FIZYKA
w Szkole z Astronomią

CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI

363 (LXIV) indeks 35810X **Nr 4 lipiec/sierpień 2019** CENA 27,50 zł (w tym 5% VAT)

Samochód na wodę
Technologia i ekonomia wodorowa

Oświeć mnie
Oddziaływanie światła na materię

Załogowe loty kosmiczne
Czy ekspansja Kosmosu ma sens?

Osobliwości czarnej dziury
Zobaczyć, zajrzeć pod horyzont i przeżyć

Rodon
– zmierz to!
Projekt CNK

Fizyka śmigłowców

Latające karetki

ISSN 0426-3383

epresa.pl 02d20e736f

Co, jak i dlaczego?

- ✔ Co wskazuje elektroskop?
- ✔ Jak zagotować wodę, nie podgrzewając jej?
- ✔ Czy energia może zniknąć?
- ✔ Czy satelity stacjonarne są rzeczywiście stacjonarne?
- ✔ Czy można zobaczyć siłę?
- ✔ Jak zmierzyć częstotliwość ruchu skrzydełek pszczoły?
- ✔ Dlaczego opony w samochodach Formuły 1 są szerokie?
- ✔ Jak powstaje deszcz? A jak powstaje burza?
- ✔ Dlaczego w Ziemi jest więcej żelaza niż złota?
- ✔ Czy elektrony stanowiące prąd elektryczny płyną do nas z elektrowni?
- ✔ Jak obliczyć rozmiary atomu?
- ✔ Jak długo zachodzi Słońce?

Wydanie specjalne
w wersji elektronicznej
(plik PDF)

Tylko 15 zł!

Formularz zamówienia na stronie: www.aspress.com.pl/specjalne/

eprasa.pl 02d20e786f

Drodzy Czytelnicy!

Data publikacji tego numeru jest szczególna. Po pierwsze – rozpoczyna się nowy rok szkolny, a po drugie – minęło dokładnie 50 lat od pierwszego lądowania człowieka na Księżycu. Ten niewątpliwy sukces technologiczny jest obecnie fetowany przez większość wpływowych środowisk. Nawet prezydent USA Donald Tramp przyjął w Waszyngtonie mocno już podstarzałych weteranów misji Apollo.

W czasach, kiedy te misje miały miejsce wiązano z nimi olbrzymie nadzieje. Futurolodzy snuli wizję stałych baz na Księżycu i stopniowego podboju Kosmosu. Jakoś nic z tego nie wyszło. Dlaczego? Próbę odpowiedzi na to pytanie podejmuje w swoim artykule Waldemar Reńda. Artykuł ten zajmuje się kosztami lotów w kosmos. Autor analizuje pod tym względem zarówno współczesne, jak i projektowane misje. Przeprowadzona tam analiza daje odpowiedzi na wiele pytań.

Na przeciwnym biegunie naszego numeru znajduje się artykuł Tomasza Kubiaka pt. „Latające karetki" poświęcony śmigłowcom używanym w ratownictwie medycznym. Znajdziemy tam bardzo szeroki wachlarz zagadnień. Po pierwsze, omówiona w nim jest historia powstania samych śmigłowców. Po drugie przedstawiona jest dynamika lotu śmigłowca. Następnie w skróconej formie przedstawione jest wyposażenie śmigłowca.

Na sam koniec chciałbym polecić typowo dydaktyczny artykuł Andrzeja Sokołowskiego poświęcony modelowaniu ruchu falowego za pomocą sprężyny.

Serdecznie zapraszam do lektury.

W imieniu redakcji

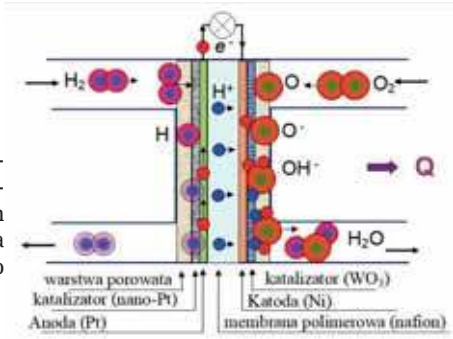
Zbigniew Wiśniewski

Fizyka wczoraj, dziś, jutro

4 **Latające karetki, czyli o fizyce śmigłowców ratowniczych** ¢ Tomasz Kubiak

10 **Samochód na wodę** ¢ Grzegorz Karwasz, Katarzyna Wyborska, Andrzej Karbowski, Anna Kamińska, Tadeusz Bury

W zupełnie niedalekiej przyszłości i w perspektywie zmian w energetyce i technologii wodorowej czeka nas mnóstwo nowych zagadnień wymagających przygotowania interdyscyplinarnego uczniów: nie tylko w fizyce i chemii, ale i ekonomii.



