublikowany w 2019 roku a pochodzący ze zbiorów Królowej Elżbiety rysunek autorstwa Leonarda da Vinci, przedstawiający wodę wylewaną ze dzbana do misy [18]. (b) „Zawracanie Wisły kijem (GK)" - zawirowania rzeki niosącej krę pod Toruniem. Zdjęcie pochodzi z czasów, kiedy zima występowała również w Polsce.

Ale laminarny układ warstw cieczy, jak na rys. 9a nie jest regułą: próby przetłoczenia większej ilości cieczy prowadzą do powstania zawirowań: mówimy o przepływie turbulentnym. Kiedy można się spodziewać przepływu laminarnego a kiedy turbulentnego, pozwala to ocenić tzw. liczba Reynoldsa, która łączy prędkość przepływu u (dla rur jest to średnia prędkość przepływu) ze średnicą rury d, lepkością (dynamiczną) μ cieczy i jej gęstością ρ.

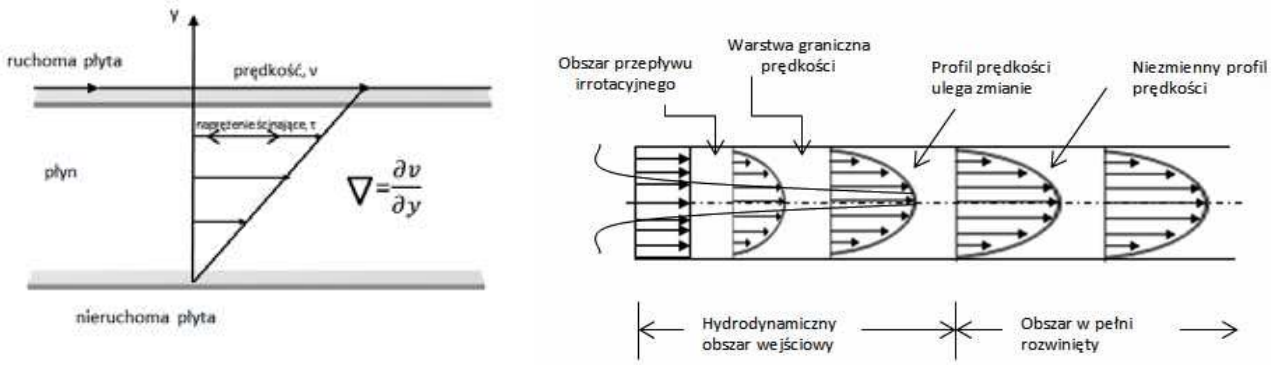
$$Re = \rho u d / \mu \qquad (7)$$

Im mniejsza lepkość, tym łatwiej (przy mniejszych prędkościach) pojawia przepływ turbulentny. Co dla wody zauważył już Leonardo da Vinci, rys. 10a.

Rozgraniczenie między przepływami laminarnymi, jak na rys. 9a a turbulentnymi jak na rys. 10a jest istotne. Gazy również są lepkie. Skrzydła samoloty są tak projektowane, aby przepływ był laminarny, co zapewnia odpowiednią „siłę nośną". Jednocześnie widać z rys. 9a, że przepływający szybko obiekt pociąga za sobą grubą warstwę cieczy lub gazu.

Kompetencja społeczna: w czasie wiatru, szczególnie bocznego, należy zdecydowanie zwolnić. Przy dużej prędkości samochodu warstwa „przyklejoną" powietrza jest gruba i podmuchy wiatru „rzucają" samochodem. Ot, dynamika gazu lepkiego!

I kończąc o lepkości, definicja, jak we wzorze (5) dotyczy cieczy, w których współczynnik nie zależy od szybkości przemieszczania się warstw, takich jak woda, miód, ciekłe metale itd. Definicja Newtona nie stosuje



Rys. 9. (a) Definicja współczynnika lepkości (dynamicznej): górna warstwa, o powierzchni S przesuwa się z prędkością v pod działaniem siły F; mówimy o naprężeniu, bo istotny jest stosunek siły F do powierzchni tej warstwy; dolna warstwa spoczywa. Lepkość jest przyczyną, że dla utrzymania stałej prędkości potrzebna jest stała siła. (b) Paraboliczny profil prędkości przepływu lepkiego (nie turbulentnego) w cylindrycznej rurze. Źródło: https://en.wikipedia.org/wiki/Entrance_length https://en.wikipedia.org/wiki/Viscosity#/media/File:Laminar_shear.svg Rysunki: KW

eprasa.pl 2e0409c816

Rys. 11. „Skrzyżowania" stanów skupienia: ani ciała stałe ani ciecze. Dobrze znana „elastyczna plastelina" [19], świecowy żel i slime (po polsku „smarkol") Natalli. Źródło: zbiory autorów

się np. do roztworów polimerów, past, ketchupu, błota (tj. bagna) czy tzw. ruchomych piasków. W tych ostatnich „cieczach" lepkość zależy od wielkości przyłożonej siły, czyli od prędkości przemieszczenia: ruchome piaski, czyli zawiesina bardzo drobnych ziaren mułu „wciągają", jeśli się na nich stanie, ale szybkim truchtem można przez nie przebiec. Odwrotnie na bagnach, gdzie gwałtowne ruchu pogarszają „sprawę".

Młodzież na naszych pokazach recytuje zgodnie: „ciecze nie-niutonowskie", nie wiedząc specjalnie, co to oznacza. Przykładem są różnego rodzaju gluty, kisiele, keczupy czy *silly putty* [19]. Ta ostatnia, „głupia guma" to polimer na bazie krzemu, który daje rozciągać się jak dobrze rozgnieciona guma do żucia, jeśli ją odkształcamy powoli, ale zgnieciona w kulkę odbija się od podłogi jak kauczuk. Podobno uderzona młotkiem rozpryśnie się na kawałki. Nie próbowaliśmy.

Ogólnie, te wszystkie dziwne stany skupienia, gluty, gumy, żele - ani ciało stałe ani ciecz, mają złożoną strukturę. Są to najczęściej długie łańcuchy cząsteczek, jak np. peptydów, posklejanych między sobą dzięki obecności wody. Kiedyś opowiemy o nich więcej.

Jeszcze raz o strukturze wody

Na rysunku 3 przedstawiliśmy uporządkowanie cząsteczek wody w fazie ciekłej, przypominające nieco fazę stałą: ale był to stan wiedzy na rok 1994. Dziś wiemy, że woda, dzięki wspomnianym (przez p. Kasię) wiązaniom wodorowym ma w fazie ciekłej dużo bardziej skomplikowaną strukturę. Mówimy o klasterach wody. O ich istnieniu spekulowano od dawna. W 2004 roku, dzięki rozwojowi technik doświadczalnych (rozpraszanie neutronów i synchrotronowe promieniowanie rentgenowskie) było możliwe potwierdzenie występowania odmiennych struktur w fazie stałej [20]. Dziś wiemy, przynajmniej teoretycznie, że możliwych złożonych struktur klasterów wody w fazie gazowej jest sporo. Ba! Całe zoo! Trzy z nich pokazujemy na rys. 12 a do obejrzenia „zoo" zapraszamy do naszego (TW, GK) artykułu naukowego [21].

Katarzyna Wyborska[1], Grzegorz Karwasz[2]

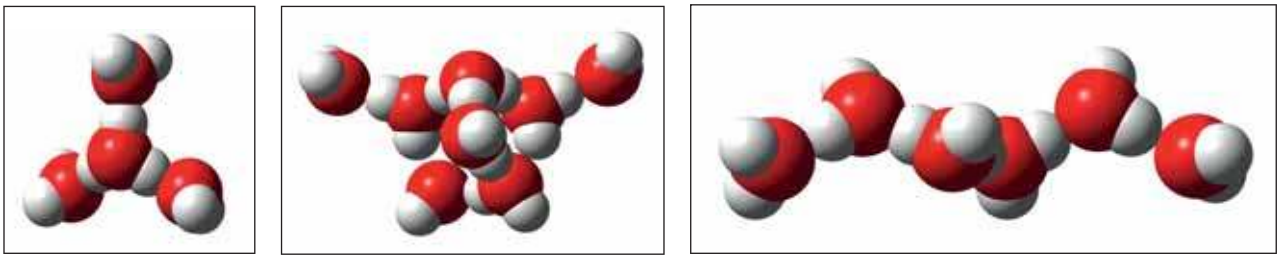
[1] *Zespół Szkół im. Ziemi Kujawskiej w Dąbrowie Biskupiej*

[2] *Katedra Dydaktyki Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu*

PS. W poprzednim tekście, o gazach, „chochlik" drukarski wstawił błędną wartość stałej Boltzmanna. Wynosi ona $1{,}38 \times 10^{-23}$ J/K. Jest to bardzo ważna stała: określa, o ile rośnie energia kinetyczna (3/2 kT) jednej drobiny gazu, gdy temperatura rośnie o 1K. Przydziały energii w drobinach cieczy, w tym wody, są nadal przedmiotem badań.

LITERATURA

[1] G. Karwasz, Mały astronom. Przewodnik dla dzieci, Publicat, 2016.
[2] G. Karwasz, Dydaktyka kognitywistyczna, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Cogito/6_GK_Logika.ppt, str. 35.
[3] G. Karwasz, (Niezbyt krótka) historia o cząstkach elementarnych, Fizyka w Szkole, 340 (LX) No5 (2015), 9-16.
[4] https://pl.wikipedia.org/wiki/Kriogen
[5] https://www.engineeringtoolbox.com/cubical-expansion-coefficients-d_1262.html
[6] G. Karwasz, Dwie bańki i już lato - czyli o rozszerzalności cieplnej, Foton 113, Lato 2011, 33-35, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2011/Karwasz_Foton_2011.pdf http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/termo/term_Gal-pl.html
[7] https://catalogo.museogalileo.it/galleria/TermometriSpiraleInv193194a194b.html
[8] G.J.F. Holman i C.A. ten Seldam, A Critical Evaluation of the Thermophysical Properties of Mercury, J. PHys. Chem. Ref. Data 23, 807 (1994). https://www.nist.gov/system/files/documents/srd/jpcrd483.pdf
[9] G. Karwasz, A. Kamińska, Termometr miłości, Fizyka zabawek, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/termo/termometr-pl.html
[10] P. Kusalik, I.M. Svishchev. The Spatial Structure of Liquid Water, Science 265 (5176): 1219 (1994) https://www.researchgate.net/publication/6052144_The_Spatial_Structure_in_Liquid_Water
[11] R. Rosenberg, Physics Today, 2005 http://lptms.u-psud.fr/membres/trizac/Ens/L3FIP/Ice.pdf
[12] A.-M. Kietzig i in., Physics of ice friction, J. Appl. Phys. 107: 081101 (2010). https://www.researchgate.net/publication/224134492_Physics_of_ice_friction
[13] https://www.ucdavis.edu/news/ice-surface-melts-one-step-time/
[14] G. Karwasz, M. Sadowska, K, Rochowicz, Toruński poręcznik do fizyki. Mechanika, Wyd. Nauk. UMK, s.51, https://www.ibuk.pl/fiszka/42445/torunski-porecznik-do-fizyki.html
[15] G. Karwasz, Dobre wino, w: Fizyka zabawek (2005), http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/termo/wino-pl.html
[16] Doświadczenie Perrina http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Pokazy_2012/3.html
[17] G. Karwasz, Polaryzacja próżni, w: Na ścieżkach fizyki współczesnej (2005) http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/lamb1-pl.html
[18] M. Kemp, Leonardo's laboratory: studies in flow, Nature 571, 321 (2019). https://www.nature.com/articles/d41586-019-02144-z
[19] T. Wróblewski, Elastyczna plastelina, w: Fizyka zabawek, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/zabawki1/files/termo/plastelina-pl.html
[20] Werner i in. https://www-ssrl.slac.stanford.edu/content/science/highlight/2004-04-30/structure-first-coordination-shell-liquid-water
[21] T. Wróblewski, G. Karwasz, Protonated water clusters, European Physical Journal: Special Topics 222(9), 2217 (2013)
[22] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2013/5_2013.pdf



Rys. 12. Struktura wody: rysunek na lewo – tetragonalne ułożenie cząsteczek H_2O w fazie stałej (lodu, postać Ih); rysunek środkowy – możliwy teoretycznie pierścieniowy 8-io klaster wody w fazie ciekłej $H^+(H_2O)_8$, rysunek na prawo – możliwy teoretycznie 6-io klaster liniowy $H^+(H_2O)_6$. Źródło – obliczenia kwantowe (dla gazów) T. Wróblewski i GK [21].

eprasa.pl 2e0409c816

Mija kolejny rok wdrażania podstawy programowej dla ośmioletniej szkoły podstawowej[1] Mimo to zapraszam do ponownej analizy tego dokumentu.

Warunki i sposoby realizacji programu fizyki w szkole podstawowej

Arleta **Biegańska**

Realizując zadania z zakresu nadzoru pedagogicznego postanowiłam sprawdzić w jakim stopniu w szkole przestrzegane są warunki i sposoby realizacji podstaw programowych z poszczególnych edukacji. Wspólnie z nauczycielami dokonaliśmy szczegółowej analizy tego dokumentu oraz porównaliśmy zapisy formalne ze stanem faktycznym. Pozwalam sobie przedstawić niektóre wnioski i spostrzeżenia z uważnej lektury podstaw.

Struktura podstawy programowej

Podstawa programowa dla szkoły podstawowej określona została w załączniku nr 2 do rozporządzenia o podstawach programowych. Jest to bardzo obszerny dokument. Podstawa programowa dla szkoły podstawowej (bez etyki i języka mniejszości narodowej) liczy 190 stron[2] Zawiera wstęp, w którym zapisano, że na I etapie edukacyjnym nauka realizowana jest w formie kształcenia zintegrowanego oraz wymienione zostały m. in. przedmioty realizowane na II etapie edukacyjnym. Następnie wymienia się zadania szkoły w zakresie edukacji wczesnoszkolnej. Po czym następuje krótka charakterystyka przedmiotów nauczanych na II etapie. Zauważa się brak konsekwencji i dużą różnorodność w formie opisu. Dla niektórych przedmiotów znajdziemy definicję przedmiotu (np. WOS), dla innych określono nadrzędny cel (przyroda). W przypadku fizyki określono zadania.

Po tych wyjaśnieniach dla każdego przedmiotu opisane zostały „Cele kształcenia-wymagania ogólne" oraz „Warunki i sposób realizacji".

Warunki i sposoby realizacji podstaw programowych

Analizując i porównując „Warunki i sposoby realizacji" dla różnych przedmiotów nie sposób nie zauważyć dużych różnic chociażby pod względem ilościowym – od kilku zdań do kilku stron. Na przykład opisy warunków i sposobów realizacji geografii zajmują trzy i pół strony, matematyki – 4 strony a fizyki niecałą stronę. Analiza jakościowa ujawnia również duże różnice.

Na przykład dla muzyki[3] opis warunków jest krótki, ale konkretny. Zawiera m. in. zapis „Do prawidłowego prowadzenia zajęć z muzyki ważne jest, aby pracownia była wyposażona w:

1) instrumenty muzyczne: perkusyjne niemelodyczne i melodyczne, instrument lub instrumenty klawiszowe (akustyczne lub elektroniczne), instrumenty dęte, instrumenty strunowe;
2) tablicę z pięciolinią, rzutnik multimedialny i ekran lub tablicę multimedialną;
3) sprzęt do odtwarzania, nagrywania i nagłaśniania dźwięku, komputer z oprogramowaniem muzycznym (np. edytory tekstu muzycznego, obróbki cyfrowej dźwięku, mini studio muzyczne itp.) i z dostępem do Internetu;
4) bibliotekę muzyczną (nuty, śpiewniki, podręczniki), fonotekę i filmotekę;
5) plansze dydaktyczne (papierowe lub multimedialne).

Równie konkretnie zapisane są zalecane sposoby realizacji muzyki.

Sprawdzając wyposażenie szkoły można wyciągnąć jednoznaczne wnioski: „warunki są spełnione" albo „wyposażenie należy uzupełnić o....".

Warunki i sposoby realizacji przedmiotów przyrodniczych

W przypadku geografii [4] warunki i sposoby realizacji są bardzo rozbudowane. Na początku znajdziemy wiele

[1] Załącznik nr 2 do rozporządzenia MEN z dn. 14.02.2017 r. w sprawie podstawy programowej wychowania przedszkolnego oraz podstawy programowej kształcenia ogólnego dla szkoły podstawowej (....)- Dz. U. poz. 356 oraz z 2018 r. poz. 1679 ze zmianami.

[2] Podstawa zapisana ma stronie http://prawo.sejm.gov.pl/isap.nsf/DocDetails.xsp?id=WDU20170000356

[3] Strona 85-86 dokumentu

[4] strona 126-130 dokumentu

eprasa.pl 2e0409c816

zapisów nieistotnych z punktu dyrektora sprawdzającego spełnienie warunków i sposobów realizacji. Jednak pod koniec autorzy podkreślają znaczenie projektu edukacyjnego, wymieniają metody, które winny być stosowane. Przedostatni akapit brzmi „Podstawową zasadą doboru środków dydaktycznych i metod powinno być systematyczne korzystanie z atlasu, ściennych map geograficznych oraz zasobów kartograficznych Internetu. Posługiwanie się mapą, orientowanie się w przestrzeni geograficznej, wykazywanie zróżnicowania przestrzennego składników przyrodniczych i działalności człowieka w środowisku geograficznym oraz interpretacja treści map jest podstawowym celem edukacji na tym poziomie." Nie wymienia się rodzajów map. Mapy jednak mają być na wyposażeniu. Ile i jakie? Może to zależeć od nauczyciela, dyrektora, a może od możliwości finansowych?

W warunkach i sposobach realizacji chemii, które zapisano na dwóch stronach[5] znajdziemy propozycje zestawu doświadczeń do wykonania samodzielnie przez uczniów lub w formie pokazu nauczycielskiego. Zestaw obejmuje 29 pozycji.

Zapisano również „Aby edukacja w zakresie chemii była możliwie najbardziej skuteczna, zajęcia powinny być prowadzone w niezbyt licznych grupach (podział na grupy) w salach wyposażonych w niezbędne sprzęty i odczynniki chemiczne. Nauczyciele mogą w doświadczeniach wykorzystywać substancje znane uczniom z życia codziennego (np. naturalne wskaźniki kwasowo-zasadowe, ocet, mąkę, cukier), pokazując w ten sposób obecność chemii w ich otoczeniu"[6]. Co prawda nie określono dokładnie co to znaczy niezbędne sprzęty i odczynniki chemiczne, ale na podstawie wykazu doświadczeń można domyślić się o jaki sprzęt i odczynniki chodzi.

W przypadku biologii zwraca się uwagę na „zaplanowanie cyklu obserwacji i doświadczeń", na „zajęcia terenowe". Dalej czytamy „Zajęcia z biologii powinny być prowadzone we właściwie wyposażonej pracowni. Ważnym elementem jej wyposażenia powinien być projektor multimedialny, tablica interaktywna oraz komputer z zestawem głośników i z dostępem do Internetu, a także odpowiednie umeblowanie, w którym będzie można gromadzić sprzęt laboratoryjny oraz pomoce dydaktyczne wykorzystywane w różnych okresach roku szkolnego. Istotne jest, aby w pracowni znajdował się sprzęt niezbędny do przeprowadzania wskazanych w podstawie doświadczeń i obserwacji, tj. przyrządy pomiarowe, przyrządy optyczne, szkło laboratoryjne, szkiełka mikroskopowe, odczynniki chemiczne, środki czystości, środki ochrony (fartuchy i rękawice ochronne, apteczka).

Ważnymi pomocami dydaktycznymi w każdej pracowni powinny być przewodniki roślin i zwierząt, proste klucze do oznaczania organizmów, atlasy, preparaty mikroskopowe (protisty, tkanki roślinne, tkanki zwierzęce), modele obrazujące wybrane elementy budowy organizmu człowieka (np. model szkieletu, model oka, model ucha, model klatki piersiowej)". [7]

Zapisy są bardzo skonkretyzowane- wymienia się potrzebny sprzęt, odpowiednie meble, modele anatomiczne, sprzęt laboratoryjny a nawet sprzęt ochronny. Nie zapomniano o atlasach i przewodnikach roślin i zwierząt.

Warunki i sposoby realizacji fizyki

Warunki i sposób realizacji fizyki zapisano na niecałej stronie. Na początek mamy opis fizyki: „Fizyka jest nauką przyrodniczą, nierozerwalnie związaną z codzienną aktywnością człowieka. Wiele zagadnień charakterystycznych dla fizyki jest poznawanych i postrzeganych przez uczniów znacznie wcześniej niż rozpoczyna się ich formalna edukacja z tego przedmiotu. Dlatego bardzo ważnym elementem nauczania fizyki jest zarówno świadomość wiedzy potocznej, jak i bagaż umiejętności wynikający z nieustannego obserwowania świata. Przedmiot fizyka to przede wszystkim sposobność do konstruktywistycznej weryfikacji poglądów uczniów oraz czas na budowanie podstaw myślenia naukowego – stawiania pytań i szukania ustrukturyzowanych odpowiedzi."[8] Trudno się z tym nie zgodzić, ale to nie są ani warunki, ani sposoby realizacji.

Dalej znajdziemy pouczenie:

„Uczenie podstaw fizyki bez nieustannego odwoływania się do przykładów z codziennego życia, bogatego ilustrowania kontekstowego oraz czynnego badania zjawisk i procesów jest sprzeczne z fundamentalnymi zasadami nauczania tego przedmiotu. Nauczanie fizyki winno być postrzegane przede wszystkim jako sposobność do zaspokajania ciekawości poznawczej uczniów i na tej bazie kształtowania umiejętności zdobywania wiedzy, której podstawy zostały zapisane w dokumencie.

Eksperymentowanie, rozwiązywanie zadań problemowych oraz praca z materiałami źródłowymi winny stanowić główne obszary aktywności podczas zajęć fizyki."

Mamy więc podpowiedź – ma być eksperymentowanie. Nie znajdziemy jednak odpowiedzi na pytania, gdzie i z jakimi pomocami nauczyciel ma pracować?

Dalej autorzy uzasadniają dobór treści nauczania „Zawarte w podstawie programowej kształcenia ogólnego dla szkoły podstawowej treści nauczania zostały wybrane w celu kształtowania podstaw rozumowania naukowego obejmującego rozpoznawanie zagadnień, wyjaśnianie zjawisk fizycznych, interpretowanie oraz wykorzystanie wyników i dowodów naukowych do budowania fizycznego obrazu rzeczywistości."

Na koniec wymienia się istotne umiejętności „Podczas realizacji wymagań podstawy programowej kształcenia ogólnego dla szkoły podstawowej istotne jest zwrócenie uwagi na stopień opanowania następujących umiejętności:

1) rozwiązywania typowych zadań przez wykonywanie rutynowych czynności;

5 strona 150-152 dokumentu

6 Strona 150 dokumentu, podkreślenia moje.

7 Strona 142 dokumentu, podkreślenie moje.

8 Strona 159 dokumentu.

eprasa.pl 2e0409c816

2) rozpoznawania i kojarzenia z wykorzystaniem pojedynczych źródeł informacji;
3) wybierania i stosowania strategii rozwiązywania problemów;
4) efektywnej pracy nad rozwiązaniem oraz łączenia różnorodnych informacji i technik;
5) matematycznych z użyciem odpowiednich reprezentacji;
6) doświadczalnych;
7) formułowania komunikatu o swoim rozumowaniu oraz uzasadniania podjętego działania."

W zapisanych warunkach i sposobach realizacji nie znajdziemy zapisów o pracowni, o pomocach dydaktycznych sprzęcie pomiarowym. Czyżby nie były potrzebne?

Podsumowanie

Po pierwsze wyraźnie widać, że zespoły ekspertów opracowujące tak istotny dokument nie współpracowały ze sobą. Każdy zespół inaczej rozumie pojęcia „warunki" oraz „sposoby realizacji". Nadzór pedagogiczny często zarzuca zespołom nauczycieli, że nie potrafią ze sobą współpracować, że nie ma współpracy w szkole, a tym bardziej współpracy między szkołami. Ten przykład pokazuje, że nawet na tak wysokim szczeblu jakim jest ministerstwo, przy opracowywaniu jednego z ważniejszych dokumentów nie potrafiono się porozumieć, wymieć spostrzeżeniami.

Istotne różnice w rozumieniu warunków i sposobów realizacji da się zauważyć w grupie przedmiotów podobnych np. przyrodniczych. Jeszcze istotniejsze różnice występują, gdy porównamy zapisy dotyczące poszczególnych etapów kształcenia, czy porównując przedmioty humanistyczne, artystyczne i inne.

Osobiście oceniam, że warunki i sposoby realizacji dla fizyki są określone najgorzej w grupie analizowanych przedmiotów. Mimo, że fizyka należy do przedmiotów, w których eksperymentowanie jest podstawową metodą badawczą, a tym samym metodą nauczania nie zadbano o szczegółowe określenie niezbędnych warunków do realizacji podstaw programowych. Co prawda w części Treści Nauczania – wymagania szczegółowe" dla każdego działu wymieniono wymagania doświadczalne, ale nie nawiązano do tych zapisów przy określaniu warunków realizacji. Czyżby sugerowano, że stosownie do wykazu doświadczeń lista potrzebnych pomocy jest oczywista. Jest oczywista dla nauczyciela fizyki, ale dla dyrektora, organu prowadzącego już niekoniecznie.

Podejmując się sprawdzenia czy spełnione są warunki realizacji podstaw programowych oczekiwaliśmy, że sformułowane wnioski i rekomendacje będą mogły być wykorzystane m. in. przy zakupach pomocy. Nauczyciele wskażą potrzeby w zakresie pomocy dydaktycznych, czy zaproponują zmiany w zagospodarowaniu izb lekcyjnych. Po likwidacji gimnazjum zwolniły się niektóre pomieszczenia, które można przeznaczyć na klasopracownię np. muzyki czy chemii. Podobnie w przekształcanych szkołach podstawowych występuje konieczność wygospodarowania pomieszczeń na pracownię np. chemii, biologii. W przypadku fizyki nie ma wymogu pracowni. W sytuacji, gdy chętnych do zagospodarowania wolnej izby będzie więcej to na pewno nauczyciel fizyki będzie na straconej pozycji.

Zapisane w rozporządzeniu MEN warunki realizacji podstaw mogą pomóc w staraniach u organu prowadzącego o dodatkowe środki finansowe na doposażenie szkoły. W przypadku muzyki, gdzie zapisy są bardzo konkretne, łatwo o argumenty uzasadniające konieczność zakupu np. instrumentów dętych. Występując do organu prowadzącego o dodatkowe środki można się powołać na wymogi zapisane w rozporządzeniu MEN. Pieniędzy na zakup nowych pomocy dydaktycznych jest zawsze mało. Dla wielu przedmiotów da się uzasadnić konieczność zakupu powołując się na formalne zapisy. Niestety tak się nie dzieje w przypadku fizyki. Nauczyciela fizyki zawsze można zbyć argumentem, że pomoce nie są wymagane.

W przypadku fizyki udzielenie jednoznacznej odpowiedzi na pytanie czy zalecane warunki są spełnione a zalecone sposoby są realizowane nie jest możliwe. Jak jednoznacznie stwierdzić czy spełniony jest warunek: „świadomości wiedzy potocznej, jak i bagażu umiejętności wynikających z nieustannego obserwowania świata"?

Jednym słowem podstawy programowe, zwłaszcza z fizyki wymagają pilnej poprawy. Nie tylko w zakresie doprecyzowania warunków i sposobów realizacji, ale również treści kształcenia. Wśród młodzieży obserwuje się duże zainteresowanie fantastyką naukową, badaniami kosmosu. Trudno się zgodzić z faktem, że autorzy podstaw programowych tego nie dostrzegają i wykreślili astronomię czy fizykę jądrową[9].

Arleta Biegańska Kawęczyn

[9] A. Biegańska „Społeczne koszty reformy na bis", Fizyka w szkole nr 6/2019, s. 24

eprasa.pl 2e0409c816

Ruch jednostajny po okręgu pod wpływem sił bezwładności

Jan Kurzyk

Zgodnie z drugą zasadą dynamiki, każdy ruch z przyśpieszeniem wymaga działania siły. W przypadku ruchu jednostajnego po okręgu siłą odpowiedzialną za ten ruch jest siła, którą nazywamy siłą dośrodkową. Jej nazwa odzwierciedla fakt, że jest ona stale skierowana do środka okręgu będącego torem ruchu.

W układach inercjalnych siłą dośrodkową jest siła rzeczywista, czyli siła pochodząca od oddziaływań między obiektami, na przykład wypadkowa siły ciężkości krzesełka z siedzącą na niej osobą i siły naciągu łańcucha podtrzymującego krzesełko karuzeli, siła grawitacyjna odpowiedzialna za ruch Księżyca wokół Ziemi itp.

Czy w układzie nieinercjalnym ruchowi jednostajnemu po okręgu również musi towarzyszyć siła dośrodkowa? Oczywiście tak. W każdym układzie odniesienia obowiązują te same prawa fizyki, więc również w układzie nieinercjalnym za ruch jednostajny po okręgu musi odpowiadać siła o charakterze siły dośrodkowej. Czy w układzie nieinercjalnym możliwa jest sytuacja, gdy siła dośrodkowa nie będzie siłą rzeczywistą, lecz wypadkową sił bezwładności? Jest tak w najprostszym do wyobrażenia przypadku. Zanim przejdę do opisu tej sytuacji zajmijmy się takimi pojęciami jak układ inercjalny, układ nieinercjalny i siła bezwładności.

Siła bezwładności w układzie poruszającym się z przyśpieszeniem liniowym

W układach nazywanych układami inercjalnymi ciało, na które nie działają żadne siły albo ich suma jest zerowa pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym. Zdanie to znamy jako sformułowanie pierwszej zasady dynamiki, nazywanej też pierwszą zasadą dynamiki Newtona, chociaż o takim zachowaniu ciał mówił już Galileusz. Ale jednocześnie jest to definicja układu inercjalnego.

Problem jest dość zagmatwany. Ciała mogą oddziaływać na siebie na odległość, więc nie zawsze wiemy, czy na ciało działa jakaś siła. Jedynym kryterium stwierdzenia działania siły jest sprawdzenie czy ciało porusza się z niezerowym przyśpieszeniem względem inercjalnego układu odniesienia. To wymaga oczywiście wskazania takiego układu odniesienia. Ale jedynym kryterium sprawdzenia czy układ jest inercjalny jest zbadanie zachowania ciał, na które nie działają siły. Czyli wracamy do punktu wyjścia.

Mimo to sprawa nie jest beznadziejna. Zakładamy, że istnieją układy inercjalne i na tym założeniu budujemy dynamikę w oparciu o prawa Newtona. Weryfikacją poprawności naszych założeń są eksperymenty, a te potwierdzają poprawność naszych założeń. Nie tylko potrafimy opisywać ruch ciał, ale również przywidywać ich późniejsze zachowania i dzięki temu na przykład wysyłać statki kosmiczne do odległych planet.

Załóżmy, że udało się nam wskazać układ inercjalny. Wyobraźmy sobie teraz dowolny inny układ odniesienia poruszający się względem tego pierwszego ruchem jednostajnym prostoliniowym. Łatwo zauważyć, że ciało, które względem pierwszego układu jest w spoczynku lub porusza się względem niego ruchem jednostajnym prostoliniowym, w tym drugim układzie będzie również albo poruszać się ruchem jednostajnym prostoliniowym, albo pozostawać w spoczynku. Wnioskujemy stąd, że ten drugi układ, i każdy inny poruszający się ruchem jednostajnym prostoliniowym względem tego pierwszego, jest również układem inercjalnym.

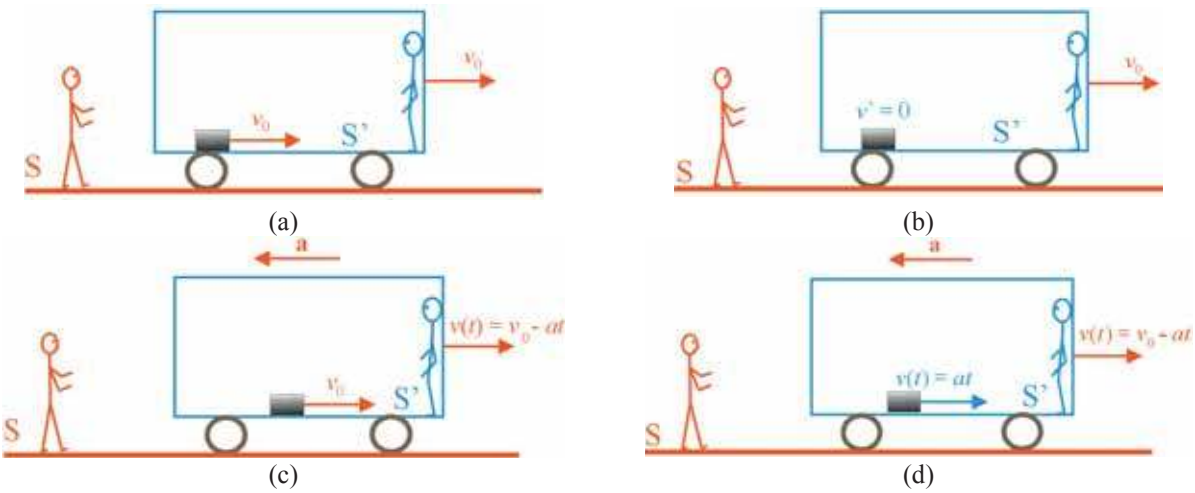
A co się stanie, jeśli wybierzemy układ, który względem (dowolnego) układu inercjalnego porusza się ruchem przyśpieszonym? W najprostszym przypadku może być to ruch ze stałym (co do kierunku, wartości i zwrotu) przyśpieszeniem.

Rozważmy następujące doświadczenie. Załóżmy, że układ odniesienia związany z prostoliniowym odcinkiem jezdni jest, z dobrym przybliżeniem, układem inercjalnym. Po jezdni porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym pojazd. Zgodnie z tym, co powiedzieliśmy, układ odniesienia związany z pojazdem jest też układem inercjalnym. Na gładkiej podłodze pojazdu leży klocek. Działa na niego siła ciężkości oraz reakcja podłogi na nacisk, z jakim klocek naciska na podłogę równy w tym wypadku ciężarowi klocka. Obie siły równoważą się, czyli wypadowa siła działająca na klocek jest zerowa.

Klocek pozostaje w spoczynku względem układu związanego z pojazdem, zaś względem układu związanego z jezdnią porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, takim samym jak pojazd i układ z nim związany (patrz rysunek 1 (a) i (b)). Obie sytuacje są zgodne z pierwszą zasadą dynamiki.

W pewnym momencie pojazd zaczyna hamować. Dla uproszczenia załóżmy, że w czasie hamowania pojazd porusza się ze stałym przyśpieszeniem skierowanym przeciwnie do początkowej prędkości. Co stanie się z klockiem? Jeśli obserwujemy jego ruch względem układu związanego z jezdnią stan klocka nie zmienił się. Nadal porusza się on ruchem jednostajnym prostoliniowym z taką prędkością, jaką miał pojazd przed rozpoczęciem hamowania, gdyż, zaniedbując tarcie, wypadkowa siła działająca na klocek jest nadal zerowa (patrz rysunek 1 (c)). Oczywiście będzie tak do momentu, gdy klocek zderzy się z przednią ścianą zwalniającego pojazdu.

eprasa.pl 2e0409c816



Rysunek 1. (a) i (b) Pojazd porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym z szybkością v_0 względem inercjalnego układu S związanego z jezdnią. W pojeździe na podłodze leży klocek. (a) Dla obserwatora z układu S klocek porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym. (b) Dla obserwatora związanego z pojazdem (układem S') klocek jest nieruchomy. Zachowanie klocka jest zgodne z pierwszą zasadą dynamiki. (c) i (d) Pojazd hamuje ze stałym przyśpieszeniem a skierowanym przeciwnie do początkowej prędkości. (c) Dla obserwatora z układu S klocek nadal porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym z szybkością v_0. (d) Dla obserwatora z układu S' klocek zbliża się do niego ruchem prostoliniowym z przyśpieszeniem a.

A teraz popatrzmy na zachowanie klocka z punktu widzenia obserwatora związanego z pojazdem. Ten obserwator zauważy, że klocek porusza się ruchem przyśpieszonym z przyśpieszeniem skierowanym w kierunku przodu pojazdu (patrz rysunek 1 (d)). Wartość tego przyśpieszenia (jeśli możemy zaniedbać tarcie) jest dokładnie taka, z jaką hamuje pojazd. Jak widzimy układ związany z hamującym pojazdem przestał być układem inercjalnym, gdyż klocek porusza się względem niego ruchem przyśpieszonym, chociaż działające na niego siły równoważą się.

Podobnie będzie we wszystkich układach, które poruszają się z przyśpieszeniem względem układów inercjalnych. Takie układy odniesienia nazywamy *układami nieinercjalnymi*. W układach nieinercjalnych nie możemy stosować zasad dynamiki ograniczając się jedynie do sił pochodzących od oddziaływań. Nie chcemy jednak rezygnować z tych zasad w ogóle. Chcemy mieć możliwość opisu zjawisk w takich układach. W opisywanym przykładzie możliwość używania zasad dynamiki wymaga założenia, że w układzie hamującego pojazdu pojawiła się dodatkowa siła nadająca naszemu klockowi przyśpieszenie. Siły tego typu nazywamy siłami bezwładności. Jeśli pojazd porusza się z przyśpieszeniem $\vec{a}_0$, to siła bezwładności działająca na ciało o masie m wynosi

$$\vec{F}_b = -m\vec{a}_0 .$$

Jeśli na ciało działają zwykłe siły, których wypadkowa wynosi $\vec{F}$, to w układzie nieinercjalnym musimy do nich dodać siły bezwładności. W omawianym przypadku wypadkowa siła działająca na ciało w układzie pojazdu byłaby równa $\vec{F} - m\vec{a}_0$.

Opisany problem możemy rozszerzyć na układ poruszający się ze zmiennym przyśpieszeniem. Wówczas siła bezwładności będzie zmieniać się w czasie

$$\vec{F}_b(t) = -m\vec{a}_0(t).$$

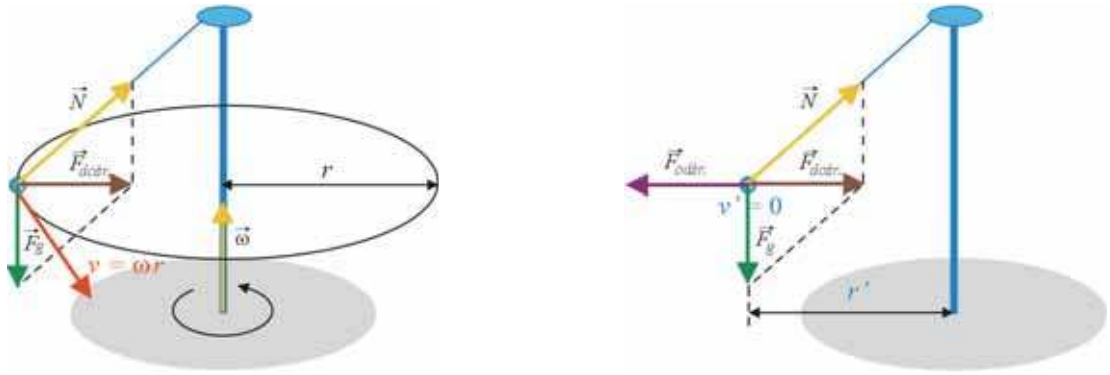
Siły bezwładności nie są zwykłymi siłami. Po pierwsze, nie pochodzą one od oddziaływań z innymi ciałami, w związku z tym sile bezwładności nie towarzyszy nigdy siła opisywana w trzeciej zasadzie dynamiki. Po drugie, nie widzimy tych sił opisując zjawisko w układzie inercjalnym. O siłach bezwładności mówimy jedynie wówczas, gdy chcemy opisać zachowanie się ciał względem układu nieinercjalnego. Dlatego też często nazywamy je siłami pozornymi. Ale nazwa siła pozorna moim zdaniem jest bardzo niefortunna. Przecież będąc w układzie nieinercjalnym wyraźnie odczuwamy jej działanie. W przyśpieszającym pojeździe czujemy siłę, która wciska nas w fotel, w gwałtownie hamującym pojeździe możemy aż za nadto odczuć realność siły bezwładności. Trudno jest więc nazwać ją siłą pozorną. Siły bezwładności są trudnym pojęciem i źródłem wielu nieporozumień. Kwerendę dziwnych, nie zawsze poprawnych, sformułowań na temat sił bezwładności sporządził autor artykułu [1].

Siły bezwładności w układzie obracającym się

Innym przykładem układu nieinercjalnego jest układ obracający się. Najprostszym z nich jest układ obracający się ze stałą (co do wartości, kierunku i zwrotu) prędkością kątową. Wyobraźmy sobie wirującą ze stałą prędkością kątową karuzelę i dziecko siedzące na krzesełku tej karuzeli. W inercjalnym układzie odniesienia związanym z placem, na którym ustawiono karuzelę, dziecko porusza się ruchem jednostajnym po okręgu (patrz rysunek 2 (a)). Siłą dośrodkową odpowiedzialną za ten ruch jest wypadkowa siły ciężkości $\vec{F}_g$ działającej na dziecko oraz siły naciągu łańcucha $\vec{N}$.

To samo dziecko obserwowane z układu związanego z obracającą się karuzelą pozostaje w spoczynku. Aby móc opisać zachowanie dziecka w zgodzie z zasadami dynamiki Newtona musimy założyć, że oprócz sił wynikających z odziaływań między ciałami, składającymi się na siłę dośrodkową, na dziecko działa siła bezwładności

eprasa.pl 2e0409c816



(a) (b)

Rysunek 2. (a) Ciało zawieszone na łańcuchu karuzeli wykonuje ruch jednostajny po okręgu względem inercjalnego układu odniesienia związanego z placem, na którym stoi karuzela. Siłą dośrodkową odpowiedzialna za ten ruch jest wypadkowa siły ciężkości działającej na ciało oraz siły naciągu łańcucha. (b) W układzie nieinercjalnym związanym z karuzelą ciało jest nieruchome siła dośrodkowa opisana w punkcie (a) jest zrównoważona przez siłę bezwładności – siłę odśrodkową.

równoważąca te siły. Siła ta musi mieć cały czas taki sam kierunek i wartość co siła dośrodkowa, lecz przeciwny zwrot. Dlatego nazywamy ją siłą odśrodkową (patrz rysunek 2 (b)). Zauważmy, że sytuacja jest bardzo podobna do tej, z jaką mieliśmy do czynienia w poprzednim punkcie. Tam układ poruszał się z przyśpieszeniem liniowym $\vec{a}_0$ co powodowało pojawienie się w tym układzie siły bezwładności $\vec{F}_b = -m\vec{a}_0$. Teraz układ porusza się z przyspieszeniem $\vec{a}_{dośr}$, co powoduje pojawienie się siły bezwładności $\vec{F}_b = -m\vec{a}_{dośr}$.

Na tym jednak podobieństwa się kończą. W przypadku pierwszego z tych układów siła $-m\vec{a}_0$ jest jedyną siłą bezwładności, jaka występuje w tym układzie. W przypadku układu obracającego się oprócz siły odśrodkowej możemy mieć do czynienia dodatkowo z dwiema innymi siłami bezwładności. Jedna z nich pojawia się, gdy ciało jest w ruchu względem obracającego się układu, a druga, gdy prędkość kątowa układu jest zmienna.

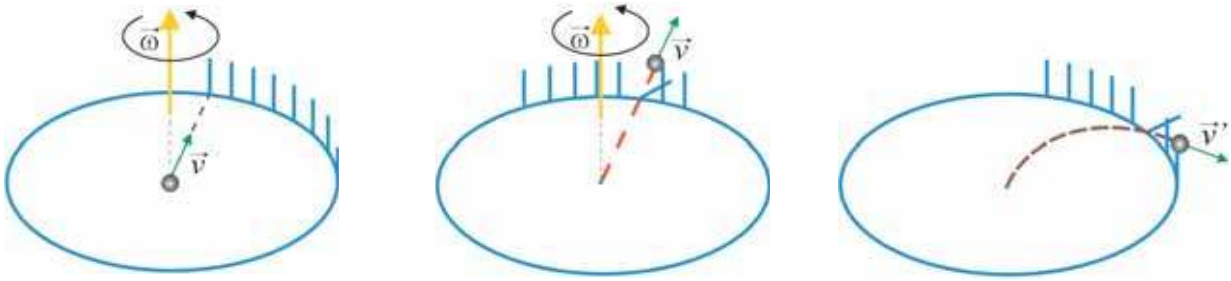
Zajmijmy się pierwszą z tych sił. Wyobraźmy sobie, że ze środka wirującej tarczy popychamy kulkę nadając jej prędkość skierowaną na jedną z tyczek umieszczonych na brzegu tarczy (patrz rysunek 3 (a)). Załóżmy dla uproszczenia, że powierzchnia tarczy jest idealnie gładka (kulka nie toczy się, lecz ślizga), więc tarcie nie zaburza ruchu kulki. Obserwator znajdujący się w zewnętrznym, inercjalnym układzie odniesienia stwierdzi, że kulka porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, lecz zanim dotrze do brzegu tarczy ta obróci się o pewien kąt. Kulka nie trafi w tyczkę, w którą wycelowaliśmy (patrz rysunek 3 (b)).

Inaczej opisze ruch kulki obserwator obracający się wraz z tarczą. Dla niego kulka nie porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, lecz jednostajnym krzywoliniowym (patrz rysunek 3 (c)). Łatwo możemy znaleźć parametryczną postać krzywej, po której porusza się kulka. Kulka oddala się od środka tarczy z szybkością v', a swoje położenie kątowe zmienia z szybkością kątową ω. A zatem w układzie biegunowym ze środkiem w środku tarczy parametryczne równania toru mają postać

$$r(t) = v't, \ \varphi(t) = \omega t.$$

Tym razem nie jest tak łatwo, jak w przypadku poprzednich dwóch sił bezwładności, znaleźć postać siły odpowiedzialnej za ten ruch. Ale analizując charakter tego ruchu możemy dużo o tej sile powiedzieć. Po pierwsze, widzimy, że kształt toru nie zależy od masy kulki, więc nasza siła bezwładności musi być, tak jak dwie poprzednie, proporcjonalna do masy ciała. Tym aspektem zajmę się bliżej w następnym punkcie. Po drugie, ponieważ mamy do czynienia z ruchem jednostajnym krzywoliniowym wnioskujemy, że działająca na kulkę siła jest zawsze prostopadła do prędkości ciała, gdyż tylko taka siła prowadzi do zmiany kierunku ruchu (ruch krzywoliniowy) bez zmiany szybkości (ruch jednostajny).

Jednocześnie siła ta jest prostopadła do osi obrotu, a tym samym do wektora prędkości kątowej. Widzimy też,



(a) (b) (c)

Rysunek 3. (a) Ze środka gładkiej wirującej tarczy wypychamy niewielką kulkę celując w pierwszy z kołków ustawionych na brzegu tarczy. (b) Względem układu inercjalnego kulka porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym, gdyż działające na nią siły równoważą się. Zanim kulka dotrze do brzegu tarczy, ta przesunie się o pewien kąt. (c) W układzie tarczy kulka porusza się ruchem jednostajnym krzywoliniowym z szybkością v' = v.

eprasa.pl 2e0409c816

że zależy ona zarówno od prędkości liniowej ciała względem tarczy, jak i od prędkości kątowej tarczy. Biorąc pod uwagę wymienione zależności możemy oczekiwać, że szukana siła bezwładności musi być proporcjonalna do iloczynu wektorowego wektorów prędkości kątowej układu i prędkości liniowej ciała względem układu pomnożonego przez masę ciała $m\vec{\omega} \times \vec{v}'$.Znak prim dodany do symbolu prędkości ma podkreślić fakt, że chodzi tu o prędkość ciała względem układu obracającego się, a nie względem układu inercjalnego. Dokładną postać tej siły możemy znaleźć na wiele sposobów. Zainteresowanych wyprowadzeniem wzorów odsyłam np. do [1-3]. Ostatecznie otrzymamy następujący wzór na siłę bezwładności w układzie obracającym się

$$\vec{F}_b(t) = -m\vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{r}') - 2m\vec{\omega}\times\vec{v}' - \frac{d\vec{\omega}}{dt}\times\vec{r}'$$

Jeszcze raz przypominam, że symbol prim, w powyższym wyrażeniu, podkreśla to, że wektor wodzący i wektor prędkości liniowej są wektorami w układzie obracającym się.

Pierwszy wyraz w powyższym wyrażeniu jest omówioną wcześniej siłą odśrodkową. Drugi opisuje siłę, którą opisywałem powyżej, a ostatni opisuje trzecią siłę bezwładności, o której wspominałem.

Siła odśrodkowa

$$\vec{F}_{odsr.} = -m\vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{r}') = m\omega^2\vec{r}'$$

jest siłą towarzyszącą każdemu ciału w obracającym się układzie odniesienia niezależnie od tego co dzieje się z tym ciałem (o ile jest poza osią obrotu układu).

Druga z tych sił, w przeciwieństwie do siły odśrodkowej, nie występuje zawsze w układzie obracającym się. Pojawia się ona dopiero wtedy, gdy ciało jest w ruchu względem układu obracającego się i na dodatek nie może to być ruch wzdłuż prostej równoległej do osi obrotu. Nazywamy ją siłą Coriolisa, na pamiątkę francuskiego fizyka i matematyka Gasparda Coriolisa (1792-1843). Coriolis opisał tę siłę w 1835 roku w artykule, w którym omawiał teorię kół wodnych powszechnie wykorzystywanych wówczas między innymi w młynach wodnych [4].

Efekt działania siły Coriolisa na Ziemi jest bardzo silny i był obserwowany, jeszcze przed opisem tej siły przez Coriolisa. Jednymi z ważniejszych efektów działania tej siły na Ziemi są charakterystyczne kierunki wiatrów i prądów morskich (przeważa kierunek wschód-zachód), powstawanie cyklonów (wirów powietrza w ośrodkach niżowych) i antycyklonów (wirów powietrza w ośrodkach wyżowych). Przy czym na półkuli północnej masy powietrza w cyklonach opływają ośrodki niżowe w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, a na południowej zgodnie z ruchem wskazówek zegara.

W przypadku antycyklonów jest odwrotnie. Jest to zgodne z regułą holenderskiego meteorologa i fizyka Christophorusa Buys-Ballota (1817-1890). Reguła Buys-Ballota mówi, że obserwator znajdujący się na półkuli północnej zwrócony plecami do wiatru, ma po swojej lewej stronie ośrodek niżowy, czyli obszar niskiego ciśnienia. Zaś na półkuli południowej ośrodek niższego ciśnienia jest po prawej stronie obserwatora stojącego plecami o wiatru. Obserwuje się również podmywanie brzegów dużych rzek. Na półkuli północnej podmywane są prawe brzegi, na południowej lewe. Efekt wywołany siłą Coriolisa musi być tu uwzględniany przez artylerzystów, osoby sterujące lotem samolotów, rakiet itp.