28 **Paradoksy szczególnej teorii względności. Część IV** ¢ Jan Kurzyk

Z naszych lekcji

16 **Rodon – zmierz to**

Czy uczniowie ostatnich klas szkół podstawowych są w stanie zbudować układ doświadczalny i dokonać za jego pomocą pomiarów stężenia promieniotwórczego gazu w powietrzu?

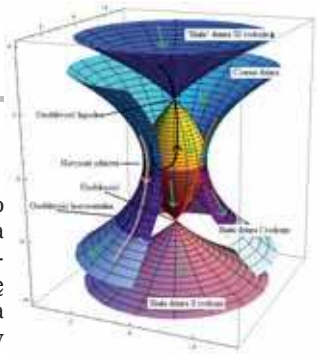
19 **Oświeć mnie, czyli jak oddziałuje światło z materią** ¢ Łukasz Haryński, Katarzyna Grochowska

24 **Modelowanie fal podłużnych za pomocą sprężyny (springy)** ¢ Andrzej Sokołowski

26 **Anastasio Volta – wynalazca baterii** ¢ Tadeusz Wibig

34 **Co, jak, dlaczego..? (Cz. VIII)** ¢ Waldemar Reńda

Astronomia dla każdego



36 **Zobaczyć osobliwość czarnej dziury i przeżyć** ¢ Grzegorz Koczan

Parafrazując powiedzenie rozsławione przez Goethego „zobaczyć Neapol i umrzeć" autor zaprasza nas na znacznie bardziej egzotyczną i niebezpieczną wycieczkę, która fizycznie nie miałaby prawa zakończyć się powrotem czy też przeżyciem. Jednak matematyka i geometria zanurzeniowa 3D daje nam tanie bilety w obie strony.

46 **Załogowe loty kosmiczne – za czy przeciw?** ¢ Waldemar Reńda

Zapewne nadal będziemy intensywnie badać Kosmos. Jest on bowiem ogromnym laboratorium fizycznym, w którym zachodzą zjawiska niemożliwe do wywołania na Ziemi. Staramy się też poznać strukturę Kosmosu i jego historię. Ale czy do tego konieczne są loty załogowe?

FIZYKA w Szkole z Astronomią
CZASOPISMO DLA NAUCZYCIELI
NUMER 4 LIPIEC/SIERPIEŃ 2019 Nakład 3000 egz. CENA 27,50 zł (w tym 5% VAT)
363 (LXII) 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-2019/, e-mail: szewczyk24@gmail.com, tel. 606 201 244 **Reklama** Jędrzej Chodakowski, jchodakowski1953@gmail.com **Skład i łamanie** Vega design **Druk i oprawa** Paper & Tinta, ul. Ceglana 34, 05-270 Nadma
Zdjęcie na okładce: 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

Latające karetki,

czyli o fizyce śmigłowców ratowniczych

Tomasz **Kubiak**

Jakże często, słysząc charakterystyczny dźwięk nadlatującego śmigłowca, unosimy oczy ku niebu i zastanawiamy się, w jaki sposób maszyna ta potrafi nie tylko utrzymać się w powietrzu w trakcie ruchu w dowolnym kierunku, ale również zawisnąć nieruchomo względem ziemi, chociażby podczas podejmowania rozbitków z wody.

W przypadku helikopterów ratowniczych ciekawa fizyka ma związek oczywiście nie tylko z zagadnienia aerodynamicznymi, lecz również z działaniem sprzętu medycznego będącego na ich wyposażeniu. Spróbujmy zatem zgłębić tajniki tych latających ambulansów.