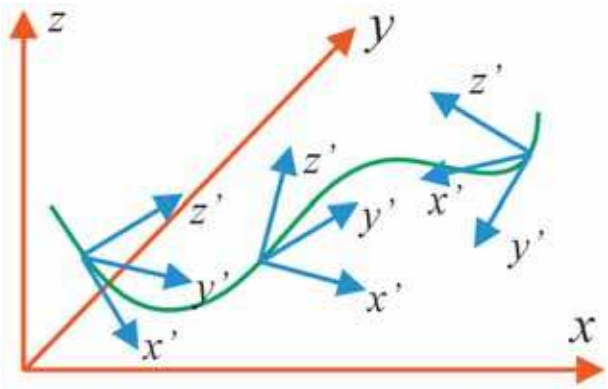
Rysunek 4. Zdjęcie satelitarne huraganu Rita, który w 2005 roku zaatakował stany Teksas i Luizjana. https://pl.wikipedia.org/wiki/Huragan_Rita.

Efektem działania siły Coriolisa jest również skręcanie się płaszczyzny wahań bardzo długich wahadeł z masywnymi kulami, które mogą wykonywać wahania przez wiele godzin. Takie wahadła nazywamy wahadłami Foucaulta. Nazwa pochodzi od nazwiska francuskiego fizyka Jeana Foucaulta (1819-1868), który w 1851 roku jako pierwszy zademonstrował ruch takiego wahadła w Paryskim Obserwatorium Astronomicznym. Ten eksperyment był pierwszym doświadczalnym potwierdzeniem ruchu obrotowego Ziemi!

Trzecia z wymienionych sił bezwładności występująca w układach obracających się nie ma swojej nazwy. Ze wzoru widzimy, że pojawia się ona tylko w przypadku układu odniesienia obracającego się ruchem niejednostajnym (z niezerowym przyśpieszeniem kątowym). Oczywiście nie chodzi tylko o zmienną szybkość kątową, ale również ewentualną zmianę kierunku prędkości kątowej, a tym samym kierunku osi obrotu. Siła ta jest prostopadła do płaszczyzny wyznaczonej przez wektor przyśpieszenia kątowego i wektor wodzący ciała.

Ponieważ każdy ruch możemy potraktować jak złożenie ruchu postępowego i ruchu obrotowego (patrz rysunek 5), to opisane wyżej cztery siły bezwładności wyczerpują wszystkie możliwości. A zatem w najogólniejszym przypadku siła bezwładności w układzie nieinercjalnym ma postać

eprasa.pl 2e0409c816



Rysunek 5. Przykładowy nieinercjalny układ odniesienia wraz związanym z nim układem współrzędnych (niebieskie osie) poruszający się wzdłuż zielonego toru ruchem postępowym i jednocześnie ruchem obrotowym względem inercjalnego układu reprezentowanego przez czerwone osie.

$$\vec{F}_b = -m\vec{a}_0 - m\vec{\omega}\times(\vec{\omega}\times\vec{r}') - 2m\vec{\omega}\times\vec{v}' - \frac{d\vec{\omega}}{dt}\times\vec{r}'.$$

W powyższym wyrażeniu $\vec{a}_0$ jest chwilowym przyśpieszeniem liniowym, a $\vec{\omega}$ chwilową prędkością kątową układu.

Stan nieważkości

Wróćmy do przykładu klocka znajdującego się w hamującym pociągu. Zauważmy, że przyśpieszenie, z jakim porusza się klocek względem układu związanego z pociągiem nie zależy od masy klocka a jedynie od przyśpieszenia pociągu. Dokładnie tak samo jest w przypadku pozostałych sił bezwładności. Przypomina to sytuację z przyśpieszeniem grawitacyjnym. W polu grawitacyjnym dużego obiektu np. Ziemi, wszystkie ciała poruszające się swobodne również doznają jednakowego przyśpieszenia niezależnego od masy poruszającego się ciała. Pierwszym uczonym, który to zauważył był Galileusz.

Einstein poszedł dalej. Stwierdził, że lokalnie (tzn. w małym obszarze) nie jesteśmy w stanie odróżnić ruchu swobodnego ciała w polu grawitacyjnym od ruchu swobodnego ciała względem układu poruszającego się z przyśpieszeniem. Jest to postulowana przez Einsteina w jego ogólnej teorii względności zasada lokalnej równoważności statycznego układu z grawitacją i układu nieinercjalnego bez grawitacji (patrz rysunek 6).

W słabszej wersji zasada ta mówi o tym, że masa bezwładna[1] jest równa masie grawitacyjnej[2]. Pierwszym eksperymentem potwierdzającym równość obu mas był eksperyment wykonany przez węgierskiego uczonego Loránda Eötvösa[3] (1848-1919). Współczesne eksperymenty potwierdzają równość obu mas z dokładnością rzędu 10^{-12}.

Z zasady równoważności Einsteina wynika, że wszystkie zjawiska zachodzące w układzie odniesienia poruszającym się swobodnie w polu grawitacyjnym przebiegają tak jak w układzie inercjalnym. Przykładem takiego układu jest układ związany ze spadającą swobodnie windą lub na przykład układ związany ze stacją kosmiczną krążąca wokół Ziemi. W terminologii dynamiki newtonowskiej takie układy są dla nas układami nieinercjalnymi, w których siły grawitacyjne równoważone są przez siły bezwładności. Taką sytuację nazywamy stanem nieważkości (patrz rysunek 7).

Fakt, że układ poruszający się swobodnie w polu grawitacyjnym zachowuje się jak układ inercjalny został wykorzystany w systemach nawigacji satelitarnych typu GPS. W układach tego typu jako układ odniesienia przyjmuje się układ ECI (ang. *Earth-Centered Inertial*), czyli inercjalny układ odniesienia centrowany w środku Ziemi. Układ ten porusza się swobodnie w polu grawitacyjnym Słońca (a właściwie w polu grawitacyjnym Układu Słonecznego), więc w myśl teorii Einsteina zachowuje się jak układ inercjalny. Zegary systemu GPS (te w satelitach i te w stacjach naziemnych) są synchronizowane w tym właśnie układzie [5]. Taki wybór układu odniesienia sprawia, efekty grawitacyjne wpływające na szybkość upływu czasu związane są tylko z polem grawitacyjnym Ziemi, a wpływ pozostałych obiektów – Słońca, Księżyca, innych planet, itd. zeruje się.

Ruch jednostajny po okręgu pod wpływem sił bezwładności

Przejdźmy wreszcie do problemu zawartego w tytule artykułu. Tak jak pisałem we wstępie ruch jednostajny po okręgu pod wpływem sił bezwładności jest najprostszym do pomyślenia przypadkiem. Wyobraźmy sobie układ odniesienia obracający się ze stałą prędkością kątową – $\vec{\omega} = (0,0,\omega)$, na przykład układ związany z obracającą się karuzelą. Obok karuzeli, w odległości r od osi karuzeli stoi dziecko o masie m. Dziecko jest nieruchome względem inercjalnego układu związanego placem, na którym stoi karuzela. Wypadkowa sił działających na dziecko (siła ciężkości i reakcja podłoża) jest zerowa. To tłumaczy, dlaczego w układzie inercjalnym dziecko jest nieruchome. Jednak względem układu związanego z karuzelą dziecko porusza się po okręgu o promieniu r z prędkością kątową $-\vec{\omega}$.

Ruch jednostajny po okręgu, jak wiemy, wymaga działania siły dośrodkowej. Ale co w tym przypadku jest jej źródłem? Siła przyciągania grawitacyjnego działająca na dziecko ze strony karuzeli jest niesłychanie mała i nie może być szukaną przez nas siłą dośrodkową, a pozostałe siły, czyli siła ciężkości działająca na dziecko ze strony Ziemi i reakcja podłoża znoszą się. Zresztą i tak nie działają w kierunku, który nas interesuje. Pozostają nam siły bezwładności. Jedną z nich jest siła odśrodkowa

$$\vec{F}_{odsr.} = m\omega^2\vec{r}'.$$

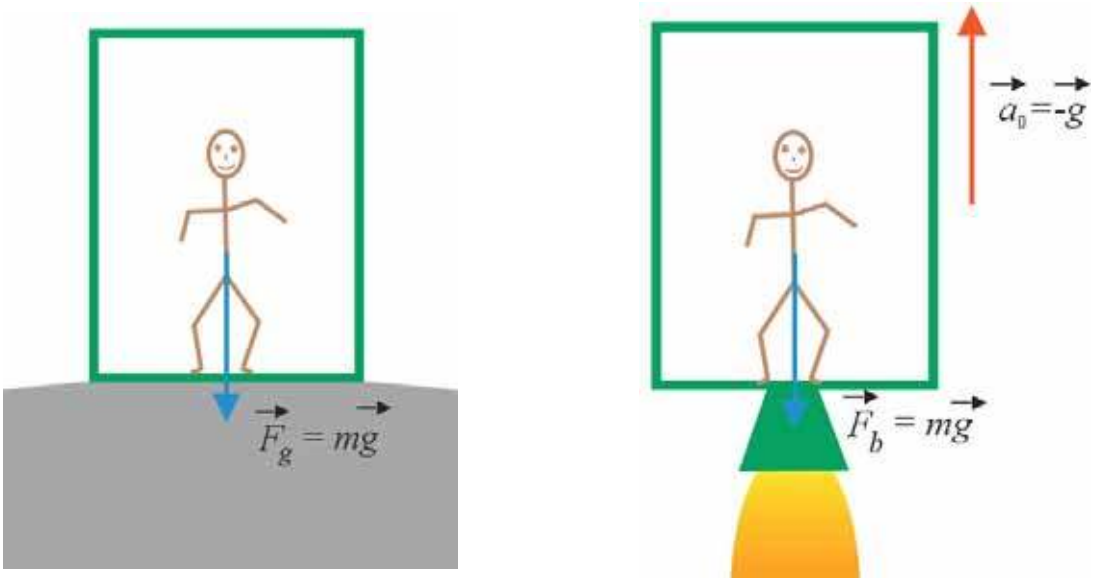
Jej wartość ($m\omega^2 r'$) i kierunek są takie jakich oczekujemy, ale zwrot jest dokładnie przeciwny do pożądanego. Ale mamy jeszcze drugą siłę bezwładności w układzie obracającym się – siłę Coriolisa. Pojawia się ona, gdyż dziecko porusza się względem karuzeli z prędkością

$$\vec{v}'(t) = -\vec{\omega}\times\vec{r}'(t).$$

Łatwo można sprawdzić, że w tym wypadku siła Coriolisa działa w kierunku środka okręgu zataczanego w układzie karuzeli przez dziecko

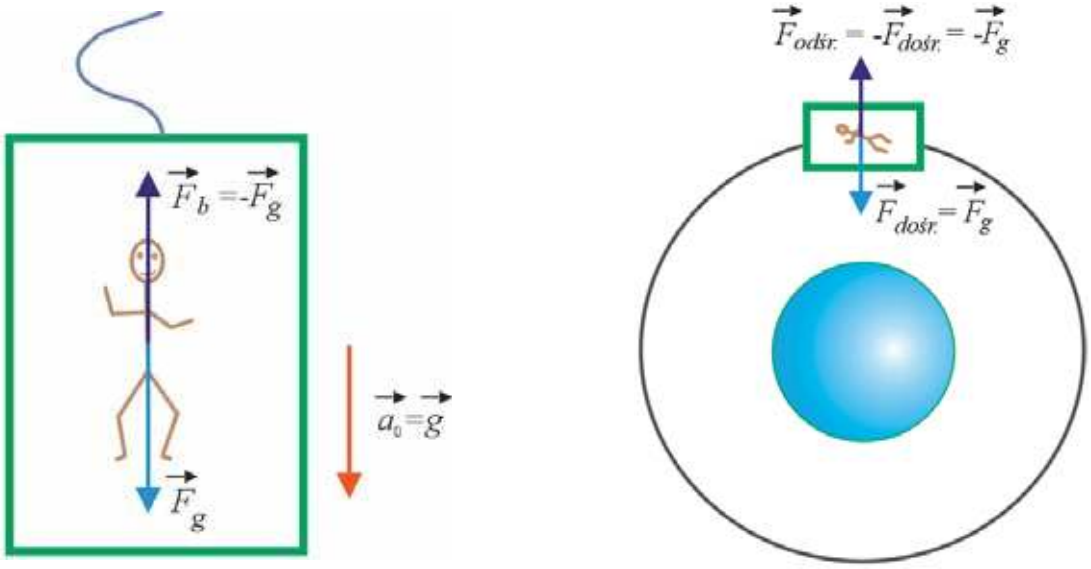
[1] masa występująca w drugiej zasadzie dynamiki Newtona
[2] masie występującej w prawie powszechnego ciążenia Newtona
[3] Pierwszy tego typu eksperyment Eötvös wykonał w 1885 roku, a następne, dokładniejsze w latach 1905-1909.

eprasa.pl 2e0409c816



(a) (b)

Rysunek 6. (a) Człowiek w pomieszczeniu na powierzchni Ziemi odczuwa działanie siły grawitacyjnej. (b) Pojazd kosmiczny znajdujący się daleko od innych obiektów poruszający się z przyśpieszeniem o wartości g. Człowiek znajdujący się w tym pojeździe odczuwa siłę analogiczną do siły grawitacji. Obaj obserwatorzy nie są w stanie stwierdzić czy działająca na nich siła jest siłą grawitacji, czy siłą bezwładności.



(a) (b)

Rysunek 7. (a) Człowiek w kabinie spadającej swobodnie na linie bungee w polu grawitacyjnym Ziemi znajduje się w stanie nieważkości do momentu naprężenia liny. (b) Stan nieważkości w stacji orbitalnej trwa cały czas. Przebieg zjawisk w obu układach jest taki jak w układzie inercjalnym.

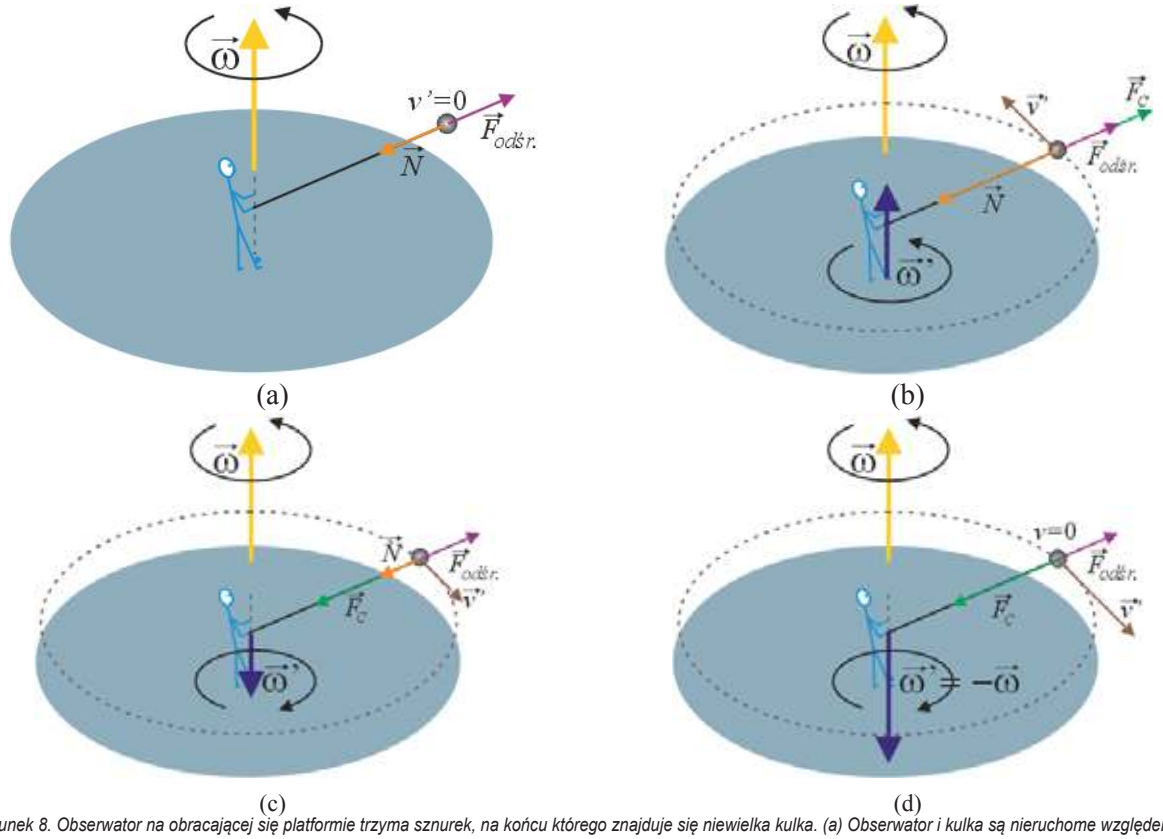
$$\vec{F}_C = -2m\vec{\omega}\times\vec{v}' = -2m\omega^2\vec{r}'.$$

Suma obu sił bezwładności daje nam szukaną siłę dośrodkową

$$\vec{F}_{odsr.}(t) + \vec{F}_C = -m\omega^2\vec{r}'.$$

Rozważmy teraz sytuację nieco bardziej skomplikowaną. Wyobraźmy sobie, że znajdujemy się na osi obracającej się platformy. Dla uproszczenia załóżmy, że platforma znajduje się bardzo daleko od masywnych obiektów tak, że możemy zaniedbać grawitację. W ręku trzymamy sznurek o długości r', na końcu którego przymocowana jest niewielka kulka o masie m. Początkowo stoimy nieruchomo względem platformy wobec tego na kulkę działa siła odśrodkowa napinająca sznurek. Siła naciągu sznurka N równoważy siłę odśrodkową $N - m\omega^2 r' = 0$, więc kulka pozostaje w spoczynku względem platformy (patrz rysunek 8 (a)). Teraz zaczynamy się obracać wokół osi będącej osią obrotu platformy. Niech będzie to obrót w kierunku zgodnym z obrotem platformy z prędkością kątową o wartości ω' względem platformy. Kulka osiąga szybkość $v' = \omega' r'$ względem platformy, wobec tego pojawia się siła Coriolisa tym razem dodająca się do siły odśrodkowej i zwiększająca siłę naciągu sznurka (patrz rysunek 8 (b)). Wypadkowa siły działającej ze strony sznurka na kulkę oraz obu sił bezwładności – siły odśrodkowej i siły Coriolisa daje nam siłę dośrodkową odpowiedzialną za ruch jednostajny po okręgu naszej kulki

eprasa.pl 2e0409c816



Rysunek 8. Obserwator na obracającej się platformie trzyma sznurek, na końcu którego znajduje się niewielka kulka. (a) Obserwator i kulka są nieruchome względem platformy (v'=0). W układzie związanym z platformą siła odśrodkowa równoważy siłę działającą na kulkę ze strony naprężonego sznurka. (b) Obserwator obraca się wokół osi platformy w tym samym kierunku co platforma. Pojawia się siła Coriolisa dodająca się do siły odśrodkowej. Wzrasta naprężenie sznurka. (c) Obserwator obraca się w kierunku przeciwnym do obrotu platformy. Siła Coriolisa jest skierowana do środka okręgu. Naprężenie sznurka zmalało. (d) Obserwator obraca się w kierunku przeciwnym do obrotu platformy z taką samą szybkością kątową co platforma. Naprężenie sznurka jest zerowe. Prędkość kulki względem układu inercjalnego jest zerowa v=0.

$$N = m(\omega + \omega')^2 r'.$$

Stąd wyliczamy, że siła naciągu sznurka ma wartość

$$N = m\omega'^2 r' + m\omega'^2 r' + 2m\omega\omega' r',$$

Powyższe wyrażenie możemy sprowadzić do postaci

$$N = m(\omega + \omega')^2 r'.$$

Jest to dokładnie taka siła naciągu sznurka, jaką mogą wyliczyć obserwatorzy z zewnętrznego, inercjalnego układu odniesienia, względem którego kulka krąży po okręgu o promieniu r' z prędkością kątową o wartości $\omega + \omega'$.

Teraz zmieńmy kierunek obrotu. Będziemy obracać się względem platformy w kierunku przeciwnym do obrotu platformy. Siła Coriolisa również zmieni swój zwrot i będzie teraz działać w stronę środka okręgu. Wobec tego wzór na siłę naciągu sznurka przyjmie postać

$$N = m\omega'^2 r' + m\omega'^2 r' - 2m\omega\omega' r',$$

czyli

$$N = m(\omega - \omega')^2 r'.$$

Gdy $\omega' < \omega$, siła naciągu będzie mniejsza niż w przypadku, gdy staliśmy nieruchomo lub gdy obracaliśmy się w przeciwną stronę (patrz rysunek 8 (c)). Im bliższa szybkości kątowej platformy będzie szybkość kątowa kulki, tym mniejsza będzie siła naciągu sznurka. W sytuacji, gdy szybkości się zrównają, czyli $\omega' = \omega$, siła naciągu sznurka będzie zerowa. Jeśli dalej będziemy zwiększać prędkość kątową kulki siła naciągu sznurka zacznie wzrastać.

Zauważmy, że w przypadku granicznym tzn. gdy $\omega' = \omega$, kulka będzie nieruchoma względem zewnętrznego, inercjalnego układu odniesienia. Zaś względem platformy będzie poruszać się po okręgu ruchem jednostajnym jedynie pod wpływem sił bezwładności (patrz rysunek 8 (d)). Dokładnie tak samo jak było w przypadku opisanym na początku, czyli dziecka stojącego obok obracającej się karuzeli.

Czytelnik, który dotarł do tego miejsca zauważył zapewne, że opis problemu zasygnalizowanego w tytule zajął zaledwie kilka akapitów i był tylko pretekstem do napisania tego artykułu. Głównie chodziło mi o omówienie zagadnienia układów nieinercjalnych i wiążących się z nimi sił bezwładności. Pojęcie sił bezwładności jest trudne dla uczniów, a jak się okazuje nie tylko dla nich, co zauważył autor artykułu [1]. Często niewłaściwie rozumiemy to pojęcie choć używamy go dość powszechnie nawet w rozmowach nie dotyczących fizyki.

dr Jan Kurzyk
Instytut Fizyki Politechniki Krakowskiej

LITERATURA

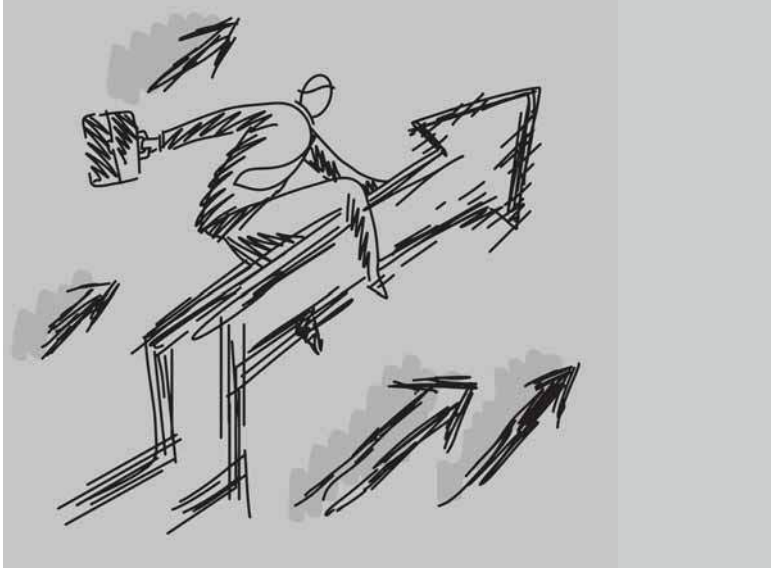
[1] T. Wibig, „Zagubiona przyszłość", czyli o realności sił pozornych. Fizyka w Szkole nr 6, 2019.
[2] C. Kittel, W.D. Knight, M.A. Ruderman, Mechanika, PWN 1975.
[3] A.K. Wróblewski, J.A. Zakrzewski, Wstęp do fizyki, tom 1, PWN 1984.
[4] https://en.wikipedia.org/wiki/Coriolis_force (dostęp 31.12.2019).
[5] J. Kurzyk, Dlaczego działa GPS? Fizyka w Szkole nr 2, 2017.

eprasa.pl 2e0409c816

Kłopoty z wektorami

(Miniatura dydaktyczna)

Waldemar **Reńda**



Podstawa programowa niewiele mówi o pojęciu wektora i jego stosowaniu. Natomiast podręczniki do realizacji rozszerzonego programu fizyki dość obszernie posługują się tym pojęciem aż do wprowadzenia ***współrzędnej*** wektora. Czy słusznie? Sądzę, że tak, bo uniwersytecki kurs fizyki zaczyna się właśnie od analizy wektorowej. Dobrze więc, jeśli uczeń już w szkole średniej zapozna się z elementarnymi pojęciami z tej dziedziny.

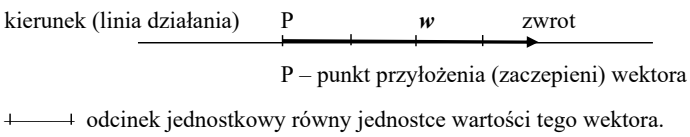
Pojęcie wektora wprowadził w połowie XIX w. W. R. Hamilton.[1] W matematyce wektorem nazywamy uporządkowaną parę punktów, z których jeden stanowi początek wektora, a drugi jego koniec; prosta, na której leżą te punkty określa kierunek wektora, a ich porządek – zwrot wektora.

W fizyce ***wektor*** to wielkość fizyczna[2] mająca ***wartość*** liczbową, ***kierunek*** (linia działania) i ***zwrot***. Zwykle też określony jest jego ***punkt przyłożenia*** (zaczepienia). Ów punkt może leżeć w określonym miejscu (punkcie) przestrzeni (np. punkt, w którym określono wektora natężenia pola grawitacyjnego, elektrycznego itp.) lub też jest konkretnym punktem ciała fizycznego – np. punkt przyłożenia (zaczepienia) siły ciężkości,

Graficznie wektor przedstawiany jest w postaci **odcinka**, którego koniec zaznaczony jest strzałką i wskazuje **zwrot** wektora; długość wektora informuje nas o **wartości** liczbowej wektora, a prosta, na której ten wektor leży, jest jego **kierunkiem**.

Wektory oznacza się zwykle literą ze strzałką – np. $\vec{F}$ lub literą pogrubioną – np. **F**.[3]

Oto przykład:



W tym przypadku wartość tego wektora |**w**| = w = 4 jednostki.

Jeżeli np. wektorem jest siła, to: |**F**| = F = 4 N. Natomiast nie piszemy tak: **F** = 4 N

Uwaga! Wartość wektora nie może być ujemna, bo nie może być ujemna długość odcinka.

Kilka uwag ogólnych:

- wektor zerowy to wektor, którego koniec pokrywa się z jego początkiem, a zwrot nie jest określony – np. wektor prędkości, gdy ciało osiąga najwyższy punkt toru w rzucie pionowym do góry;[4]
- dwa wektory uważa się za równe, jeżeli mają takie same wartości i zwroty i leżą na tej samej prostej lub na prostych wzajemnie równoległych;
- wektor można przesuwać wzdłuż linii działania;[5]
- wektory osiowe, jak np. wektor *prędkości kątowej*, *przyspieszenia kątowego*, *momentu siły* czy *momentu pędu* nie mają ustalonego punktu zaczepienia;
- równość: $\mathbf{w}_1 = -\mathbf{w}_2$ oznacza, że wektory te mają taką samą wartość, leżą na tej samej prostej, lecz mają przeciwne zwroty – np. akcja i reakcja z III zasady dynamiki Newtona;
- wektor można pomnożyć lub podzielić przez liczbę (zawsze dodatnią!), co nie zmienia jego rodzaju;
- wektor można pomnożyć lub podzielić przez skalar, ale uzyskuje się wówczas inną wielkość wektorową – np. iloczyn masy ciała i jego prędkości jest pędem;
- nie dzieli się wektora przez wektor;
- wektor przez wektor można mnożyć na dwa sposoby: *skalarny*, w wyniku czego otrzymuje się skalar – np.: $\mathbf{F} \times \Delta\mathbf{r} = \Delta W$ i *wektorowy*, w wyniku czego otrzymuje się wektor – np.: $\mathbf{r} \times \mathbf{F} = \mathbf{M}_F$;
- w matematyce wektor swobodny we współrzędnych kartezjańskich zapisuje się w następujący sposób: $\mathbf{a} = a_x\mathbf{i} + a_y\mathbf{j} + a_z\mathbf{k}$, gdzie a_x, a_y, a_z to *współrzędne* tego wektora na osiach OX, OY i OZ, zaś **i, j, k** to osiowe wektory jednostkowe zwane też *wersorami*. Tak określony wektor jest wektorem swobodnym, czyli takim, który ma ustalony kierunek i zwrot, ale dowolny punkt przyłożenia;
- współrzędne wektorów mogą mieć zarówno wartości dodatnie jak i ujemne (rys.).

[1] Sir William Hamilton (1805–1865) – matematyk irlandzki, prof. uniwersytetu w Dublinie. Sformułował zasadę najmniejszego działania odgrywającą ważną rolę w fizyce teoretycznej.

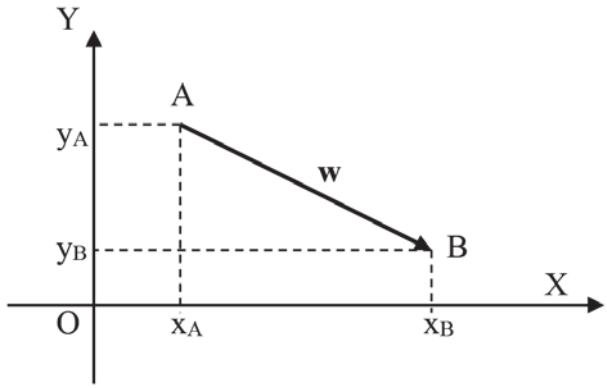
[2] W fizyce nazwy *wektor* i *wielkość wektorowa* to synonimy. Mówimy więc, że prędkość jest *wektorem* lub *wielkością wektorową*. Dodam, że *wielkość fizyczna* to mierzalna cecha ciała lub zjawiska.

[3] Będę tu stosował ten drugi sposób.

[4] Wynika to stad, że funkcja $v_y(t)$ w tym ruchu musi być funkcją ciągłą.

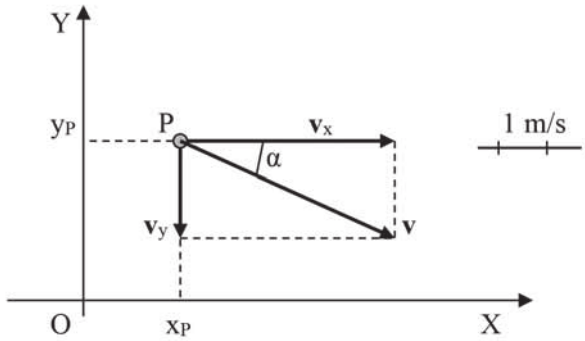
[5] Zwykle jednak w fizyce punkt zaczepienia (przyłożenia) wektora jest ściśle określony.

eprasa.pl 2e0409c816



W tym przypadku: $w_x = x_B - x_A > 0$. Natomiast $w_y = y_B - y_A < 0$

W fizyce współrzędne wektora są wielkościami mianowanymi tego samego rodzaju co wektor. W związku z tym pojawiają się problemy, bo o ile wektor położenia czy przemieszczenia jest współmierny z osiami (jego wartość podawana jest w jednostkach osi), to inne wektory tej cechy nie posiadają. W tych przypadkach współrzędna jest miarą danego wektora na danej osi, ale wyrażona w jednostkach tego wektora. Rysując więc taki wektor i podając jego współrzędne, należy każdorazowo ustalać odpowiedni odcinek jednostkowy dla tej wielkości (rys. poniżej).



W tym przypadku w punkcie $P(x_P, y_P)$ układu XY znajduje się ciało, które porusza się z prędkością chwilową **v.** Wektory $\mathbf{v}_x$ i $\mathbf{v}_y$ to *składowe* tego wektora w tym układzie.

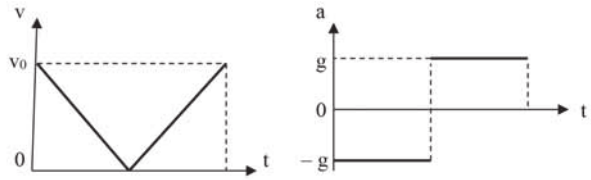
Przyjmując jednostkę prędkości jak na rysunku, widać, że wartości wektorów są następujące: prędkości $|\mathbf{v}| = \mathbf{v} = 4{,}47$ m/s, składowej $|\mathbf{v}_x| = 4$ m/s, składowej $|\mathbf{v}_y| = 2$ m/s, współrzędnej $v_x = 4$ m/s oraz $v_y = -2$ m/s. Wartości powyższych składowych oblicza się tu następująco: $v_x = v\cos(-\alpha)$ oraz $v_x = v\sin(-\alpha)$, gdzie kąt α jest kątem mierzonym pomiędzy kierunkiem osi a kierunkiem wektora z uwzględnieniem zwrotów zarówno osi jak i wektora.[6]

Dla celów praktycznych można powiedzieć, że współrzędna danego wektora na danej osi jest równa długości jego rzutu na tę oś ze znakiem plus, gdy zwrot rzutu jest zgodny ze zwrotem osi, a ze znakiem minus, gdy ów rzut ma zwrot przeciwny do osi.

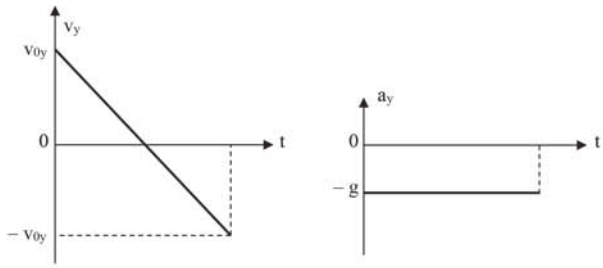
Dlaczego warto wprowadzić pojecie współrzędnej wektora i czy można obejść się bez niej? Oczywiście, że można, ale przy jej pomocy znacznie łatwiej opisuje się zarówno trajektorię ruchu ciała, jak i parametry tego ruchu. Niech przykładem będzie rzut pionowy w górę. Chcąc obliczyć położenie ciała w dowolnej chwili bez użycia pojęcia współrzędnej, należałoby ten ruch go podzielić na dwa etapy: na ruch jednostajnie opóźniony w górę oraz swobodne spadanie ciała w dół.

Natomiast stosując pojęcie współrzędnej oraz równanie:[7] $y(t) = y_0 + v_{0y}\,t + \frac{1}{2}\,a_y\,t^2$ a także przyjmując: $a_y = -g = -10$ m/s^2, łatwo obliczymy współrzędną położenia tego ciała po dowolnym czasie. Podobnie jest z wartością i zwrotem prędkości. Stosujemy wówczas równanie postaci: $v_y(t) = v_{0y} + a_y\,t$. Przy czym podobnie jak poprzednio: $a_y = -10$ m/s^2. Otrzymamy wówczas funkcje ciągłą bez nieciągłości w najwyższym punkcie toru, jak to jest w przypadku niestosowania pojęcia współrzędnej. Podobnie będzie z wykresem $a_y(t) = -g$.

Stosując pierwszy sposób, otrzymuje się następujące wykresy funkcji v(t) i a(t):



Jak widać na I wykresie występuje punkt nieciągłości funkcji, a drugi wykres jest fałszywy, bo wektor nie może przyjmować wartości ujemnej. Nie można jednak narysować inaczej, bo przyspieszenie powinno być równe tangensowi kąta nachylenia wykresu do osi czasu, a w przypadku kąta rozwartego tangens jest ujemny. Jak widać, pojawia się sprzeczność. Problemy te znikają, gdy zastosuje się funkcje $v_y(t)$ oraz $a_y(t)$. Oto ich wykresy:



Jak widać, unika się w ten sposób wspomnianych wyżej problemów.

Jeszcze ciekawiej jest w przypadku rzutu ukośnego. Ruch ten można rozpatrywać jako złożenie ruchu jednostajnego poziomego[8] z prędkością równą składowej x-owej wektora $\mathbf{v}_0$ oraz rzutu pionowego w górę z prędkością początkową równą składowej y-owej wektora $\mathbf{v}_0$. Ruch ciała

[6] Zaznaczam, że miara kąta jest dodatnia, gdy kąt odmierzany jest w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, a ujemna, gdy ów kierunek jest przeciwny do tego ruchu.

[7] Dokładniej jest to postać funkcyjna tego równania.

eprasa.pl 2e0409c816

w kierunku poziomym opisuje równanie: $x = v_{0x}\,t$, a ruch w kierunku pionowym równanie: $y = v_{0y}\,t - ½\,g\,t^2$. Przy czym $v_{0x} = v_0 \cos\alpha$, zaś $v_{0y} = v_0 \sin\alpha$, gdzie α to kąt rzutu zawarty pomiędzy osią OX i kierunkiem wektora $\mathbf{v}_0$, natomiast v_{0x} i v_{0y} to odpowiednie współrzędne wektora $\mathbf{v}_0$ na osi OX i OY.

Wyznaczając t z równania I i wstawiając do równania II, otrzymamy równanie będące funkcją y(x) o postaci: $y(x) = (v_{0y}/v_{0x})x - ½\,g\,x^2/v_{0x}^2$ lub: $y(x) = -(g/2v_{0x}^2)x^2 + (v_{0y}/v_{0x})x$.

Jest to równanie funkcyjne postaci: $y(x) = ax^2 + bx$, gdzie: $a = -g/2v_{0x}^2$, $b = \sin\alpha/\cos\alpha$, zaś $c = 0$. Wykresem tej funkcji jest parabola zwrócona gałęziami w dół i przechodząca przez punkt o współrzędnej (0, 0).

Równanie to pozwala łatwo obliczyć zarówno zasięg (z) jak i maksymalną wysokość rzutu (H). Wystarczy zauważyć, że współrzędnymi wierzchołka paraboli są:

$x_W = -b/2a = v_0^2 \sin\alpha \cdot \cos\alpha/g$

oraz $y_W = -\Delta/4a = v_0^2 \sin^2\alpha/2g$.

Zatem: $z = 2x_W = 2v_0^2 \sin\alpha \cdot \cos\alpha/g = v_0^2 \sin 2\alpha/g$.

Natomiast maksymalna wysokość tego rzutu: $H = v_0^2 \sin^2\alpha/2g$.

Ze wzoru na zasięg tego rzutu wynika, że jego maksymalną wartość osiągnie się, gdy $\sin 2\alpha = 1$ czyli dla $\alpha = 45^0$. Natomiast każdy inny zasięg otrzyma się przy dwóch różnych kątach rzutu, ale takich, że $\beta = 90 - \alpha$, gdyż $\sin(90 - \alpha) = \cos\beta$.

Wartość wektora prędkości w tym ruchu po czasie t można obliczyć z twierdzenia Pitagorasa: $v(t) = [(v_{0y} \sin\alpha - g\,t)^2 + (v_{0x} \cos\alpha)^2]^{½}$ a tangens kąta α pomiędzy wektorem $\mathbf{v}$ a osią OX jest ilorazem: $(v_{0y} \sin\alpha - g\,t)/(v_{0x} \cos\alpha)$.

Dodam, że w dowolnym punkcie toru można łatwo obliczyć zarówno promień jego krzywizny jak i składową styczną przyspieszenia liniowego. Wystarczy bowiem rozłożyć wektor **g** na składową styczną o wartości: $g_s = g \sin\alpha$ i radialną o wartości: $g_r = g \cos\alpha$. Składowa styczna wektora **g** to chwilowe przyspieszenie liniowe ciała. W fazie wznoszenia składowa ta ma zwrot przeciwny do zwrotu wektora prędkości chwilowej **v**, a w czasie opadania – przeciwny. Oznacza to, że w czasie wznoszenia ruch jest opóźniony, a w czasie opadania – przyspieszony. Znając składową radialną i stosując wzór: $a_d = v^2/r$, można obliczyć promień krzywizny toru w dowolnym jego punkcie. W najwyższym punkcie ów promień: $r = v_{0x}^2/g$.

Niestety, obliczenie drogi przebytej przez ciało w tym ruchu wykracza poza możliwości uczniów szkoły średniej, gdyż należałoby obliczyć całkę z dość kłopotliwej funkcji v(t). Można natomiast oszacować jej wartość w sposób przybliżony, rysując (również nieco przybliżony) wykres funkcji v(t) dla tego ruchu i obliczając tę drogę, przeliczając jednostkę pola powierzchni na jednostkę długości. Sporządzenie wykresu v(t) wymagać będzie obliczenia wartości prędkości chwilowej w kilku punktach toru. W trzech punktach jest ona znana, bo zarówno na początku ruchu, jak i na końcu $v = v_0$.

W przypadku, gdy $y_0 \neq 0$, otrzyma się nieco trudniejszy problem, ale można go rozwiązać podobną metodą. Metoda ta ma ten walor, że w całości wykorzystuje się w niej aparat matematyczny. Dla ucznia jest to dobry przykład na użyteczność matematyki w rozwiązywaniu problemów fizycznych, ale – niestety – można ją zastosować dopiero wówczas, gdy uczniowie przerobią odpowiednie działy matematyki, a to się stanie najwcześniej w II klasie liceum.

Waldemar Reńda

[8] Zakładamy, że brak jest sił oporu działających na ciało w tym kierunku.

Co w fizyce piszczy

Elastyczne diamenty

Diament kojarzy nam się z czymś niezwykle twardym. I tak naprawdę jest. Dzięki niezwykle małym odległościom międzycząsteczkowym diamenty są najtwardszymi materiałami znanymi ludziom. Odporne są też na zginanie czy rozciąganie. Jak to jednak zwykle bywa, to co jest prawdą w makroskali nie musi być prawdą w skali nano. Jak wykazał zespół uczonych australijskich igły diamentowe o długościach ok 20 nm pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego mogą się wyginać nawet o 90 st. Czyli nie taki diament twardy jak go malują.

Źródło: B Regan, at al. Plastic Deformation of Single&Crystal Diamond Nanopillars. Advanced Materials, 2020; 1906458 DOI: 10.1002/adma.201906458

Mały przyjaciel Słońca

Bliskie okolice Słońca wydają się rejonem bardzo niegościnnym. Ciągłe bulgotanie tego olbrzyma, promieniowanie i wiatr słoneczny stanowić powinny dostateczne przeszkody dla obecności jakichkolwiek obiektów, zwłaszcza takich małych jak asteroidy. Tymczasem w 2012 roku pojawiła się hipoteza, że możliwe jest istnienie asteroid w bliskim sąsiedztwie Słońca. Taki obiekt został znaleziony jednak dopiero w tym roku. Nosi on nazwę 2020 AV2 i obiega Słońce w czasie 151 dni po orbicie bliższej niż orbita Wenus.

Należy podkreślić, że zaobserwowanie takiego obiektu tak blisko Słońca nie było rzeczą łatwą, gdyż

światło słoneczne skutecznie to utrudniało oślepiając obserwatorów. Inną implikacją wspomnianego odkrycia jest pytanie czy Wenus może kiedyś w przyszłości przechwycić taki obiekt i tym samym zyskać swój księżyc. Innym pytaniem jest skąd wspomniana asteroida się tam wzięła? Otóż prawdopodobnie „urodziła się" ona między Marsem a Jowiszem, ale w efekcie oddziaływań grawitacyjnych została wypchnięta na swoją obecną ekstremalną orbitę.

Źródło: https://www.sciencenews.org/article/first-time-asteroid-has-been-found-nearer-sun-than-venus

eprasa.pl 2e0409c816

Rozwiązywanie zadań na zderzenia

Czesław **Surowiec**

Zderzenie jest to szeroka klasa procesów fizycznych polegająca na tym, że dwa lub więcej ciał (bryły sztywne, cząsteczki, atomy, cząstki elementarne) poruszają się względem siebie, zbliżają się do siebie na odpowiednio małą odległość (w przypadku ciał makroskopowych np. stykają się powierzchniami). Podczas zderzenia w wyniku ich oddziaływania, zmienia się ruch ciał uczestniczących w zderzeniu, stan wewnętrzny, liczba i rodzaj ciał.

Rozwiązując zadania na zderzenia należy pamiętać o tym, że:

1. Bardzo często można przyjąć, że efektywne oddziaływanie ciał zachodzi w skończonym czasie Δt nazywanym czasem zderzenia. Czasy zderzeń odpowiednio wynoszą:
   a) Dla zderzeń kul bilardowych $\Delta t = 10^{-2} \div 10^{-4}$ s.
   b) Dla komety spoza Układu Słonecznego $\Delta t = 10^{8} \div 10^{9}$ s.
   c) Dla zderzenia protonu z jądrem atomowym $\Delta t = 10^{-22} \div 10^{-23}$s.
2. Siły wzajemnego oddziaływania w czasie zderzenia nazywamy siłami zderzeniowymi lub chwilowymi i one powodują zmiany ruchu ciał podczas zderzenia, gdyż ich wartość jest bardzo dużą w porównaniu z innymi siłami, które pomijamy.
3. Czas zderzenia jest zazwyczaj bardzo mały, dlatego układ możemy uważać za odosobniony, do którego stosują się zasady: zachowania energii, zachowania pędu i zachowania momentu pędu.
4. Skutkiem oddziaływania sił zderzenia może być:
   a) Odkształcenie trwałe.
   b) Drganie akustyczne.
   c) Ogrzanie ciał
   d) Zmiana własności mechanicznych ciał.
5. Jeśli straty energii wywołane skutkiem oddziaływania sił zderzenia są bardzo małe, wówczas zderzenie możemy uważać za doskonale sprężyste (elastyczne) i wówczas pęd i energia mechaniczna zachowują się.
6. Po zderzeniu doskonale niesprężystym (nieelastycznym) ciała poruszają się z jednakową prędkością jako jedna całość i stosuje się do niego tylko zasada zachowania pędu, gdyż energia mechaniczna nie zachowuje się.
7. Podczas zderzenia doskonale sprężystego (np. kulek, piłki lub klocka ze ścianą) energia kinetyczna ciała uderzającego zamienia się w energię potencjalną sprężystości deformacji, która następnie zamienia się w energię kinetyczną.
8. Zderzenie jest centralne, jeśli wektory prędkości ciał zderzających sią leżą na prostej przechodzącej przez środki ich mas.
9. Opisując zderzenie rozróżniamy przedziały czasu:
   a) Przed zderzeniem.
   b) Podczas zderzenia.
   c) Po zderzeniu.
10. Zderzenia dotyczą również obiektów astronomicznych, takich jak gwiazdy i galaktyki.
11. Wiedza dotycząca świata cząstek elementarnych pochodzi z doświadczeń zderzeniowych, dlatego warto zderzeniom poświęcić więcej uwagi w nauczaniu fizyki.

Przykład 1.

Środki trzech kul o masach m_1, m_2 i m_3 leżą na jednej prostej. Pierwszej kuli, która zderzyła się doskonale sprężyście z drugą kulą nadano prędkość v_0. Następnie druga kula zderza się doskonale sprężyście z trzecią kulą. Obydwa zderzenia są centralne.

a) Jaką prędkość uzyska trzecia kula?

b) Ile powinna wynosić masa drugiej kuli m_2 (przy danych masach kul m_1 i m_3), aby prędkość trzeciej kuli była maksymalna dla danej prędkości v_0?

eprasa.pl 2e0409c816

Rozwiązanie.

a) Rozpatrzmy zderzenie kuli pierwszej z drugą. Z zasady zachowania pędu i energii otrzymujemy:

$m_1 \cdot v_0 = m_1 \cdot v_1 + m_2 \cdot v_2$

$1/2\ m_1 v_0^2 = 1/2\ m_1 v_1^2 + 1/2\ m_2 v_2^2$

Gdzie v_1 i v_2 są prędkościami pierwszej i drugiej kuli po zderzeniu. Przekształcamy układ równań do postaci $m_1(v_0 - v_1) = m_2 v_2$ $m_1(v_0 - v_1)(v_0 + v_1) = m_2 v_2^2$

Rozwiązując ten układ równań otrzymujemy dwa rozwiązania:

$v_1 = v_0$, $v_2 = 0$

$$v_1 = \frac{m_1 - m_2}{m_1 + m_2} v_0 \qquad v_2 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_0 \qquad ①$$

Pierwsze rozwiązanie opisuje sytuację do zderzenia i dlatego powinno być odrzucone. Przeprowadzając analogiczne obliczenia dla zderzenia kuli drugiej z trzecią otrzymujemy zależność dla v_3

$$v_3 = \frac{2m_2 v_2}{m_2 + m_3} \qquad ②$$

Podstawiając za v_2 do wzoru ② otrzymujemy

$$v_3 = \frac{4m_1 m_2 v_0}{(m_1 + m_2)(m_2 + m_3)} \qquad ③$$

a) Przekształcając zależność ③ doprowadzamy do takiej postaci, w której w liczniku mamy dane: masę m_1 i v_0, a w mianowniku wielkość szukaną m_2

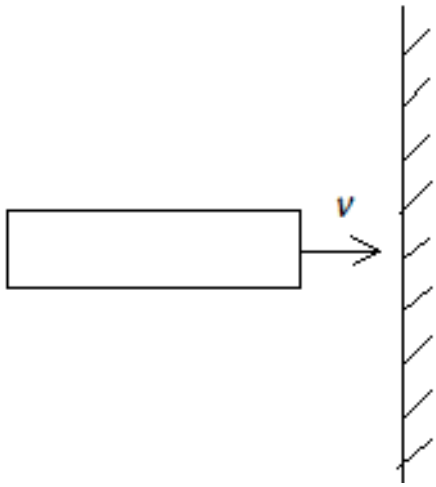
$$v_3 = \frac{4m_1 v_0}{m_1 + m_2 + m_3 + \frac{m_1 m_3}{m_2}} \qquad ④$$

Aby v_3 osiągnęło wartość maksymalną, mianownik zależności powinien osiągnąć wartość minimalną.

Zainteresowanym polecam wykazanie, że jest to spełnione dla $m_2 = \sqrt{m_1 m_3}$

Przykład 2.

Określ czas zderzenia klocka o długości l i gęstości ϱ i module Younga E z nieruchomą niedeformującą się ścianką (rys. 1)



Rozwiązanie.

Przed zderzeniem klocek posiada tylko energię kinetyczną ruchu postępowego. Po upływie czasu 0,5 t od początku zderzenia prędkość wszystkich jego części maleje do 0 a cały klocek jest zdeformowany.

Długość klocka zmniejsza się o Δl w porównaniu z długością początkową l. Całą energię klocka stanowi energia potencjalna jego deformacji, którą możemy zapisać wzorem

$$E_p = \frac{1}{2} k I^2$$

gdzie k jest współczynnikiem proporcjonalności między siłą i odkształceniem (współczynnik sprężystości) F = k Δl, Współczynnik k możemy wyrazić przez E, l i S z prawa Hooke'a

$$k = E\frac{S}{l} \qquad ①$$

Maksymalna deformacja Δl jest równa odległości na jaką przemieszczą się cząsteczki lewej strony klocka w czasie 0,5 t. Cząsteczki klocka poruszają się z prędkością v, dlatego możemy zapisać Δl następująco Δl = 0,5 v t ②.