Ogólna wiedza o śmigłowcach ogranicza się zazwyczaj do znajomości encyklopedycznej definicji, która wskazuje, że te zaliczane do aerodyn maszyny wytwarzają siłę nośną dzięki ruchowi obrotowemu wirnika. W rzeczywistości mechanika lotu helikopterów jest bardzo skomplikowana, a grube podręczniki poświęcone temu zagadnieniu studiują nie tylko przyszli piloci, ale również konstruktorzy i inżynierowie pragnący rozwijać technologie lotnicze.

Co ciekawe, urządzenie latające przypominające wiropłat naszkicował już Leonardo da Vinci w końcu XV w. Ta wykona z drewna, trzciny, drutu oraz płótna lnianego „śruba powietrzna" miała być napędzana siłą ludzkich mięśni. Współcześni naukowcy powątpiewają jednak, żeby tego typu maszyna, unosząca na platformie czterech pasażerów, mogła kiedykolwiek oderwać się od ziemi.

Nawiązując do historii, warto wspomnieć, iż w 1842 r. Anglik W. H. Phillips skonstruował zdolny do pionowego wznoszenia model, którego rotor był obracany przez strumienie pary pochodzącej z małego bojlera i wyrzucanej przez dysze na końcach łopat.

Na pierwszy lot helikoptera z człowiekiem na pokładzie czekać trzeba było aż do 1907 r., kiedy to francuski inżynier Paul Cornu stworzył dwuwirnikowy statek powietrzny napędzany silnikiem spalinowym. Za ojca współczesnych śmigłowców uważany jest jednak pochodzący z Kijowa a pracujący w USA Igor Sikorski, który zbudował i przetestował w maju 1940 r. w pełni udany prototyp VS 300 z pojedynczym wirnikiem głównym.

Do celów ratunkowych helikoptery na świecie używane są od połowy lat czterdziestych XX w. Wprawdzie początkowo były to maszyny wojskowe, ale z czasem wprowadzono do służby także te, przeznaczone do pracy w medycznym transporcie cywilnym i stacjonujące przy szpitalach, np. w Monachium (1970 r.) czy Denver (1972 r.).

Fot.1. Dawniej do transportu sanitarnego w Polsce wykorzystywano śmigłowce: PZL Mi-2 (od roku 1975) oraz WSK SM-1 (w latach 60-tych XX w.).

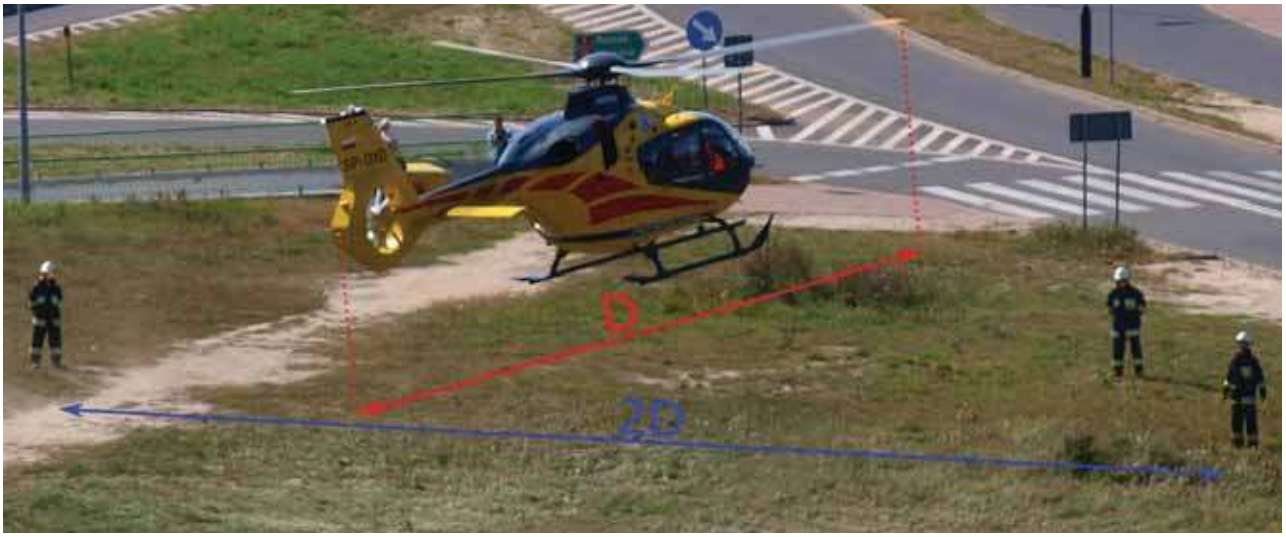
Fot.2. Śmigłowiec Eurocopter EC 135 P3 w służbie Lotniczego Pogotowia Ratunkowego.