Ponieważ wartość utraconej energii kinetycznej E_k jest równa wartości uzyskanej w wyniku deformacji klocka energii potencjalnej sprężystości E_p, uwzględniając, że m = ϱ S l możemy zapisać

$E_k = 1/2\ mv^2 = 1/2 \varrho\ V v^2 = 1/2\ \varrho\ S\ l\ v^2$ ponieważ V = S l

$E_p = 1/2\ k\ \Delta l^2 = 1/2\ E \cdot S/l \cdot (1/2\ v\ t)^2$

$E_k = E_p$

$1/2\ \varrho\ S\ l\ v^2 = 0{,}5\ E \cdot S/l \cdot (1/2\ v\ t)^2$

Rozwiązując to równanie względem t otrzymujemy

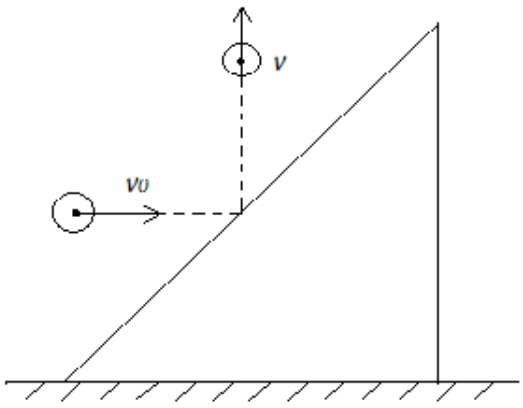
$$t = 2\ i\ 1\sqrt{\frac{\varrho}{E}}$$

czas zderzenia klocka stalowego ze ścianą, jeśli jego długość wynosi 28 cm zgodnie z tym wzorem $t = 10^{-4}$s.

Zadanie to możemy rozwiązać metodą analizy wymiarów opisanej w „Fizyce w Szkole z Astronomią", nr 4 rok 2018. Otrzymamy taki sam rząd wielkości t, w prostszy sposób i w krótszym czasie.

Przykład 3.

Kula o masie m lecąca poziomo z prędkością v_0, zderza się doskonale sprężyście ze spoczywającym klinem o masie M. Po zderzeniu klin ślizga się po poziomej powierzchni, a kulka odskakuje pionowo w górę (rys.2).



eprasa.pl 2e0409c816

Z jaką prędkością odbije się kulka od klina?

a) W jakim przypadku takie odbicie nie nastąpi?

b) Jaki warunek musi być spełniony, aby klocek w wyniku zderzenia z kulką podskoczył w górę?

Rozwiązanie.

a) Rozpatrzmy dwa zderzenia: kulki z klinem i klina z Ziemią. Zazwyczaj w rozwiązaniu takiego zadania pomijamy drugie zderzenie. Zastosujemy zasadę zachowania pędu i energii, przyjmując, że oddziaływanie kulki z klinem i klina z poziomą powierzchnią zachodzi natychmiastowo i jednocześnie. Zasadę zachowania pędu dla kierunku poziomego zapisujemy w postaci.

$m\,v_0 = M\,v_1$ ①

v_1 – składowa pozioma prędkości klina po zderzeniu.

Zasadę zachowania pędu dla składowych pionowych zapisujemy następująco

$m\,v = M\,v_2$ ②

v_2 – składowa pionowa prędkości klina po zderzeniu

Zasadę zachowania energii dla pierwszego zderzenia zapiszemy w postaci

$1/2\, mv_0^2 = 1/2\, mv^2 + 1/2\, M\,(v_1^2 + v_2^2)$ ③

Podstawiając za v_1 z równania ① i za v_2 z równania ② do zależności ③ otrzymujemy

$$v^2 = \frac{v_0^2(M-m)}{M+m} \quad ④$$

W wyniku pierwszego zderzenia klin posiada energię kinetyczną związaną z ruchem poziomym i pionowym. Nabywając składową pionową prędkości w wyniku pierwszego zderzenia klin nie zdąży przemieścić się pionowo, ponieważ natychmiast następuje następne zderzenie z Ziemią, w wyniku czego porusza się poziomo. Ponieważ nie podskoczył należy przyjąć, że zderzenie z Ziemią było niesprężyste. Składowa pionowa klina nie wystąpiła w tym zderzeniu, dlatego odpowiednia część energii kinetycznej klina zamieniła się w ciepło.

b) Aby odpowiedzieć na drugie pytanie rozważmy przypadki:

1) M dużo większe od m z ④ $v = v_0$

2) M większe od m zależność ④ ma sens

3) M mniejsze od m, kula nie może odbić się pionowo w górę.

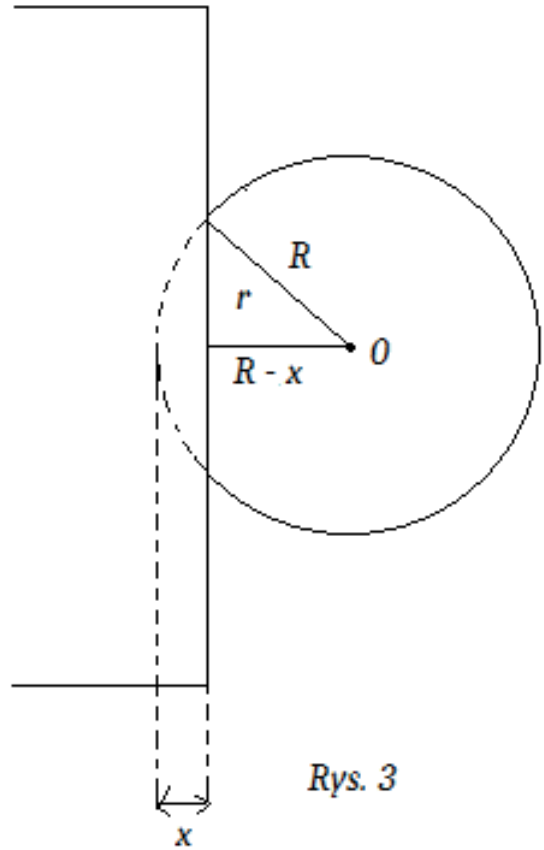
c) Gdyby zderzenie klina z Ziemią było doskonale sprężyste to składowa pionowa v_2 zmieniłaby zwrot na przeciwny, a klin podskoczyłby w górę na pewną wysokość za kulką.

Przykład 4.

Oblicz czas i maksymalną siłę sprężystego zderzenia piłki futbolowej o danych: m = 0,4 kg, R = 0,15 m, p = 2016 hPa, v_0 = 15 m/s z niedeformującą się ścianką, jeśli ciśnienie atmosferyczne p_a= 1013 hPa. Przyjmujemy, że odkształcenie piłki x jest dużo mniejsze od promienia piłki R, oraz pomijamy sprężystość pokrycia piłki.

Rozwiązanie.

Siły działające na piłkę to siła reakcji ścianki F_r i siła ciśnienia atmosferycznego, ponieważ pomijamy siłę sprężystości pokrycia piłki. Siła F_r zgodnie z trzecią zasadą



Rys. 3

dynamiki jest równa liczbowo i zwrócona przeciwnie do siły nacisku F_n piłki na ściankę. Ciśnienie powietrza wewnątrz piłki podczas uderzenia oraz jej deformacje są we wszystkich punktach jednakowe. Powietrze wewnątrz piłki wywiera na część piłki stykającą się ze ścianką ciśnienie p, dlatego zapiszemy siłę F_n następująco:

$F_n = F_r = pS = \pi\, r^2\, p$,

gdzie $\pi\, r^2$ jest powierzchnią zetknięcia piłki ze ścianką.

Dzieląc powierzchnię zetknięcia piłki z otaczającym powietrzem na małe części $\Delta\, S_i$, na które działa siła ciśnienia atmosferycznego $\Delta\, F_i = p_a\, \Delta\, S_i$, prostopadle do powierzchni piłki. Sumując składowe tej siły prostopadłe do ścianki otrzymujemy zależność na siłę wywieraną przez ciśnienie atmosferyczne

$F_a = \pi\, p_a r^2$

Siłę jaką wywiera piłka na ściankę F w wyniku zderzenia z nią zapiszemy następująco:

$F = F_n - F_a = \pi\, r^2(p - p_a)$ ①

Z rysunku 3 otrzymujemy zależność:

$$r = \sqrt{R^2 - (R-x)^2} = \sqrt{2Rx - x^2}$$

Deformacja piłki x jest bardzo mała w porównaniu z jej promieniem R, dlatego x^2 możemy pominąć w porównaniu z 2Rx.

Zależność ① przyjmie postać:

$F = \pi(2Rx - x^2)\,(p - p_a) \approx 2\pi Rx\,(p - p_a)$

Jeśli uwzględnimy, że siła ta jest zwrócona przeciwnie do deformacji możemy zapisać

$F = -\,2\pi R(p - p_a)x = -\,k\,x$

gdzie $k = 2\pi R\,(p - p_a)$ jest współczynnikiem proporcjonalności i wskazuje na to, że zderzenie piłki ze ścianką jest sprężyste. Pod wpływem działania takiej siły ciało może wykonywać drgania których okres wyraża się wzorem

eprasa.pl 2e0409c816

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}}$$

Czas zderzenia piłki ze ścianką jest równy połowie T.

$$t = \frac{1}{2}T = \pi\sqrt{\frac{m}{k}} = \pi\sqrt{\frac{m}{2\pi R(p-p_a)}} = \sqrt{\frac{\pi m}{2R(p-p_a)}} = 6{,}4 \text{ i } 10^{-3} s$$

$$F_{max} = 2\pi R(p-p_a)x_{max} \quad \text{gdzie } x_{max} = \sqrt{\frac{m}{k}} \text{ i } v_0 = 3 \text{ cm}$$

F_{max} = 2800N

Zadania.

Zadanie 1.

Kulka o masie m poruszająca się z prędkością v_0 zderza sią centralnie i sprężyście ze spoczywającą kula o masie M.

a) Jaką energię przekaże spoczywające kuli?

b) Jak zależy energia stracona przez uderzającą kulę od mas obu kul?

Odpowiedź:

a) $E = \frac{2Mm^2v_0^2}{(M+m)^2}$

b) ΔE_{max} dla $\frac{m}{M} = 1$

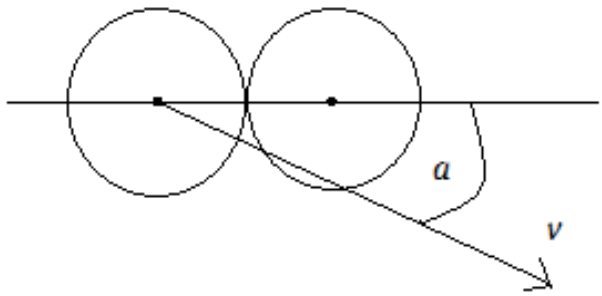
Zadanie 2.

Gumowa piłeczka o masie m uderza z prędkością v_0 w dwie spoczywające stykające się ze sobą kuki stalowe o takiej samej masie jak gumowa. Zderzenie kulek jest centralne i sprężyste. Ile wyniosą prędkości kulek po zderzeniu?

Odp. $v_1 = -\frac{v_0}{3}$ $\quad v_2 = v_3 = \frac{2v_0}{3}$

Zadanie 3.

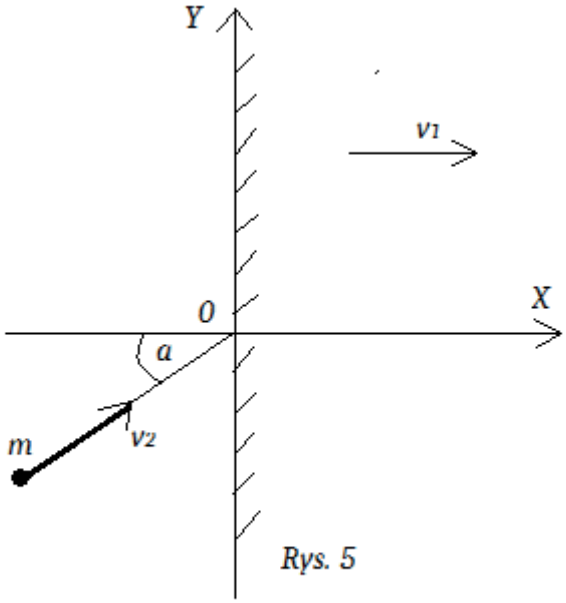
Gładka niesprężysta kulka uderza o taką samą kulkę spoczywającą (rys. 4). Prędkość kulki uderzającej tworzy kąt α z prostą przechodzącą przez środki kul. Pod jakim kątem β będą się poruszać po zderzeniu?



Odp. β = arc tg (2 tgα)

Zadanie 4

Gładka pionowa ścianka porusza sią poziomo z prędkością v_1. W ściankę trafia kulka o masie m, poruszająca



Rys. 5

się z prędkością v_2, tworząca kąt α z prostopadłą do ścianki. Uważając zderzenie kulki ze ścianką za doskonale sprężyste oblicz wartość prędkości v'_2 kulki po zderzeniu i kąt β odbicia kulki od ścianki (rys. 5).

Odp.

$$v'_2 = \sqrt{v_2^2 - 4v_1v_2\cos\alpha + 4v_1^2} \qquad \beta = \text{arc tg}\frac{v_2\sin\alpha}{v_2\cos\alpha - 2v_1}$$

Zadanie 5

Wyraź zależność siły oddziaływania dwóch jednakowych kulek podczas sprężystego i centralnego ich zderzenia od: promienia R, modułu sprężystości materiału E i wielkości odkształcenia x.

Odp. Rozwiązują zadanie metodą przybliżonych obliczeń opisaną w nr 3 z 2017 r. w „Fizyce w Szkole z Astronomią" otrzymamy wynik: $F \approx E\sqrt{Rx^3}$

Zadanie 6

Dwie gładkie jednakowe kule o masie M każda spoczywają na gładkiej poziomej płaszczyźnie stykając się ze sobą. Trzecia kula o masie m i takim samym promieniu poruszająca się z prędkością $\vec{v}$ przechodząca przez punkt zetknięcia spoczywających kul, prostopadle do prostej przechodzącej przez środki mas tych kul. Określić prędkość kul po doskonale sprężystym zderzeniu.

Odp.

$v_1 = \frac{(2m-3M)v}{2m+3M}$ w tym samym kierunku

$v_2 = v_3 = \frac{2\sqrt{3} \text{ i } m \text{ i } v}{2m+3M}$

pod tym samym kątem $\frac{\pi}{6}$ z kierunkiem $\vec{v}$.

Czesław Surowiec,
Dębica

eprasa.pl 2e0409c816

Oddziaływanie Księżyca na Ziemię – pływy

dr Marcin **Wesołowski**, dr hab. Piotr **Gronkowski**

Najbliższym kosmicznym sąsiadem Ziemi jest jej naturalny satelita – Księżyc. Przeprowadzając obserwacje profesjonalne (a także amatorskie) „srebrnego globu" z łatwością możemy stwierdzić, że widzimy go na niebie w różnych jego fazach. Na samym początku nowego cyklu (niemalże zaraz po nowiu) możemy Księżyc obserwować jako wąski sierp. Z każdym kolejnym dniem zaczyna go przybywać aż do momentu pełnej tarczy (pełni Księżyca). Po tym okresie jego widok zaczyna się zmieniać tzn. Księżyca ubywa. Wobec tego możemy wyróżnić następujące fazy Księżyca: nów, I kwadra, pełnia, III kwadra. Warto zaznaczyć, że poszczególne fazy księżycowe mogą być uważane za miernik czasu. Co więcej porusza się on na niebie znacznie szybciej niż Słońce. W ciągu jednej doby Księżyc przemieszcza się z prędkością kątową około 13º na dobę na tle gwiazd z zachodu na wschód.

Dla porównania warto odnotować, że Słońce porusza się z prędkością kątową na tle gwiazd około 1º na dobę z zachodu na wschód. Oczywiście tego nie obserwujemy bezpośrednio, gdyż Słońce oglądane jest przez nas z Ziemi w dzień i wtedy nie widzimy gwiazd nieba nocnego. Ruch Księżyca względem Słońca na niebie określa jednostkę czasu, którą w astronomii nazywamy miesiącem synodycznym. Inaczej mówiąc jest to okres czasu pomiędzy tymi sami fazami Księżyca, czyli: od nowiu do nowiu lub od pełni do pełni. Czas trwania miesiąca synodycznego wynosi w przybliżeniu $29^d12^h44^m8^s$ czyli 29.5306 dób słonecznych. Miesiąc synodyczny oczywiście nie jest jedynym okresem czasu, który związany jest z ruchem Księżyca. Czas, po upływie którego „nasz srebrny glob" obiegnie dokoła Ziemię i dodatkowo powróci dokładnie w to samo miejsce na tle gwiazd w astronomii określamy mianem miesiąca gwiazdowego (syderycznego), który trwa w przybliżeniu $27^d7^h43^m11.5^s$.

Wykonując prostą analizę możemy stwierdzić, że miesiąc gwiazdowy jest średnio o dwie doby krótszy od miesiąca synodycznego. Różnica ta wynika przede wszystkim z prędkości kątowej ruchu tych ciał na tle gwiazd w tym samym kierunku (z zachodu na wschód). Z przeprowadzonej analizy wynika również kolejny istotny fakt, a mianowicie, że Księżyc w ciągu miesiąca gwiazdowego dokona jednego pełnego obiegu całego nieba. Podczas gdy Słońce potrzebuje na to całego roku gwiazdowego.

Oznacza to, że w ciągu jednej pełnej doby Księżyc przesuwa się po niebie o kąt równy: 360°/MG a Słońce o kąt równy: 360°/RG, gdzie MG oznacza miesiąc gwiazdowy, a RG jest rokiem gwiazdowym. Korzystając z tych rozważań możemy stwierdzić, że to Księżyc wyprzedza Słońce w swym ruchu na tle gwiazd o kąt: $\alpha = 360°/MG - 360°/RG$ w ciągu jednej doby. Wobec tego warto zauważyć, że wyprzedzenie Słońca przez Księżyc o kąt 360º następuje dokładnie po upływie miesiąca synodycznego (MS). Podsumowując możemy więc zapisać, że:

$$\frac{360^\circ}{MS} = \alpha, \qquad (1)$$

lub

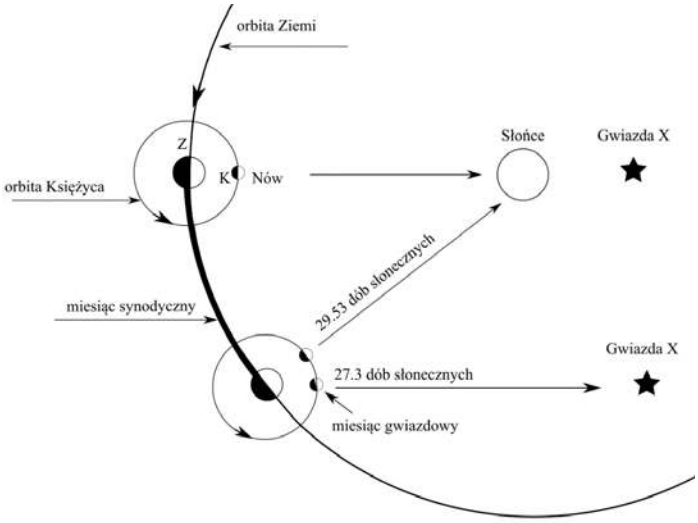
$$\frac{360^\circ}{MS} = \frac{360^\circ}{MG} - \frac{360^\circ}{RG}. \qquad (2)$$

Podzielmy teraz równanie (2) obustronnie przez 360º, wówczas otrzymamy:

$$\frac{1}{MS} = \frac{1}{MG} - \frac{1}{RG}. \qquad (3)$$

Uzyskane równanie (3) może posłużyć do wyznaczania długości trwania miesiąca synodycznego przy założeniu znajomości miesiąca i roku gwiazdowego.

eprasa.pl 2e0409c816



Rys. 1. Ilustracja różnicy pomiędzy miesiącem gwiazdowym a synodycznym.

Foto. 1. Przykładowa fotografia tarczy Księżyca, na której widoczne są liczne kratery oraz linia terminatora oddzielająca część oświetloną od części nieoświetlonej tarczy Księżyca (fotografia wykonana przez M. Wesołowskiego w obserwatorium astronomicznym Uniwersytetu Rzeszowskiego).

Księżycowe pływy, czyli przypływy i odpływy mórz i oceanów

Zjawisko pływów stosunkowo długo pozostawało tajemnicą, pomimo tego, że istniały dość wyraźne wskazówki, że jest ono związane z oddziaływaniem Księżyca na Ziemię. Fakt ten spowodowany był tym, że bardzo trudno było ludziom do czasów Newtona wyobrazić sobie taki związek, gdyż nie było wówczas znane prawo powszechnej grawitacji. Nawet słynny matematyk, fizyk i astronom Galileusz powątpiewał, a niekiedy wyśmiewał się z takiego przypuszczenia. Dopiero Izaak Newton udowodnił, że pływy są rzeczywiście wynikiem różnego przyciągania części wód mórz i oceanów przez Księżyc – była to pierwsza teoria grawitacyjna pływów – teoria statyczna.

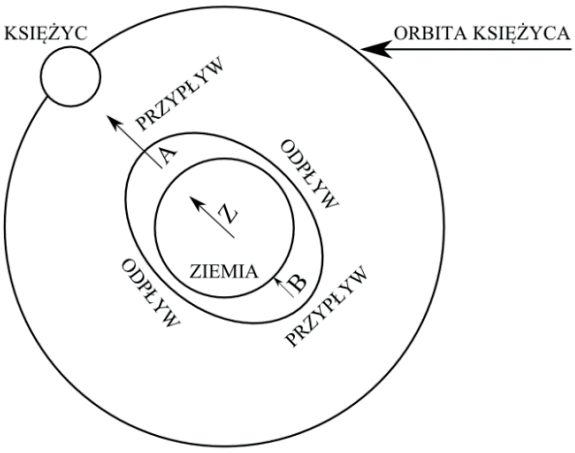
Aby dokładnie zrozumieć omawiany problem przeprowadźmy pewien myślowy eksperyment. Załóżmy, że cała powierzchnia Ziemi jest równomiernie pokryta wodą. Wobec tego niemalże od razu możemy stwierdzić, że wody, które znajdują się bliżej Księżyca będą najsilniej przyciągane. Powstanie tam wówczas fala przypływu, którą nazywamy tzw. wysoką wodą. Podczas ruchu obrotowego wykonywanego przez Ziemię fala ta będzie się przemieszczała. Jeżeli byłoby to kompletne wytłumaczenie zjawiska pływów to taka wysoka woda występowałaby w danym miejscu na powierzchni Ziemi raz na dobę. Analizując bogaty materiał obserwacyjny możemy stwierdzić, że mamy do czynienia w ciągu doby z dwoma takim falami, które powtarzają się okresowo co $12^h\ 25^m$. Wobec tego nasuwa się nam bardzo proste pytanie: w jaki sposób powstaje druga wysoka fala? Aby udzielić poprawnej odpowiedzi na tak postawione pytanie posłużymy się uproszczonym rysunkiem, który zobrazuje nam ten problem (rys. 2).

Przyjmijmy za Newtonem, że ciałem niebieskim, które wywołuje pływy jest Księżyc. Wobec tego wyobraźmy sobie trzy hipotetyczne punkty, które znajdują się na Ziemi: A, B, Z; przy czym punkt Z znajduje się w środku Ziemi, punkty A i B znajdują się na oceanie, ale punkt A położony jest znacznie bliżej Księżyca niż punkt B (rys. 2). Skorzystajmy w tym miejscu z prawa powszechnego ciążenia, z którego wynika następujące stwierdzenie: „oddziaływanie grawitacyjne zachodzące pomiędzy dwoma ciałami maleje wraz z kwadratem odległości pomiędzy nimi". Wobec tego przyciąganie grawitacyjne będzie najsilniejsze w punkcie A; nieco mniejsze w punkcie Z; a najmniejsze w punkcie B (rys. 2).

Na podstawie przeprowadzonego myślowego eksperymentu możemy stwierdzić, że w punkcie A powstaje fala przypływu, która jest efektem ucieczki wody od Ziemi.

Natomiast w punkcie B mamy do czynienia z sytuacją odwrotną tzn. że powstała druga fala, która jest efektem ucieczki ale tym razem Ziemi od tej wody. Uwzględniając ruch obrotowy Ziemi można by się spodziewać, że dwie fale przypływu (w punkcie A i B) powtarzałyby się co 12 godzin.

Aby jednak dokładnie oszacować okres czasu pomiędzy pierwszą i drugą wysoką wodą musimy jeszcze



Rys.2. Powstawanie pływów księżycowych.

eprasa.pl 2e0409c816

uwzględnić geometrię układu Ziemia – Księżyc. Otóż, gdy Ziemia dokonuje jednego pełnego obrotu, to Księżyc obiegając Ziemię przesuwa się na swej orbicie – wówczas Ziemia potrzebuje jeszcze dodatkowo około 50 minut na to, aby ten sam punkt znalazł się dokładnie pod Księżycem. Uwzględniając powyższe fakty możemy już jednoznacznie stwierdzić, że przypływy powtarzają się co około 12 godzin i 25 minut.

W celu wykonania opisu matematycznego rozważanego zagadnienia musimy rozważyć dynamiczne oddziaływanie Ziemi i Księżyca. Pod wpływem wzajemnej grawitacji te dwa ciała kosmiczne wirują względem środka masy swego układu $S_{Z\text{-}K}$ po orbitach kołowych. Promień orbity kołowej Ziemi niech będzie równy r_1 a promień kołowej orbity Księżyca r_2 (Rys. 3). Ziemia i Księżyc zawsze znajdują się naprzeciwko siebie w odległości *d* oraz prędkość kątowa (ω) tych dwóch ciał w ich ruchu orbitalnym względem środka masy $S_{Z\text{-}K}$ jest taka sama. Rozważmy ruch obu ciał w nieinercjalnym układzie odniesienia wirującym tak samo jak te ciała. W tym układzie Ziemia i Księżyc są nieruchome, dlatego siły odśrodkowe są zrównoważone siłami wzajemnej grawitacji.

Siłę odśrodkową F_d *działającą na Ziemię* o masie M_Z *poruszającą się z prędkością V po okręgu o promieniu* r_1 zgodnie z drugą zasadą dynamiki Newtona *wyraża poniższa formuła:*

$$F_d = M_Z a_{od}. \tag{4}$$

W równaniu (4) a_{od} jest przyspieszeniem odśrodkowym działającym na Ziemię które można wyrazić następująco:

$$a_{od} = \frac{V^2}{r_1}, \tag{5}$$

gdzie *V oznacza prędkość liniową Ziemi, a* r_1 *jest promieniem orbity Ziemi względem środka masy. Ponieważ prędkości kątowe* ω Ziemi i Księżyca są takie same, więc wygodnie będzie dla nas w dalszych rozważaniach wykorzystać w równaniu (5) związek prędkości kątowej z prędkością liniową ($\omega = V/r_1$) – w rezultacie wartość przyspieszenia dośrodkowego jest równa:

$$a_{od} = \frac{V^2}{r_1} = \omega^2 r_1. \tag{6}$$

Wykorzystując równania (4 – 6) możemy zapisać ostateczny wzór na siłę odśrodkową działającą na Ziemię:

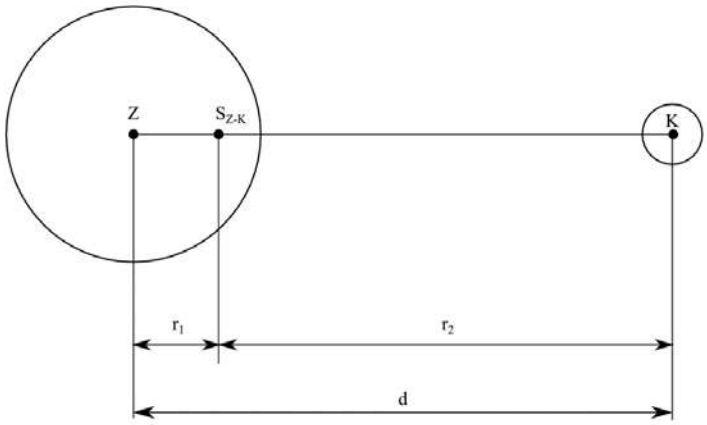
$$F_{od} = M_Z \omega^2 r_1. \tag{7}$$

Analogiczny wzór będzie reprezentował siłę odśrodkową, której poddany jest Księżyc.

Drugą siłą, która równoważy działanie siły odśrodkowej działającą na Ziemię jest siła grawitacji, którą wyrażamy następująco:

$$F_g = \frac{G M_Z M_K}{d^2}. \tag{8}$$

W powyższym równaniu G jest stałą grawitacji oraz M_Z i M_K oznaczają odpowiednio masę Ziemi i Księżyca a *d*



Rys. 3. Układ Ziemia–Księżyc. Na rysunku przyjęto następujące oznaczenia: Z – środek Ziemi, K – środek Księżyca, $S_{Z\text{-}K}$ – środek masy układu Ziemia-Księżyc, d – odległość pomiędzy Ziemią a Księżycem (dokładniej średnia odległość pomiędzy środkami ich mas), r1 – odległość między środkiem masy Ziemi a środkiem układu Ziemia–Księżyc, r2 – odległość układu Ziemia–Księżyc do środka masy Księżyca.

jest wzajemną odległością tych ciał kosmicznych. Dodatkowo warto zauważyć, że jeśli chodzi o Ziemię jedynie w odległości środka masy Księżyca od środka masy Ziemi równej właśnie *d (a więc w środku Ziemi) siła grawitacji równoważy działanie siły* odśrodkowej. Analogicznie ma się sprawa z Księżycem.

W oparciu o rys. (3) warto zauważyć, że: $d = r_1 + r_2$.

W przyjętym nieinercjalnym układzie odniesienia warunki równowagi pomiędzy siłą grawitacji i siłą odśrodkową odpowiednio dla Ziemi i Księżyca są wyrażone poniżej.

W przypadku Ziemi zachodzi następująca równość:

$$M_Z \cdot \omega^2 \cdot r_1 = \frac{G \cdot M_Z \cdot M_K}{d^2}, \tag{9}$$

a w przypadku Księżyca mamy:

$$M_K \cdot \omega^2 \cdot r_2 = \frac{G \cdot M_Z \cdot M_K}{d^2}. \tag{10}$$

Podzielmy obustronnie równanie (9) przez M_Z, a równanie (10) przez M_K i dodajmy je do siebie stronami, wówczas otrzymujemy:

$$\omega^2 \cdot r_1 + \omega^2 \cdot r_2 = \frac{G \cdot M_K}{d^2} + \frac{G \cdot M_Z}{d^2}. \tag{11}$$

Upraszczając lewą stronę równania (11) oraz pamiętając, że: $d = r_1 + r_2$ możemy zapisać:

$$\omega^2 \cdot \underbrace{(r_1 + r_2)}_{d} = \frac{G \cdot M_Z}{d^2} + \frac{G \cdot M_K}{d^2}. \tag{12}$$

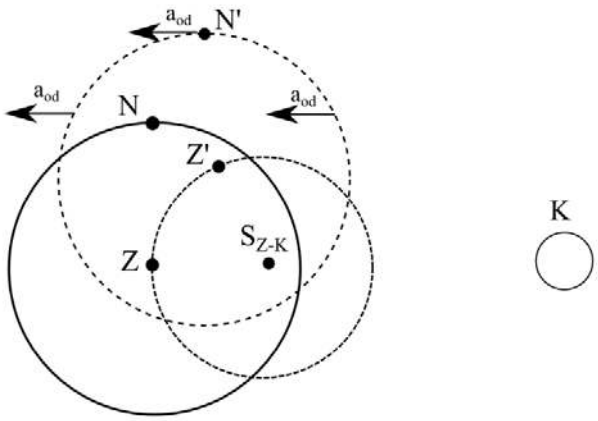
Wykonując elementarne przekształcenia równania (12) mamy:

$$\omega^2 \cdot d = \frac{G \cdot (M_Z + M_K)}{d^2}. \tag{13}$$

Dodatkowo podzielmy teraz równanie (13) obustronnie przez *d* wówczas otrzymamy, że:

$$\omega^2 = \frac{G \cdot (M_Z + M_K)}{d^3}. \tag{14}$$

eprasa.pl 2e0409c816



Rys. 4. Ziemia krążąca po orbicie kołowej o promieniu $r_1 = ZS_{Z-K}$ z prędkością kątową ω wokół środka masy układu Ziemia-Księżyc. Konsekwencją tego ruchu jest działanie przyśpieszenia odśrodkowego aod na każdy punkt naszego globu.

Uwaga: Przyspieszenie odśrodkowe działające na każdy punkt Ziemi wyraża się zatem wzorem:

$$a_{od} = \omega^2 \cdot \left|\vec{ZS}\right| = \omega^2 \cdot r_1. \tag{15}$$

Wykorzystując właściwości środka masy układu Ziemia – Księżyc, czyli punktu S_{Z-K} możemy napisać następujące równanie:

$$M_Z \cdot r_1 = M_K \cdot r_2. \tag{16}$$

W oparciu o równania: (14), (16) oraz zależność: $d = r_1 + r_2$, można łatwo pokazać, że:

$$r_1 = \left(\frac{M_K}{M_Z + M_K}\right) \cdot d. \tag{17}$$

Korzystając z równań (6), (14) i (17) obliczymy, że wartość przyspieszenia odśrodkowego wyraża się następującym wzorem:

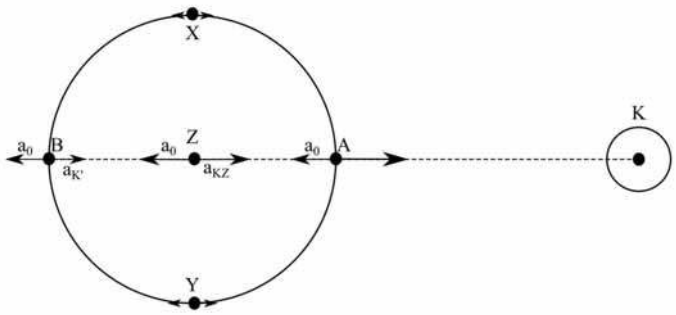
$$a_{od} = \frac{G \cdot M_K}{d^2}. \tag{18}$$

W tym miejscu należy podkreślić, że ruch obrotowy Ziemi i Księżyca wokół wspólnego środka ciężkości jest nieco inny niż ruch opisany przez koło. Ziemia i Księżyc krążą wokół wspólnego środka masy bez rotacji wokół swoich środków masy, lecz wykonują tylko prosty ruch translacyjny. Inaczej mówiąc ich orientacja przestrzenna nie zmienia się. Każdy punkt na powierzchni Ziemi (podobnie na powierzchni Księżyca) poddany jest takiemu samemu przyspieszeniu odśrodkowemu bezwładności. Wartości i kierunki tych przyspieszeń są jednakowe.

Przyspieszenie pływowe

W tej części artykułu wyprowadzimy równania określające wartości przyspieszenia pływowego w punkcie A i B. W tym celu posłużymy się następującym rysunkiem (rys.5).

W tej części artykułu wyprowadzimy formuły na przyspieszenie pływowe w punkcie A (podksiężycowym) i w punkcie B (odksiężycowym) na powierzchni Ziemi, które wywołane jest wpływem Księżyca na ziemskie wody (rys.5).



Rys. 5. Graficzny rozkład przyspieszeń występujących na powierzchni Ziemi, których przyczyną jest oddziaływanie Księżyca. Punkt A (podksiężycowy) znajduje się najbliżej Księżyca a punkt B (odksiężycowy) znajduje się najdalej od naszego naturalnego satelity. Punkt Z oznacza środek masy Ziemi. Dodatkowo w punktach X i Y zaznaczono odpływy wód.

Rozpatrzmy mały element masy w pobliży punktu A od strony Księżyca, dla którego przyspieszenie grawitacyjne pochodzące od naturalnego satelity naszej planety dane jest wzorem:

$$a_K = \frac{G \cdot M_K}{(d - R)^2}, \tag{19}$$

gdzie a_K – oznacza przyspieszenie grawitacyjne elementu masy w otoczeniu punktu A, G – stałą grawitacji, M_K – masa Księżyca, d – odległość pomiędzy środkami Ziemi i Księżyca, a R jest promieniem Ziemi. W przypadku środka Ziemi Z pochodzące od Księżyca przyspieszenie dane jest następującą zależnością:

$$a_0 = \frac{G \cdot M_K}{d^2}. \tag{20}$$

Warto zauważyć na postawie równań (18) i (20) że $a_{od} = a_0$. Wobec tego możemy wyznaczyć całkowite przyspieszenie a_A w punkcie A (g oznacza przyśpieszenie grawitacyjne ziemskie na powierzchni naszej planety):

$$a_A = g + a_0 - a_K. \tag{21}$$

Wykorzystując równania (19 – 21) otrzymujemy:

$$a_A = g + \frac{G \cdot M_K}{d^2} - \frac{G \cdot M_K}{(d - R)^2}, \tag{22}$$

Przekształcając prawą stronę równania (22) mamy:

$$a_A = g + \frac{G \cdot M_K}{d^2} - \frac{G \cdot M_K}{d^2 \cdot \left(1 - \frac{R}{d}\right)^2}. \tag{23}$$

W kolejnym kroku aby uprościć prawą stronę równania (23) skorzystamy z przybliżenia, które jest słuszne dla:

$$x \ll 1 : \frac{1}{(1-x)^2} \approx 1 + 2 \cdot x,$$

wówczas równanie (23) przyjmuje postać:

$$a_A = g + \frac{G \cdot M_K}{d^2} - \frac{G \cdot M_K}{d^2} \cdot \left(1 + 2 \cdot \frac{R}{d}\right). \tag{24}$$

eprasa.pl 2e0409c816

Po wykonaniu elementarnych przekształceń otrzymujemy następujący wzór:

$$a_A = g - 2 \cdot \frac{G \cdot M_K \cdot R}{d^3}. \tag{25}$$

Podobnie wyznaczymy całkowite przyspieszenie a_B w punkcie B. W tym przypadku spełniona będzie następująca zależność:

$$a_B = g - a_o + a_K' = g - \frac{G \cdot M_K}{d^2} + \frac{G \cdot M_K}{(d+R)^2}. \tag{26}$$

Postępując w analogiczny sposób jak dla przypadku A otrzymujemy:

$$a_B = g - \frac{G \cdot M_K}{d^2} + \frac{G \cdot M_K}{d^2 \cdot \left(1 + \frac{R}{d}\right)^2}. \tag{27}$$

Pamiętajmy o tym, że w tym przypadku wykorzystaliśmy następujące przybliżenie:

$$\frac{1}{(1+x)^2} \approx 1 - 2 \cdot x.$$

Dlatego możemy zapisać, że:

$$a_B = g - \frac{G \cdot M_K}{d^2} + \frac{G \cdot M_K}{d^2} \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{R}{d}\right) = g - 2 \cdot \frac{G \cdot M_K \cdot R}{d^3}. \tag{28}$$

Występujący w równaniach (25) oraz (28) wyraz $\frac{2 \cdot G \cdot M_K \cdot R}{d^3}$ jest poszukiwanym przyspieszeniem pływowym w punktach A i B na powierzchni Ziemi. Tak więc w pierwszym przybliżeniu przyśpieszenia pływowe a_A oraz a_B w punkcie podksiężycowym (A) i odksiężycowym (B) są równe:

$$a_A = a_B. \tag{29}$$

W ostatnim kroku oszacujemy jeszcze wartość siły pływowej. W tym celu ponownie rozważmy mały element masy znajdujący się na powierzchni Ziemi (rys. 6).

Dla punktu P_1 o współrzędnych (0, 0, z) możemy zapisać następujący wzór na wartość przyspieszenia grawitacyjnego:

$$g = -\frac{G M_K}{(r_0 + z)^2}, \tag{30}$$

Z drugiej strony księżycowe przyspieszenie grawitacyjne w punkcie O (środku Ziemi) wynosi:

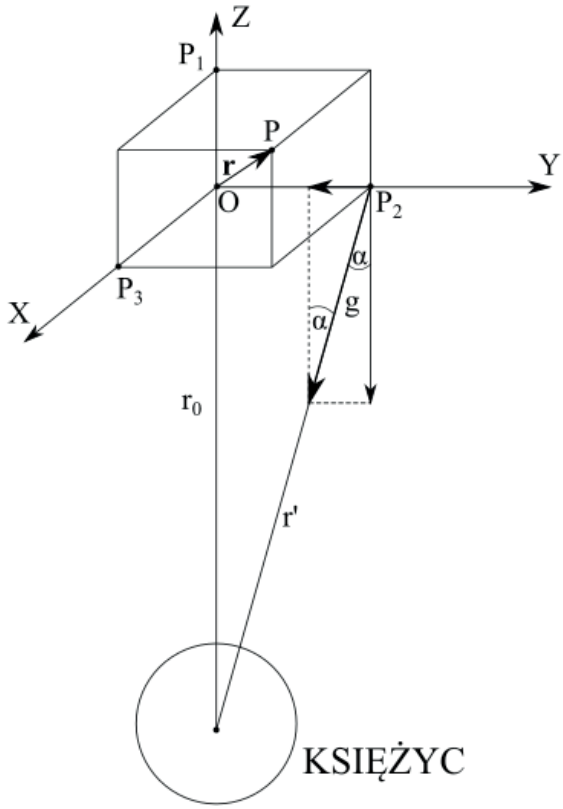
$$g_0 = -\frac{G M_K}{r_0^2}. \tag{31}$$

Dlatego przyspieszenie punktu P_1 względem punktu O jest równe:

$$a_Z = g - g_0. \tag{32}$$

Wykorzystując równania (20-28) otrzymujemy:

$$a_Z = -\frac{G M_K}{(r_0 + z)^2} - \left(-\frac{G M_K}{r_0^2}\right) = -\frac{G M_K}{(r_0 + z)^2} + \frac{G M_K}{r_0^2}. \tag{33}$$



Rys.6. Rozważamy składowe przyśpieszenia grawitacyjnego pochodzącego od Księżyca oddziaływujące na punkt P(x,y,z) położony ma powierzchni Ziemi. Początek O przyjętego układu współrzędnych xyz znajduje się w środku geometrycznym Ziemi.

Zauważmy teraz, że w równaniu (33) po jego prawej stronie możemy wyłączyć przed nawias stałą G, M_K i r_0 wówczas otrzymujemy:

$$a_Z = \frac{G M_K}{r_0^2} \cdot \left(1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{z}{r_0}\right)^2}\right). \tag{34}$$

W celu uproszczenia równania (34) ponownie skorzystajmy z następującej formuły matematycznej:

$$(|x| << 1): \quad \frac{1}{(1+x)^2} \approx 1 - 2 \cdot x.$$

Po wykonaniu dość prostych przekształceń algebraicznych otrzymujemy:

$$a_Z \approx \frac{G M_K}{r_0^3} 2z. \tag{35}$$

Znając wartość przyspieszenia a_z w punkcie P_1 możemy teraz wyznaczyć wartość składowej wypadkowej siły działającej na masę *m* w tym punkcie:

$$F_Z = m \cdot a_Z = \frac{G M_K m}{r_0^3} 2z. \tag{36}$$

Dla punktu P_2 o współrzędnych (0, y, 0) przeprowadzimy analogiczne rozumowanie. Wtedy okaże się, że składowa przyspieszenia a_y dana jest następującą zależnością:

$$a_y = -g \cdot \sin\alpha. \tag{37}$$

eprasa.pl 2e0409c816

W oparciu o rys. 6 wartość sinusa kąta α jest równa: $\sin\alpha = \frac{y}{r'}$. Wykorzystując powyższe równanie oraz zależność (31) otrzymujemy:

$$a_y = -\frac{GM_K}{(r')^2}\cdot\frac{y}{r'} = -\frac{GM_K\,y}{\left(r_0^2+y^2\right)^{3/2}} = -\frac{GM_K\,y}{r_0^3\left(1+\frac{y^2}{r_0^2}\right)^{3/2}} \approx -\frac{GM_K\,y}{r_0^3}. \quad (38)$$

Postępując w analogiczny sposób jak w przypadku punktu P_1 wyznaczamy wartość

Wypadkowej siły działającej w punkcie P_2.

$$F_y = m\cdot a_y = -\frac{GM_K m}{r_0^3}\,y. \quad (39)$$

Dla punktu P_3 o współrzędnych (x, 0, 0) możemy zapisać, że:

$$F_x = m\cdot a_x = -\frac{GM_K m}{r_0^3}\,x. \quad (40)$$

Uwzględniając równania (36, 39, 40) możemy wyznaczyć całkowitą wartość wypadkowej siły pływowej *F*:

$$F = \left(F_x, F_y, F_z\right) = -\frac{GM_K\,m}{r_0^3}\left(x, y, -2z\right). \quad (41)$$

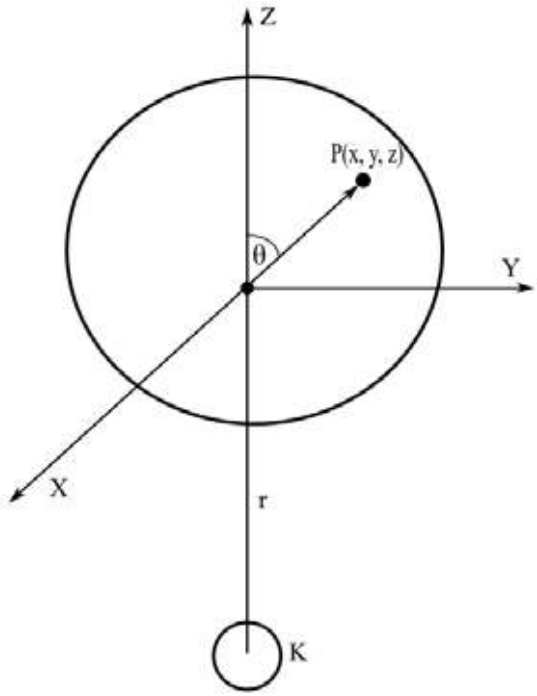
Uwaga! Wykorzystując równania (36), (39) oraz (40) możemy zapisać, że gradient siły jest równy:

$$\vec{\nabla}F = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z} = -\frac{GM_K m}{r_0^3} - \frac{GM_K m}{r_0^3} + \frac{2GM_K m}{r_0^3} = 0. \quad (42)$$

Rozpatrzmy teraz następującą sytuację – niech Księżyc znajduje się w odległości r od środka Ziemi.

Wówczas poszczególne składowe siły *F, które działają na ciało umieszczone w punkcie* P(x, y, z) na powierzchni Ziemi (rys.7) są równe.

$$F = F_x, F_y, F_Z. \quad (43)$$



Rys. 7. Schemat układu Ziemia–Księżyc.

Przypomnijmy jeszcze raz, że składowe siły pływowej dane są następującymi zależnościami:

$$F_x = -\frac{GM_K\,m}{r^3}\,x, \quad (44)$$

$$F_y = -\frac{GM_K\,m}{r^3}\,y, \quad (45)$$

$$F_z = \frac{GM_K\,m}{r^3}\,2z, \quad (46)$$

Wówczas przyspieszenie dane jest następującą relacją:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} = -\frac{GM_K}{r^3}\left(x, y, -2z\right). \quad (47)$$

Wyznaczmy teraz potencjał w punkcie P dla sytuacji przedstawionej na rys. 7:

$$V_P = -\int \vec{a}\,d\vec{r} = \frac{GM_K}{r^3}\int\left(x\,dx + y\,dy - 2z\,dz\right). \quad (48)$$

Wykonajmy teraz elementarne całkowanie prawej strony równania (48) wówczas otrzymamy:

$$V_P = \frac{GM_K}{r^3}\left(\frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}y^2 - z^2\right) + C, \quad (49)$$

gdzie C oznacza stałą całkowania. W oparciu o rys. 7 możemy przyjąć, że dla punktu O mamy: x = y = z = 0 oraz zakładamy, że V = 0. Dlatego również stała całkowania C = 0. Natomiast dla punktu P możemy zapisać:

$$V_P = \frac{GM_K}{r^3}\left(\frac{1}{2}x^2 + \frac{1}{2}y^2 + \underbrace{\frac{1}{2}z^2 - \frac{3}{2}z^2}_{z^2}\right) = \frac{GM_K}{r^3}\left(\frac{1}{2}r_Z^2 - \frac{3}{2}z^2\right) = \quad (50)$$

$$= -\frac{GM_K}{r^3}\cdot\frac{1}{2}\left(3\cdot\frac{z^2}{r_Z^2} - 1\right)\cdot r_Z^2.$$

Niech $x^2 + y^2 + z^2 = r_Z^2$, a $\frac{z}{r_Z} = \cos\theta$,

to potencjał siły pływowej w punkcie P dany jest następującą zależnością:

$$V_P = -\frac{GM_K}{r^3}\cdot\frac{1}{2}\left(3\cos^2\theta - 1\right)\cdot r_Z^2. \quad (51)$$

Dlatego całkowity potencjał sił działających w punkcie P jest równy:

$$V(h,\theta) = g\cdot h - \frac{GM_K r_Z^2}{2r^3}\cdot\left(3\cos^2\theta - 1\right). \quad (52)$$

W tym równaniu wyrażenie *gh oznacza potencjał jednorodnego pola grawitacyjnego Ziemi na wysokości h nad jej powierzchnią. Przekształcając równanie (*52) otrzymamy:

$$\text{const} = g\cdot h - \frac{GM_K r_Z^2}{2r^3}\cdot\left(3\cos^2\theta - 1\right). \quad (53)$$

Podczas przypływu wartość kąta θ może być równa: $\theta = 0^\circ$ lub $\theta = 180^\circ$. Wobec tego otrzymujemy: $3\cos 2\theta - 1 = 2$. Przekształcając równanie (53) wyznaczymy parametr h,

eprasa.pl 2e0409c816

który od tej pory będzie oznaczał wysokość fali przypływu h_p:

$$g\cdot h=\frac{GM_K r_Z^2}{2r^3}\cdot\left(3\cos^2\theta-1\right), \tag{54}$$

$$h_p=\frac{GM_K r_Z^2}{g\cdot r^3}+\frac{const}{g}. \tag{54a}$$

Przeprowadźmy teraz analogiczne rozumowanie, ale w przypadku odpływu, dla którego kąt θ przyjmuje wartość równą ± 90°. Oznacza to, że wyrażenie: $3\cos^2\theta-1=-1$. Wówczas możemy zapisać:

$$h_o=-\frac{1}{2}\cdot\frac{GM_K r_Z^2}{g\cdot r^3}+\frac{const}{g}. \tag{55}$$

Różnica wysokości poziomów wody oceanicznej między przypływem a odpływem Δh będzie równa:

$$\Delta h=h_p-h_o. \tag{56}$$

Wykorzystując równania (54a-56) oraz wykonując elementarne przekształcenia otrzymujemy, że:

$$\Delta h_K=\frac{3}{2}\cdot\frac{GM_K}{g\,r_{Z-K}}\cdot\left(\frac{r_Z}{r_{Z-K}}\right)^2. \tag{57}$$

Otrzymane równanie uwzględnia oddziaływanie układu Ziemia–Księżyc. Wykorzystując odpowiednie stałe liczbowe takie jak: stała grawitacji ($G = 6.67\cdot10^{-11}\ m^3kg^{-1}s^{-2}$); masę Księżyca ($M_K = 7.347\ 673\cdot10^{22}$ kg); przyspieszenie grawitacyjne ($g = 9.81\ m\cdot s^{-2}$); promień Ziemi (r_z = 6 371 km) oraz odległość Ziemi od Księżyca (r = 384 400 km) wyznaczyć wartość liczbową Δh_k dla omawianego układu Ziemia–Księżyc.

$$\Delta h_K=\frac{3}{2}\cdot\frac{6.67\cdot10^{-11}\cdot7.347673\cdot10^{22}}{9.81\cdot384400\cdot10^3}\cdot\left(\frac{6371\cdot10^3}{384400\cdot10^3}\right)^2=0.535\approx0.54\,\mathrm{m}. \tag{58}$$

Warto także zauważyć, że oprócz Księżyca również Słońce może mieć swój udział w zjawisku pływów. Jednakże ze względu na jego znacznie większą odległość w porównaniu do Księżyca ma ono znacznie mniejszy wpływy na ziemskie pływy. Przeprowadzając niemalże analogiczną dyskusję można pokazać, że w przypadku oddziaływania układu Ziemia–Słońce parametr Δh_S określający różnicę poziomów wody pomiędzy przypływem a odpływem słonecznym dany jest następującą zależnością:

$$\Delta h_S=\frac{3}{2}\cdot\frac{GM_S}{g\,r_{Z-S}}\cdot\left(\frac{r_Z}{r_{Z-S}}\right)^2. \tag{59}$$

Postępując w sposób analogiczny jak powyżej wyznaczmy wartość liczbową parametru Δh_S. Odpowiednie stałe liczbowe wynoszą: masa Słońca ($M_S = 2\cdot10^{30}$ kg); odległość Ziemi od Słońca (r_{Z-S} = 149 600 000 km ≈ 1 AU (AU – jednostka astronomiczna); pozostałe symbole mają taką samą wartość jak powyżej.