Co ciekawe, w Polsce już od połowy lat 60 XX w. zespoły Lotnictwa Sanitarnego korzystały z lekkich śmigłowców PZL SM-1 i SM-2, zastąpionych później przez popularne Mi-2 (fot. 1). Obecnie w naszym kraju Lotnicze Pogotowie Ratunkowe eksploatuje nowoczesne helikoptery Eurocopter EC 135 (Airbus Helicopters H135) w wersjach P2+ i P3 (fot. 2).

Maszyny typu EC 135 P3 z podwoziem płozowym, których długość wraz z obracającym się wirnikiem to 12,26 m, charakteryzują się mocą startową 2 × 336 kW. Przy masie całkowitej 2980 kg mogą wznosić się z szybkością 7,8 m/s, osiągać prędkość lotu poziomego 252 km/h i zasięg bez rezerwy paliwa 630 km.

Śmigłowcowa Służba Ratownictwa Medycznego, określana często skrótem HEMS (*ang. Helicopter Emergency Medical Service*), uczestniczy każdego dnia w wielu misjach, których celem jest nie tylko transport chorych między szpitalami, ale również niesienie pomocy ofiarom wypadków czy nagłych zachorowań. Śmigłowiec ląduje zazwyczaj w pobliżu miejsca zdarzenia, na płaskim obszarze o wymiarach nie mniejszych niż $2{\cdot}D \times 2{\cdot}D$ (albo powierzchni ograniczonej okręgiem o średnicy 2D), gdzie D to największy wymiar śmigłowca wraz z wirnikiem (fot. 3). Przy szpitalach zazwyczaj przygotowane są spe-

eprasa.pl 02d20e786f



Fot.3. Śmigłowiec startujący z obszaru trawiastego o średnicy większej niż 2D, gdzie D to największy wymiar maszyny wraz z wirnikiem.

cjalne lądowiska wyposażone w integralny system oświetlenia oraz wskaźnik kierunku wiatru w postaci zwężającego się rękawa osadzonego na maszcie o wysokości 3 m.

Podstawy aerodynamiki śmigłowca

Śmigłowce ratownicze posiadają zazwyczaj pojedynczy wirnik główny, czyli są to maszyny zbudowane w układzie klasycznym (Sikorskiego). Oczywiście niezbędnym elementem ich konstrukcji jest także znacznie mniejszy, zamontowany pionowo wirnik ogonowy. Może on posiadać formę fenestronu, czyli wentylatora złożonego z 10 do 15 łopatek osadzonych na wspólnym wieńcu w obudowie tunelowej w stateczniku pionowym. Zainteresowani fizyką łatwo domyślą się roli, jaką spełnia śmigło ogonowe. Moment jego siły ciągu względem środka masy śmigłowca musi bowiem równoważyć moment reakcyjny, pochodzący od wirnika nośnego. Przyglądając się sytuacji bardziej szczegółowo, zauważymy, że siły oporu powietrza działające na łopaty wirnika głównego wytwarzają względem jego osi moment oporu obrotu. Aby go pokonać a tym samym podtrzymać ruch śmigieł, do piasty wirnika dostarcza się, z silnika zlokalizowanego w kadłubie helikoptera, moment obrotowy M_{obr}:

$$M_{obr} = \frac{P}{\varpi}$$

gdzie: P – moc przekazywana na wirnik nośny, ω – prędkość kątowa obrotu wirnika.