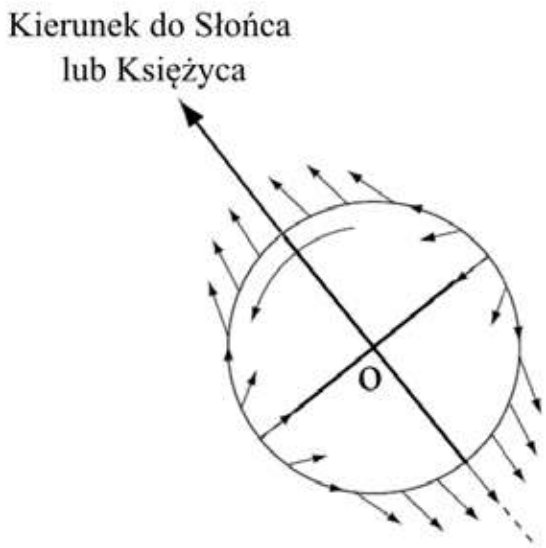
$$\Delta h_S=\frac{3}{2}\cdot\frac{6.67\cdot10^{-11}\cdot2\cdot10^{30}}{9.81\cdot149600\cdot10^6}\cdot\left(\frac{6371\cdot10^3}{149600\cdot10^6}\right)^2=0.247\approx0.25\,\mathrm{m}. \tag{60}$$

Z przeprowadzanej analizy łatwo można zauważyć, że różnica pomiędzy przypływem a odpływem wywołanym przez oddziaływanie Księżyca jest w przybliżeniu ponad dwa razy większe:

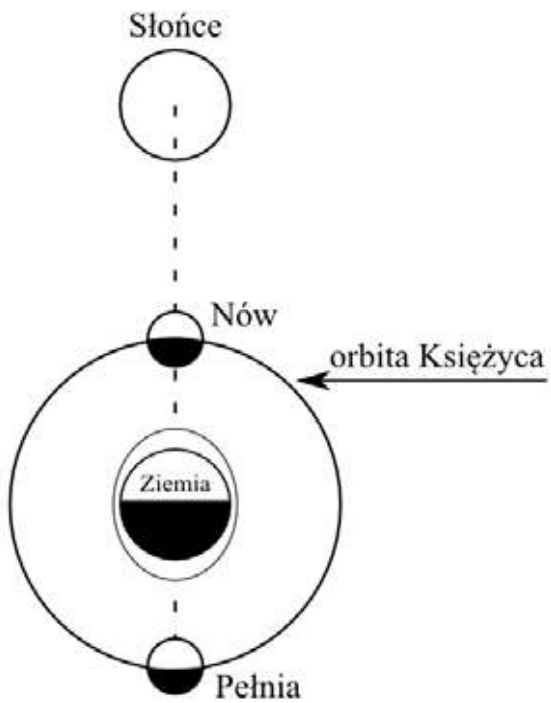
$$\left(x=\frac{\Delta h_K}{\Delta h_S}=2.166\right)$$

w bezpośrednim porównaniu do oddziaływaniu Słońca. Wynik ten nie powinien być jednak dużym zaskoczeniem, dlatego że kluczową rolę w naszych rozważaniach odgrywa odległość pomiędzy układem Ziemia–Księżyc czy Ziemia–Słońce. Warto jednak dodać, że podczas nowiu i pełni pływy pochodzące od Księżyca i Słońca dodają się. Natomiast podczas I lub III kwadry pływy te się odejmują.

Warto pod koniec naszych rozważań zauważyć, że najsilniejsze pływy występują wtedy kiedy Słońce i Księżyc



Rys. 8. Rozkład potencjału pływowego na powierzchni Ziemi.



Rys. 9. Uproszczony schemat rozważań dla pływu syzygijnego.

eprasa.pl 2e0409c816

Miejsce	Akwen	Państwo	Wysokość pływu w metrach		
			średnio	Pływ syzygijny (maksymalny)	największa zarejestrowana
Zatoka Fundy	Ocean Atlantycki	Kanada	11,4	15,4	19,6
Río Gallegos	Ocean Atlantycki	Argentyna	10,4	14,0	18,0
Zatoka Frobishera	**Cieśnina Davisa**	Kanada	10,1	13,6	17,4
Rzeka Severn	**Kanał Bristolski**	Anglia	9,7	13,1	16,8
Port Granville	**kanał La Manche**	Francja	9,3	12,6	16,1
Rzeka Koksoak	zatoka Ungava	Kanada	8,7	11,7	15,0
Zatoka Penżyńska	Morze Ochockie	Rosja	8,5	11,5	14,7
Zatoka Collier	Ocean Indyjski	Australia	8,1	11,0	14,0
Port Bhaunagar	Morze Arabskie	Indie	7,2	9,7	12,4
Rzeka Kolorado	Zatoka Kalifornijska	Meksyk	7,1	9,6	12,3
Wyspa Maracá	Ocean Atlantycki	Brazylia	6,7	9,1	11,7

są ustawione względem siebie dokładnie w linii prostej. Taki rodzaj pływów określamy jako syzygijne, ich uproszczony schemat został przedstawiony na rys. 9. Taka sytuacja ma miejsce podczas nowiu i pełni – wtedy odziaływania pływowe pochodzące zarówno od Księżyca jak i Słońca sumują się.

W poniżej tabeli zostały przedstawione miejsca na powierzchni Ziemi, gdzie są rejestrowane największe amplitudy pływowe (źródło: https://pl.wikipedia.org/wiki/Pływy_morskie).

Uwaga: W przypadku polskiego morza – pływy na Bałtyku są praktycznie niewidoczne (~ wynoszą one około 2 cm). Spowodowane jest to między innymi położeniem geograficznym naszego morza – czyli brakiem dużego połączenia z oceanem oraz jego głębokością.

W artykule tym przedstawiliśmy klasyczne (uproszczone) podejście do teorii pływów mórz i oceanów, które wywołane są oddziaływaniem Księżyca lub Słońca na Ziemię. Jednak przedstawiona tu teoria pływów nie uwzględnia ruchu wirowego Ziemi oraz w wystarczający sposób ruchu wód oceanicznych oraz istnienia tzw. linii brzegowej. Dlatego amplitudy poszczególnych składowych wielkości przypływu Księżyca mogą się różnić z bezpośrednimi obserwacjami w różnych portach.

Warto dodać, że zagadnienie prognozy wielkości i czasu przypływów w portach rozwiązuje się stosując zaawansowane metody analizy harmonicznej z uwzględnieniem danych obserwacyjnych. Wyznaczone w ten sposób amplitudy mogą różnić się od siebie nawet dla każdego miejsca, w którym mierzymy przypływ. Warto zaznaczyć, że ważnym wkładem w rozwój teorii pływów była tzw. dynamiczna teoria Laplace'a z 1776 roku, która oparta jest na rozwiązywaniu ogólnych równań hydrodynamiki.

Działanie pływowe Księżyca i Słońca przejawia się również w pływowych ruchach atmosfery rejestrowanych jako wahania ciśnienia atmosferycznego na różnych wysokościach nad powierzchnią Ziemi. Ze statycznej teorii pływów wynika, że amplituda zmiany ciśnienia związana z pływami powinna stanowić kilka tysięcznych milibara. Ponadto na podstawie statystycznej analizy obserwacji wynika, że przy powierzchni Ziemi występuje fala ciśnienia o okresie równym połowie doby słonecznej. Amplituda tej fali jest w przybliżeniu proporcjonalna do sześcianu cosinusa szerokości geograficznej miejsca obserwacji – w strefie równikowej może dochodzić nawet do 1,25 milibara. Skorupa ziemska również ulega deformacjom pod działaniem sił pływowych. Ich amplituda jest jednak praktycznie zaniedbywalna w stosunku do amplitudy pływów oceanicznych. Działanie pływów ziemskich przejawia się także w nierównomiernościach ruchu obrotowego Ziemi – które mają okresy dwutygodniowe i miesięczne.

Warto dodać, że w latach 50-tych XX wieku dzięki skonstruowaniu dokładniejszej aparatury i zastosowaniu współczesnych jak na tamte czasy maszyn matematycznych do analizy harmonicznej danych obserwacyjnych i obliczeń modeli wewnętrznych budowy Ziemi, badanie pływów Ziemi stało się bardziej intensywne. Odkryto między innymi zjawisko rezonansu pomiędzy składową dobową przypływu i dobową nutacją Ziemi świadczące, że jądro Ziemi nie bierze bezpośredniego udziału w drganiach nutacyjnych. Pływy Ziemi na terytorium Azji są znacznie mniejsze niż w Europie co może wskazywać na znaczne poziomy niejednorodności płaszcza Ziemi.

dr Marcin Wesołowski[1,2],
dr hab. Piotr Gronkowski, prof. UR[1,2]

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

LITERATURA

[1] Gronkowski, P., Wesołowski, M., 2015, Zaćmienia Słońca - fakty i mity, cz. I: Teoria, nr 5, Fizyka w Szkole z Astronomią.
[2] Gronkowski, P., Wesołowski, M., 2016, Zaćmienia Księżyca, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 2, str. 42 – 44.
[3] Kreiner, J. M., 1988, Astronomia z astrofizyką, PWN, Warszawa.
[4] Rogers, E. M.,1960, Fizyka dla dociekliwych – cz. 2 – Astronomia, PWN, Warszawa.
[5] Rybka, E., 1976, Astronomia ogólna, PWN, Warszawa.
[6] Encyklopedia fizyki, 1973, PWN, Warszawa.

eprasa.pl 2e0409c816

Czy Tytan może być „Planem B”?

Anna **Janeczek**

Pomimo rosnącej popularności Księżyca i Marsa w rankingu ośrodków turystycznych przyszłości, nie są to jedyne obiekty w Układzie Słonecznym, nad którymi powinniśmy się dłużej zastanowić myśląc o przesiedleniu ludzkości. Skupiamy się na tych dwóch, ponieważ są osiągalne przy obecnym rozwoju technologicznym, co nie znaczy, że nasza galaktyka (a nawet wszechświat) nie kryje innych, ciekawych terenów. Szczególnie biorąc pod uwagę fakt, że wiemy o Kosmosie mniej, niż jest jeszcze do odkrycia.

Jednym z takich obiektów jest Tytan, księżyc Saturna, którego poznaliśmy bliżej w XVII wieku, dzięki duńskiemu astronomowi, Christianowi Huygensowi. Jeśli komukolwiek teraz przyszło do głowy, że „misja badawcza na Saturna nosi nazwę Cassini-Huygens”, to tak, nazwa ta nie jest przypadkowa. Co więcej, sama nazwa The Huygens odnosi się do lądownika – próbnika, który w czasie misji został odłączony od sondy Cassini, po to, by w 2005 roku wylądować na powierzchni Tytana. [1]

Pytaniem jest, co w Tytanie może być tak szczególnego? Odpowiedzi jest wiele, ale najważniejszą jest – atmosfera. Poza Wenus, jest to jedyny znany nam obiekt z tak grubą i gęstą atmosferą, podobną do ziemskiej i jest to podstawowa przyczyna wielkiego zainteresowania nim. Atmosfera jest kluczowa dla życia, ponieważ zatrzymuje ciepło dookoła obiektu, blokuje promieniowanie słoneczne X i Gamma, promieniowanie kosmiczne i działa jak tarcza, chroniąca przed innymi obiektami, takimi jak meteoryty czy drobny piasek kosmiczny. Chociaż Ziemię i Tytan nie łączy tylko (albo aż) atmosfera. Na powierzchni tego księżyca znajduje się ciecz w postaci chmur, rzek, jezior i kanionów, niekoniecznie pod postacią wody, ale o tym w dalszej części artykułu. [3]

Rys. Zdjęcie Tytana wykonane w trakcie misji Cassini (z kalibracją intensywności barw) [2]

Rys. Koloryzowane, za pomocą podczerwieni, zdjęcie Tytana z widocznymi odbitymi od morza promieniami słonecznymi [5]

Tytan jest największym spośród 82 odkrytych księżyców Saturna, jego średnica mierzy 5150 km, czyli prawie 1,5 razy więcej od naszego Księżyca (3474,2 km). W przypadku odległości, między Tytanem a Saturnem jest 1 200 000 km, więc ze Słońca na Tytan trzeba by przebyć drogę około 1 400 000 000 000 km, w zależności od położenia obiektów w danym czasie. Księżyc ten okrąża swoją planetę w ciągu 15 dni i 22 godzin. Ciekawa sytuacja zachodzi w momencie określenia pogody na jego powierzchni, która zależy od warunków na Saturnie i zmienia się co około 7 lat ziemskich, ponieważ rok na Saturnie trwa 29 lat ziemskich, przy czym rotacja obiektu odbywa się w ten sam sposób jak rotacja Ziemi (a więc pory roku i możliwość pomiaru czasu jest podobna). Trudno jest wyobrazić sobie 7-letnią zimę, biorąc pod uwagę, że jest tam średnio –179 °C. [3]

Atmosfera, jak wyżej wspomniałam, jest najbardziej intrygującym aspektem Tytanu, ponieważ żaden inny obiekt nie charakteryzuje się jej tak dużą gęstością. Duża gęstość oznacza wartość około 1,19 razy większą niż atmosfera ziemska. Jednak ze względu na mniejszy rozmiar Tytanu, atmosfera sięga aż 600 km w głębię kosmosu, czyli 10 razy głębiej niż ziemska. Taka grubość oznacza, że ludzie mogliby chodzić, a nawet latać po jego powierzchni bez kombinezonów, jedynie w maskach tlenowych, co byłoby ogromnym ułatwieniem. Jednak do pełnego bezpieczeństwa pozostaje jeszcze kwestia składu atmosfery. Jest to około 95% azotu, a reszta to metan z małymi wtrąceniami węgla. Nie jest to zła wiadomość, ponieważ pod wpływem energii promieni słonecznych i pierwiastków pochodzących z Saturna, cząsteczki tworzą związki organiczne z azotem i węglem, nieodzowne w życiu na Ziemi.

eprasa.pl 2e0409c816

W tym momencie pewnie zastanawiacie się już nad badaniami życia na Tytanie, co jest właściwym tropem, jednak z wcześniej już wspomnianych badań, lądownik Huyghens nie przetrwał na powierzchni wystarczająco długo (90 minut), by przekazać nam takie informacje. [3,4]

Z atmosferą ściśle związana jest grawitacja, która na Tytanie jest o około 86% niższa (słabsza, w odniesieniu do siły) od tej na naszej planecie. W połączeniu z ciśnieniem tylko o 50% wyższym niż na Ziemi (1467 hPa), łatwiejsze i bardziej ekonomiczne jest na przykład latanie samolotem, lub… bez, przy pomocy siły ludzkich mięśni, co prawdopodobnie byłoby niewiele bardziej męczące od chodzenia. [4]

Kolejną, niepowtarzalną spośród innych dotychczas nam znanych obiektów, cechą jest struktura jego powierzchni. Okazuje się, że na Tytanie rozciągają się rzeki i jeziora płynącego metanu i etanu. Nie są to zbiorniki małych wymiarów, ponieważ głębokości sięgają kilku kilometrów, a szerokości do setek kilometrów. Poza tym, nie brakuje tam kraterów, a ponadto zaobserwowano wydmy węglowodorów oraz możliwość występowania aktywnych wulkanów, z których zamiast gorącej lawy mogłaby płynąć woda. Woda? Tak! Woda jest jednym ze składników strukturalnych tego księżyca. Badania wskazują na to, że ma on pięć warstw: środkowa, kamienista warstwa pokryta jest wodą w postaci stałej, na której powierzchni znajduje się ciekła słona woda oraz to, co widzimy na samej powierzchni – wszechotaczający lód z cząsteczkami, które potocznie można nazwać piaskiem. Piątą warstwą jest atmosfera. [3]

W listopadzie 2019 roku, grupa naukowców ze Szkoły o Ziemi i Eksploracji Kosmosu z Uniwersytetu w Arizonie (School of Earth and Space Exploration), po kilkunastoletniej pracy, opublikowała mapę geologiczną Tytanu, co jest bardzo dużą ciekawostką. Pokazuje ona rozmieszczenie kraterów, mórz, jezior, wulkanów i innych terenów na jego powierzchni wraz z nazwami niektórych. [6]

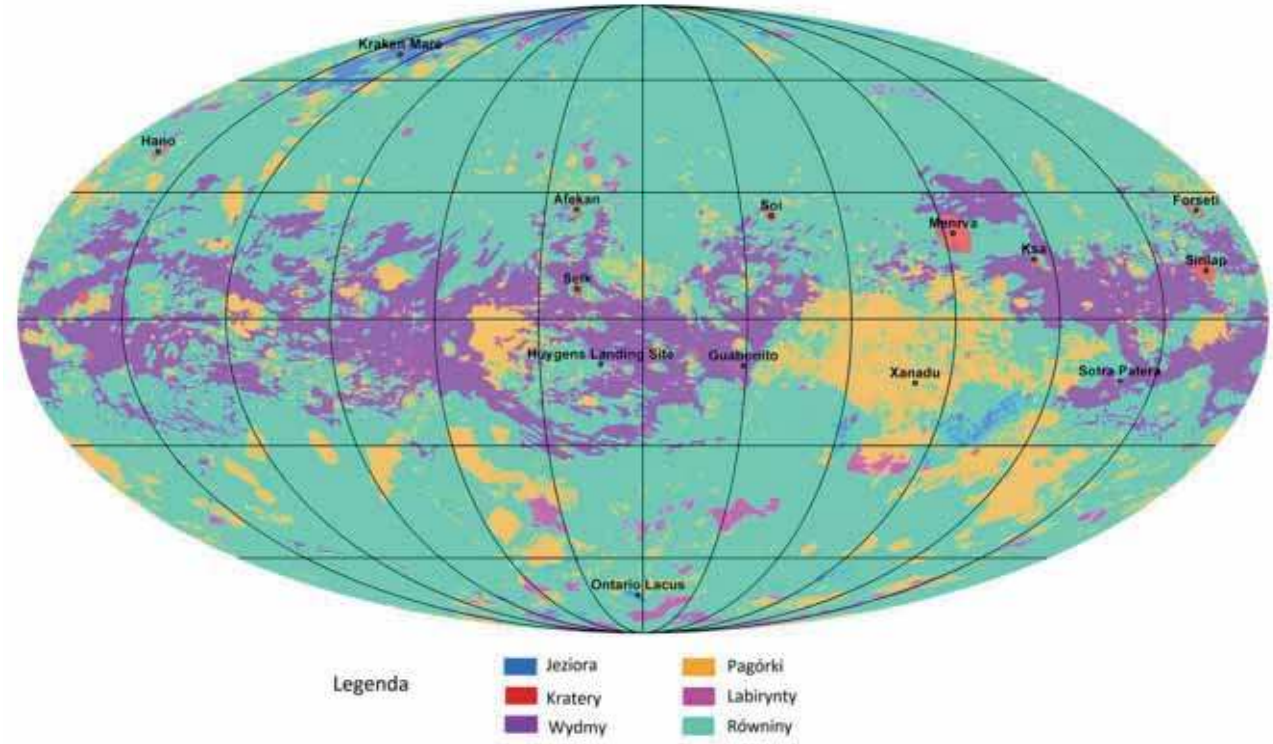
W kategorii „Plan B dla ludzkości", Tytan pewnie nie zdobyłby złotego medalu, ze względu na niską temperaturę, groźne dla ludzkich płuc powietrze i zdecydowanie bardzo długą podróż. Jednak nie można usunąć go z listy, ponieważ, jak na razie, nie znamy wielu obiektów, planet czy księżyców, które, mimo wszystko są tak zbliżone do naszej Ziemi, szczególnie w kwestii struktury geologicznej, więc błędem byłoby nie podjęcie, w bliższej lub dalszej przyszłości, próby wyprawy i dokładniejszej jego eksploracji.

Wszystko to brzmi bardzo nieprawdopodobnie, owiane jest tajemnicą, bo znajduje się tak daleko od nas i na tą chwilę jest praktycznie nieosiągalne, jak każdy obiekt znajdujący się dalej niż Mars. Chociaż nawet mimo tego, że dotarliśmy na Marsa już w sposób pośredni, to i tak nadzieja na istnienie życia, wynikająca z obecności wody, jest czynnikiem wielu naukowych fantazji (jednak i ta tajemnica powinno być rozwiązana w ciągu obecnej dekady). Trudno jest więc mówić o Tytanie, księżycu Saturna, który jest szóstą planetą od Słońca i układać plany przesiedlenia lub terraformacji. Dlatego na razie pozostaje to w sferze marzeń i powieści science-fiction.

Anna Janeczek

LITERATURA

[1] Misja Cassini-Huyghens, NASA Science, Solar System Exploration.
[2] „A Last Look At Titan", Cassini, Sarah Loff, NASA.
[3] Tytan, NASA Science, Solar System Exploration.
[4] „How Humans Could Live on Saturn's Moon Titan", Karl Tate, space.com.
[5] „NASA's Cassini Reveals Surprises with Titan's Lakes", NASA Jet Propulsion Laboratory.
[6] „First Global Geologic Map of Titan", NASA Jet Propulsion Laboratory.



Rys. Geologiczna mapa Tytana [6]

eprasa.pl 2e0409c816

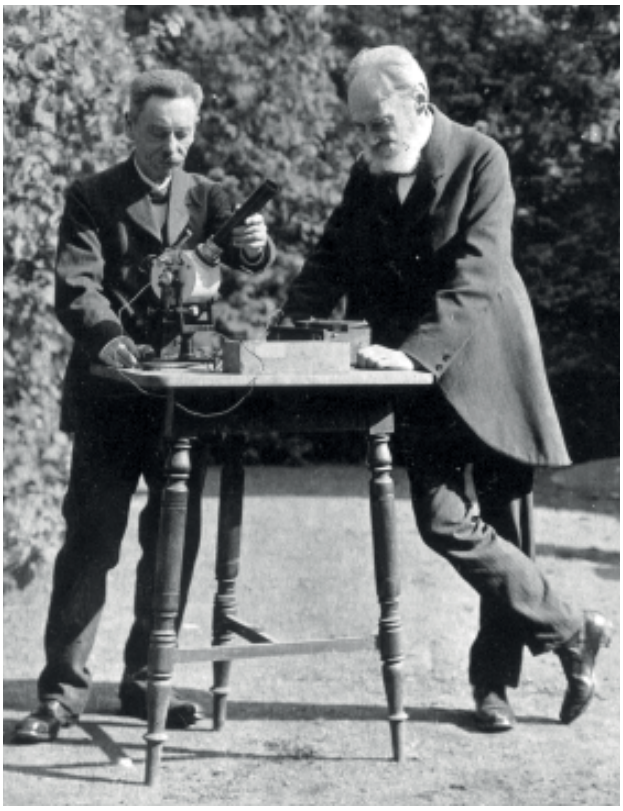
Promieniowanie kosmiczne
– nieoczekiwane początki (1912-1937)

Tadeusz **Wibig**

Dość powszechne, acz całkowicie niesłuszne, jest mniemanie, że promieniowanie kosmiczne odkryte zostało przypadkiem, szczęśliwym zbiegiem okoliczności. Odkrywanie promieniowania kosmicznego, a dokładniej tego, co dziś tak nazywamy, czyli strumieniem cząstek przychodzących do Ziemi z przestrzeni kosmicznej, trwało dość długo i tak naprawdę w pewnych aspektach nie jest zakończone do dziś. Tym nie mniej, promieniowania kosmicznego nie spodziewał się nikt.

Czytając o początkach wielu dziedzin ludzkiej działalności często spotykamy zdanie „*Już starożytni Grecy...*”. W przypadku fizyki promieniowania kosmicznego poszukiwanie korzeni tak głęboko wydaje się trochę sztuczne. Starożytni uznając generalnie zasadę opartej na ludzkiej logice sensowności Natury nie mogli wpaść w żaden sposób na trop tak bardzo nieuzasadnionego bytu.

Nic nie skłania nas do podejrzeń, że zamieszkała przez nas Ziemia bombardowana jest nieustannie przez niewiadomego pochodzenia drobiny materii, jeśli żadne efekty tego bombardowania nie prowadzą do żadnych zauważalnych efektów. Jeśli ktoś jednak uparłby się, mógłby odnaleźć co najmniej dwa zjawiska znane już starożytnym wiążące się w pewien, aczkolwiek bardzo odległy sposób z badaniami promieniowania kosmicznego. Pierwszym z nich jest tajemnicze oddziaływanie bursztynu, drugim niezbadany mechanizm powstawanie chmur na niebie.



Rysunek 1. Elster i Geitel przy swoim elektroskopie (1900).

200 lat wcześniej...

Zwykle jako datę odkrycia promieniowania kosmicznego podaje się rok 1912. Datę tę potwierdziła niejako Królewska Akademia w Sztokholmie wręczając w roku 1936 Viktorowi F. Hessowi nagrodę Nobla. Chcąc jednak oddać sprawiedliwość prawdzie należy cofnąć się o co najmniej 200 lat i wspomnieć nazwiska kilku innych wielkich fizyków mających swój, większy lub mniejszy udział w naszej historii.

Badanie zjawisk elektrycznych, które doprowadziło między innymi do wyjaśnienia zagadki przyciągania przed potarty bursztyn niewielkich kawałków materii pod koniec XVIII wieku dało także początek serii odkryć, które bezpośrednio doprowadziły Hessa do jego historycznego lotu balonem 7 sierpnia 1912 roku.

Około roku 1785 Charles Augustin de Coulomb w trakcie przeprowadzania eksperymentów ze skonstruowaną przez siebie bardzo precyzyjną waga skręceń, które to eksperymenty zapewniły mu stałe miejsce we wszystkich podręcznikach tyczących elektryczności, zaobserwował ucieczkę ładunku elektrycznego z naelektryzowanych ciał. Dziś efekt ten znamy pod nazwą prądu ciemnego. Coulomb sformułował nawet zależność mówiącą, iż gęstość prądu ciemnego jest proporcjonalna do wartości pola elektrostatycznego w tym punkcie. W pewnym sensie wyprzedził w tym miejscu o prawie 50 lat Georga Ohma i jego prawo łączące napięcie i natężenie prądu. Odkrycie Coulomba można by także potraktować jako początek fizyki cząstek elementarnych wskazujące drogę późniejszym o ponad sto lat doświadczeniom Thompsona.

Na początku jednak nikt nie przypuszczał, że obok kłopotów, jakie przysparza eksperymentatorom, może mieć ono jakiekolwiek pozytywne następstwa. Nic więc dziwnego, że dalszy postęp w badaniach prądu ciemnego odnotowano dopiero w połowie XIX wieku. Wtedy to Carlo Matteucci odkrył dziwne zachowanie prądu ciemnego przy wysokich wartościach pole elektrycznego. Okazało się, że wartość natężenia prądu nasyca się i nie rośnie już więcej wraz ze wzrostem napięcia.

W końcu XIX wieku badaniom prądu ciemnego poświęcano coraz więcej uwagi: Linss badał prądy płynące w powietrzu, Exner zaproponował utworzenie ogólnoświatowej sieci pomiarowej elektryczności atmosferycznej. Istotne znaczenie miały jednak doświadczenia Elstera i Geitela, które doprowadziły do wykazania istnienia „wiatru” zjonizowanych cząsteczek powietrza odpowiedzialnego za istnienie prądu ciemnego, gdy elektrycznie naładowane ciało umieścili z zamkniętym pojemniku.

eprasa.pl 2e0409c816

Wspomniany już J. J. Thompson poświęcił się badaniom prądu ciemnego w 1884 roku. Po kilkunastu latach, dzięki pracom jego i Ernesta Rutherforda gęstość prądu nasycenia można było traktować jako miarę jonizacji ośrodka.

Zupełnie naturalnym pytaniem było pytanie o czynnik tę jonizację wywołujący, ale o tym za chwilę. Cofnijmy się do prowadzonych równolegle badań w zupełnie innym i pozornie bardzo odległym zakątku fizyki: fizyką powstawania chmur. Początek badań zjawiska kondensacji w kontekście nas interesującym można datować na koniec XVIII wieku. Zauważono wtedy, że para wodna kondensuje się na ściankach zamkniętej butelki chętniej, jeśli wprowadzić się przez korek do butelki igłę podłączoną do maszyny elektrostatycznej.

Ważne daty

Koniec wieku XIX i w tej dziedzinie okazał się okresem niebywałego rozkwitu. Z ważniejszych dat i nazwisk wymienić trzeba rok 1886 i Hermanna von Helmholtza, który wskazał wtedy właśnie na zjonizowane atomy gazu jako na zarodzie kondensacji w pozbawionym pyłu powietrzu. Ideę tę wykorzystał C. T. R. (Charles Thomson Rees) Wilson budując słynną komorę mgłową zwaną dziś powszechnie komorą Wilsona. Stwierdził on w 1897, że zarodzie kondensacji w czystym powietrzu mogą być wytwarzane przez promieniowanie X, czy też przez promieniowanie zwane wtedy uranowym, co wyraźnie pokazywało na słuszność idei Helmholtza,

W roku 1900 Wilson pokazał, że w czystym powietrzu zarodzie kondensacji pojawiają się także, gdy nie ma w pobliżu źródeł promieniowania X, czy rud uranowych. Używając do badań tego zjawiska swojej komory opuścił nawet Laboratorium Cavendisha dla uniknięcia wpływu obecnych tam i badanych substancji silnie radioaktywnych. Nie udało mu się pokonać trudności technicznych i bez konstruktywnych wniosków zajął się badaniem prądu ciemnego w zamkniętych naczyniach.

To właśnie Wilson był pierwszym, który zapostulował istnienie promieniowania kosmicznego. Dla wyjaśnienia niewyjaśnialnej w inny sposób resztkowej jonizacji pojawiającej się znikąd zaproponował, by przyjąć, że są to promienie w rodzaju promieniowania X, czy też uranowych pochodzenia pozaziemskiego. Chcąc udowodnić swą tezę zbudował specjalny przenośny i odpowiednio czuły elektroskop, a w zasadzie wyrafinowaną komorę jonizacyjną i udał się z nią do kopalni, gdzie spodziewał się zmniejszenie szybkości powstawania jonów w powietrzu na skuter osłabienia przychodzącego z góry czynnika jonizującego. Niestety dla niego, nie mógł on wiedzieć, że jedynie kilkanaście procent z jonizacji na powierzchni ziemi ma pochodzenie kosmiczne. Większość pochodzi bardziej lub mniej bezpośrednio za znajdujących się właśnie pod ziemią pierwiastków promieniotwórczych.

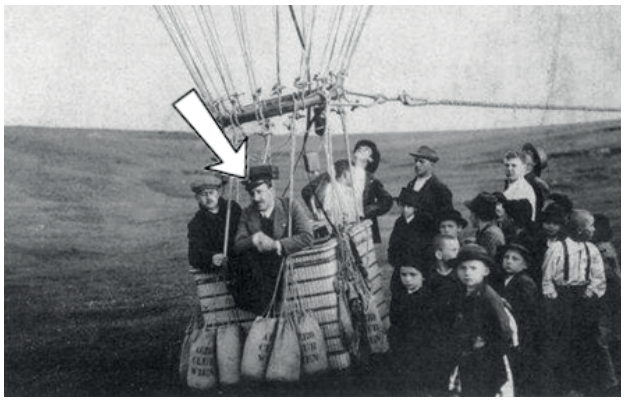
Radioaktywność

Rozwiązanie problemu wpływu radioaktywności ziemskiej na produkcję jonów w powietrzu stanowiło klucz otwierający wrota całej fizyce promieniowania kosmicznego. Nie trzeba było czekać zbyt długo. Na przełomie wieków XIX i XX, a także na samym początku ubiegłego wieku szybkość poszerzania się horyzontów wiedzy człowieka o otaczającym go świecie była ogromna, a samo rozwiązanie okazało się raczej trywialne. Wystarczyło wykorzystać ziemską atmosferę jako absorbent pochłaniający idące do góry promieniowanie skał. W tym celu można było wejść na odpowiednio wysoką górę, lub jeszcze lepiej: wznieść się w powietrze bez używania góry.

Drugi sposób okazał się bardziej efektywny. Seria lotów balonowych przeprowadzona niedaleko naszych dzisiejszych południowych i zachodnich granic przez Victora Franza Hessa w latach 1911–1912 doprowadziła do solidnie udokumentowanego stwierdzenia, że czynnik jonizujący powietrze im wyżej, tym bardziej jest intensywny. Hess nazwał go promieniowaniem wysokościowym, po niemiecku: *Höhenstrahlung*. Jedynie na niewielkich wysokościach widać było jego zanik spowodowany oddalaniem się od źródeł radioaktywności w skorupie ziemskiej. Warto wspomnieć, że misja Hessa zakończyła się sukcesem dzięki postępowi technologicznemu w konstrukcji elektroskopów, jaki dokonał się w roku 1909 za sprawą ojca Wulfa, jezuity z Akwizgranu, który wcześniej próbował zaobserwować promieniowanie kosmiczne wchodząc na wieżę Eiffela.

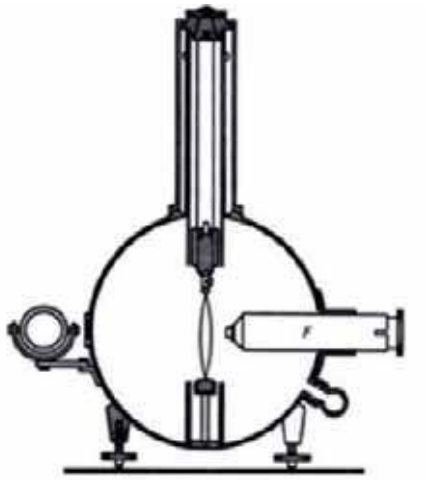
Rysunek 3. T. Wulf (1909).

Rysunek 2. C T. R. Wilson (1901).



Rysunek 4. Victor Hess (1912).

eprasa.pl 2e0409c816



Rysunek 5. Elektroskop Ojca Wulfa (1909).

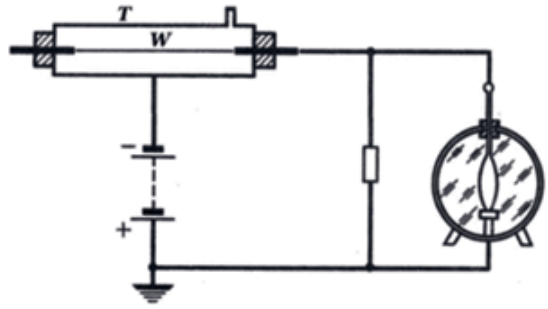
Wyniki Hessa potwierdził z większą jeszcze dokładnością i wznosząc się wyżej, prawie na 10 km, w latach następnych Kolhörster.

Do końca lat dwudziestych XX wieku podstawowym narzędziem badania promieniowania kosmicznego były komory jonizacyjne i komory Wilsona.

Odkrywca promieni kosmicznych

Te pierwsze pozwalały wyznaczyć tempo jonizacji. Te drugie pozwalały wyznaczyć dokładnie tor przelotu cząstek jonizujących. W badaniach swoich w latach 20-tych ciągle używał ich jeszcze sam Wilson, ale i inni, jak na przykład radziecki odkrywca promieniowania kosmicznego Skobielcyn. Ten ostatni zobaczył na swoich fotografiach ślady cząstek kosmicznych w 1927 roku.

Istotny przełom nastąpił, gdy w roku 1928 w Kilonii, gdzie Geiger i Muller skonstruowali licznik zwany dziś powszechnie licznikiem Geigera-Mullera. Zaraz też Bothe i Kolhörster użyli go po raz pierwszy w badaniach promieniowania kosmicznego. Liczniki Geigera-Mullera pozwalały dokładnie określić moment, w którym hipotetyczna cząstka promieniowania przeszła przez objętość czynną licznika jonizując zamknięty w nim gaz. Genialnym pomysłem było ustawienie w pionie dwóch liczników G-M jeden nad drugim i obserwowanie przypadków, gdy w obu jednocześnie pojawił się impuls mówiący o przejściu cząstki. Zrobili to Bothe i Kolhörster w roku 1929. Dwa niewielkie (10 cm długości i 5 cm średnicy) osłonili pięciocentymetrowymi ściankami z żelaza i jeszcze dodatkowo sześcioma centymetrami ołowiu, a dla dodatkowego odcięcia się od radioaktywności otoczenia pomiary przeprowadzali w piwnicach Reichsanstalt.



Rysunek 7. Licznik Geigera i Mullera

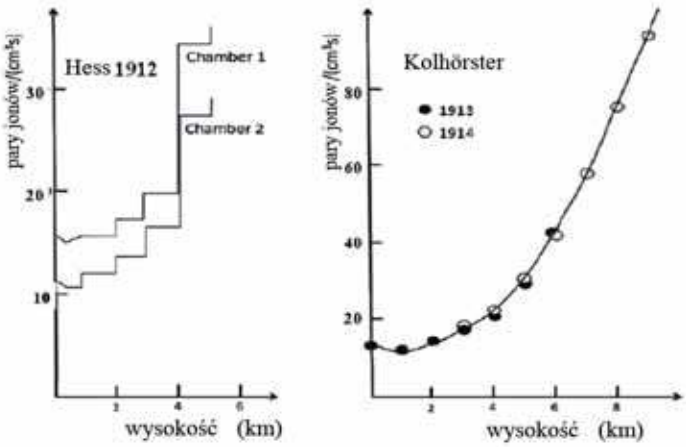
Badając charakterystyki cząstek promieniowania kosmicznego posunęli się do tego, że pomiędzy liczniki włożyli grubą na blisko 4 cm sztabę złota (nie dlatego, że byli bardzo bogaci, ale dlatego, że złoto można otrzymać w postaci czystej bez niechcianych radioaktywnych domieszek – złoto ma tylko jeden trwały izotop: 197Au). Przesuwali cały zestaw pomiarowy z piwnicy pod okno w dachu i dodając, i ujmując osłony ołowiane wyznaczyli oni zdolność przenikania promieniowania wysokościowego przez materię. Okazało się, że jest ona na tyle duża, że podważyła dość powszechne przekonanie o elektromagnetycznej naturze (promieniowanie γ) pochodzących z kosmosu cząstek.

Problem natury cząstek zaobserwowanych przez Skobielcyna przez następnych kilka lat zajmował tak od strony eksperymentalnej, jak i teoretycznej uwagę największych fizyków tamtych czasów, żeby wymienić tylko Millikana, Andersona, Augera, Blacketta, Rutherforda, Heisenberga, Diraca, a nawet małżeństwo Irenę i Fryderyka Joliot-Curie. Zainteresowanie to zaowocowało między innymi odkryciem przez Andersona w roku 1932 pozytonu, hipotetycznej antycząstki elektronu zapostulowanej w 1930 roku przez Diraca.

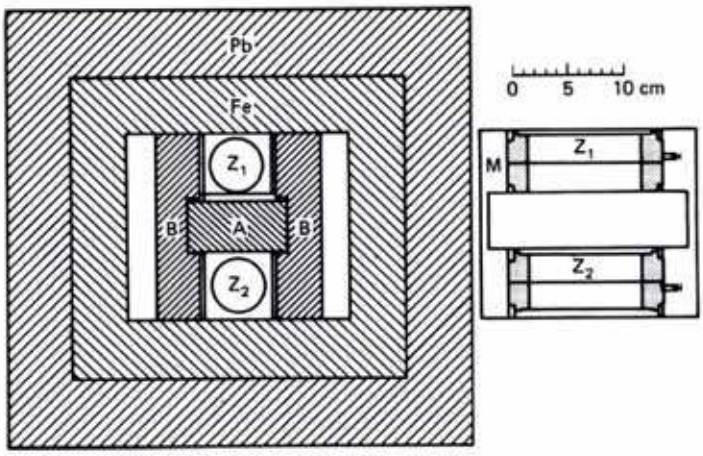
Technologiczny skok

Kolejny krok w badaniach umożliwiło połączenie tych technik, elektroniczne wyzwalanie komór Wilsona. Aby do tego jednak doszło potrzebny był skok technologiczny dokonany w roku 1930 przez Bruno Rossiego.

Był to układ elektroniczny obsługujący liczniki G-M, które sterowały siatkami lamp elektronowych połączo-



Rysunek 6. Szybkość jonizacji wyznaczona w lotach Hess i Kolhörstera.



Rysunek 8. Eksperyment Bothego i Kolhörstera (1929).

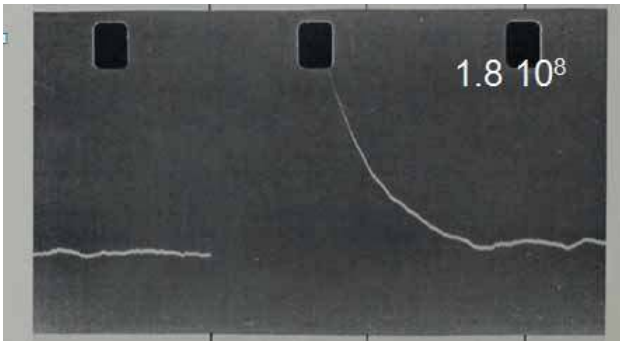
eprasa.pl 2e0409c816

Rysunek 9. Bruno Rossi (1932).

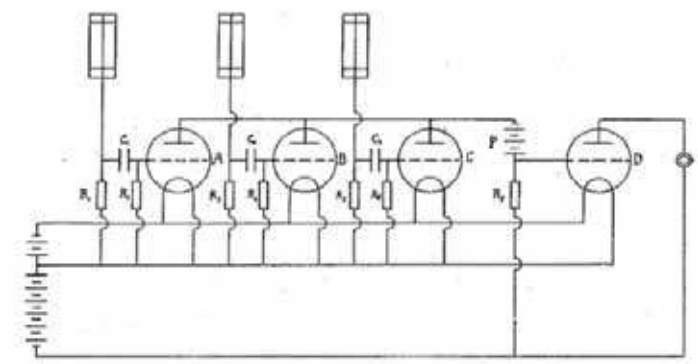
nych w układ koincydencji, który generował impuls elektryczny w przypadku, gdy wszystkie liczniki G-M jednocześnie (w zadanym, krótkim przedziale czasowym) zostały trafione przez cząstki jonizujące. Równolegle do Rossiego Bothe doszedł do podobnego rozwiązania stosując jedną lampę wyposażoną w dwie siatki.

W bogatym materiale doświadczalnym zgromadzonym na początku lat trzydziestych zawierającym zdjęcia wysokoenergetycznych elektronów (i pozytonów) z komór Wilsona wyzwalanych koincydencją liczników G-M obserwowano od czasu do czasu dziwne fotografie, na których widoczne było przejście przez komorę kilku (do czterech na fotografiach Skobielcyna) a nawet kilkunastu (do 20 w eksperymencie Balcketta i Occhialiniego z roku 1933) równoległych (lub prawie równoległych) śladów cząstek bardzo wysokiej energii. Obok zdjęć z komór to samo w istocie zjawisko obserwowano w eksperymentach z komorami jonizacyjnymi. Carmichael, jako doktorant Chadwicka w Cavendish Laboratory zarejestrował metodą fotograficzną wychylenie oscyloskopu odpowiadające pojawieniu się w jego dużej komorze jednocześnie pond stu milionów jonów.

W swoich eksperymentach z rejestracją czysto elektroniczną Rossi w roku 1932 umieścił trzy liczniki w osłoniętym ołowiem pudle ustawiając je jednak w nietypowej konfiguracji: dwa w jednej poziomej płaszczyźnie na górze i jeden pod nimi tak, że pojedyncza cząstka nie była w stanie uruchomić potrójnego układu koincydencji. Okazało się jednak, że koincydencja takie pojawiają się w przyrodzie. Co więcej, w roku 1933 stwierdził on, że częstość tych koincydencji można zwiększyć wkładając pomiędzy górny i dolne liczniki grube nawet do kilku centymetrów warstwy ołowiu czy żelaza. Warto, jako ciekawostkę w tym miejscu dodać, że rezultat ten był w swoim czasie tak zaskakujący, że poważne czasopismo naukowe, jakim było wtedy niemieckie *Naturwissenshaften* odmówiło publikacji tych wyników Rossiego. Publikacja ukazała się dopiero w *Physikalische Zeitschrift* po osobistym wstawiennictwie Heisenberga.

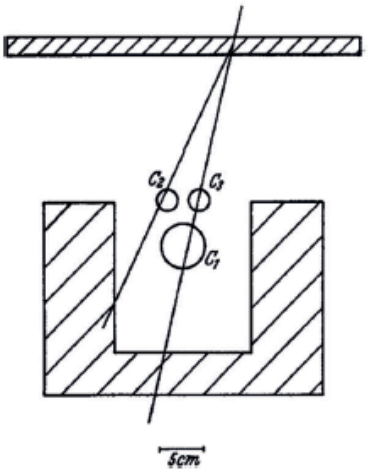


Rysunek 10. Rejestracja z komory jonizacyjnej Carmichaela (1935).

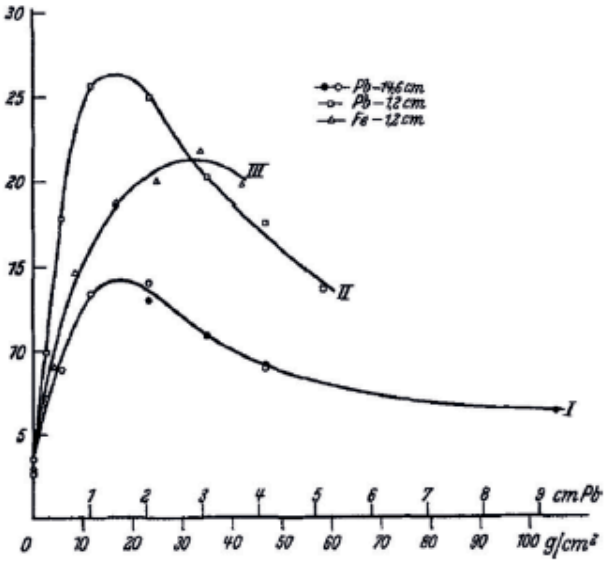


Rysunek 11. Układ koincydencyjny Rossiego.

Pytanie o naturę tego zjawiska budziło wiele kontrowersji. Auger i Skobielcyn zaproponowali, że są to elektrony wybite w procesie Comptona przez wysokoenergetyczny foton (kwant promieniowania γ). Heisenberg uważał, że są to δ-elektrony wybijane przez wysokoenergetyczny elektron. Różnice, jak widać, dotyczyły natury cząstki pierwotnej. Gdyby odwołać się wtedy do procedur demokratycznych, prawdopodobnie foton wygrałby z elektronem, choć obie kandydatury nie były idealne. Z dzisiejszego punktu widzenia widać naocznie, jak niebezpiecznym może być w fizyce (nauce) akceptowanie poglądów większości.



Rysunek 12. Eksperyment Rossiego z 1933 roku.



Rysunek 13. Krzywe Rossiego.

eprasa.pl 2e0409c816

Co w fizyce piszczy

Czy ameby mogą istnieć na Tytanie?

Życie astrobiologa nie jest łatwe. Na początek przypomnijmy kim jest astrobiolog. Astrobiolog to taki naukowiec, który stara się znaleźć przejawy życia poza Ziemią. W przeszłości ta nauka była bardzo atrakcyjna. Nikt albo prawie nikt nie podawał w wątpliwość istnienia życia poza Ziemią. Na Marsie miała istnieć wysoce rozwinięta cywilizacja zdolna nawadniać całą planetę poprzez sieć kanałów. Życie i to bujne miało też istnieć na Wenus.

Dzisiaj poszukiwania astrobiologów są mniej ambitne. Głównie chodzi o znalezienie jakichkolwiek form życia. O ile wciąż wierzy się w możliwość istnienia rozwiniętych cywilizacji poza granicami Układu Słonecznego, to u nas poszukuje się organizmów raczej przypominających ziemskie jednokomórkowce. Zazwyczaj poszukuje się ich w dziwnych miejscach jak Wenusjańskie chmury.

Jednym z takich dziwnych miejsc jest księżyc Jowisza Tytan. (Piszemy o tym także na kol. 44 w artykule „Czy Tytan może być „Planem B"?). Z pozoru wydaje się być idealnym miejscem do istnienia życia. Jest dość duży, aby utrzymać własną atmosferę. Wykazuje też znaczne sezonowe wahania temperatury przypominające ziemskie pory roku. Na jego powierzchni znajdują się jeziora metnonowe-etanowe, czyli jeziora węglowodorów. Co więc nie pozwala, aby powstały tam podobne do ziemskich pierwotniaki? Otóż tym czymś jest temperatura – 180°C. To za zimno, aby w takich warunkach mogło powstać życie.

Astrobiolodzy w 2015 roku wysunęli jednak koncepcje, że w takich warunkach mogłyby pojawiać się organizmy podobne do ameb, których błony komórkowe zbudowane by były ze związków metanu z azotem. Membrany takie zyskały

nazwę azotosomów. Niestety, naukowcy za Szwecji wykazali, posługując się skomplikowanymi metodami kwantowo-mechanicznymi, że o ile takie membrany byłyby stabilne, to jednak nie jest możliwe ich samorzutne uformowanie. Czyli takie formy życia mogłyby na Tytanie żyć, lecz nie mogłyby powstać. Astrobiolodzy jednak się nie poddają. Postawili oni nowe pytanie. Czy jest możliwe życie w ogóle bez membran?

Źródło: H. Sandström, M. Rahm. Can polarity-inverted membranes self-assemble on Titan? Science Advances, 2020; 6 (4): eaax0272 DOI: 10.1126/sciadv.aax0272

W następnym numerze

Aerodynamika a własności jezdne auta

Samochodami jeździmy wszyscy. Jako pasażerowie lub kierowcy. Nie wszyscy zastanawiają się nad zjawiskami towarzyszącymi jeździe samochodem, szczególnie z dużą prędkością.

Typowy samochód ma nadwozie zawieszone elastycznie na czterech ogumionych kołach. Silnik samochodu przenosi moment obrotowy na koła wytwarzając na styku opony i jezdni siłę napędową równoważącą opory ruchu samochodu, głównie jego opory aerodynamiczne.

Opony kół muszą przenosić siły pionowe będące sumą ciężaru samochodu i pionowej siły aerodynamicznej nazywanej siłą nośną. Gdy siła nośna ma znak ujemny jest uważana za docisk aerodynamiczny.

Prenumerata 2020

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.

eprasa.pl 2e0409c816

Wydania specjalne

w wersji elektronicznej – pliki PDF

Ceny już od 10 zł!

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

eprasa.pr 2e04096816

Roczniki 2019 taniej o 50%

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

Oferta ważna do wyczerpania nakładu

eprasa.pl 2e0409c816