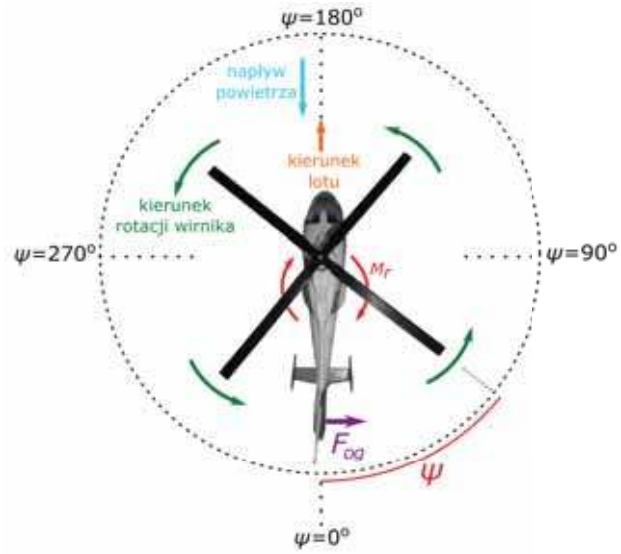
Zgodnie z trzecią zasadą dynamiki Newtona skutkuje to wytworzeniem momentu reakcyjnego M_r, który przechodzi na korpus maszyny i stara się go obrócić w kierunku przeciwnym do kierunku rotacji wirnika (rys.1). Aby temu zapobiegać, a tym samym zachować obrany kierunek lotu, śmigło ogonowe musi zapewniać odpowiedni ciąg F_{og}:

$$F_{og}\, l = M_{og} = M_r$$

gdzie: l – odległość wału wirnika ogonowego do wału wirnika głównego (ramię siły).

W tym miejscu warto wspomnieć, że szczególnie w zastosowaniach transportowych, stosunkowo popularne są śmigłowce innego typu, tj. dwuwirnikowe w układzie podłużnym (Piaseckiego[1]). Zapewne każdy czytelnik kojarzy amerykańskie helikoptery wojskowe Boeing CH-47 Chinook. W ich przypadku dwa wirniki nośne ustawione jeden za drugim obracają się synchronicznie w przeciwnych kierunkach, co sprawia, że momenty reakcyjne równoważą się i pionowe śmigło ogonowe nie jest już potrzebne.

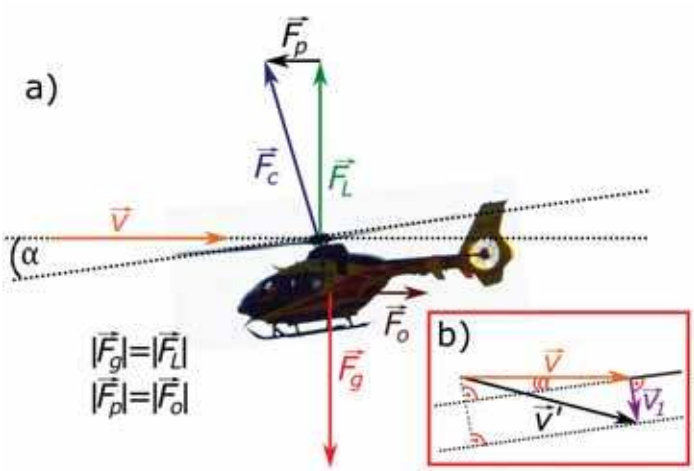
Wróćmy jednak do śmigłowców w układzie klasycznym i spróbujmy zastanowić się nad aerodynamiką ich wirnika głównego. Oczywiście zagadnienie to jest bardzo skomplikowane, więc posłużymy się jedynie opisem przybliżonym. Należy zwrócić uwagę, że podczas lotu



Rys.1. Przy ustalonej trajektorii lotu ciąg śmigła ogonowego F_{og} zapobiega niekontrolowanemu obrotowi śmigłowca w wyniku działania momentu reakcyjnego M_r. Przez Ψ oznaczono azymutalne położenia łopat wirnika głównego.

[1] Frank Piasecki był amerykańskim konstruktorem, synem polskich emigrantów, który projektował pionierskie śmigłowce dwuwirnikowe.

eprasa.pl 02d20e786f



Rys.2. a) Siły działające na śmigłowiec podczas lotu poziomego na stałej wysokości; b) warunki opływu ukośnego, gdy strumień powietrza napływa na wirnik nośny pod kątem α.

poziomego na stałej wysokości wirnik musi wytworzyć zarówno siłę nośną F_L, która równoważy ciężar F_g maszyny wraz z załogą i ładunkiem oraz siłę F_p odpowiedzialną za ruch postępowy. Ta ostatnia w przypadku, gdy helikopter porusza się ze stałą szybkością, równoważy opory ruchu F_o, związane m.in. z zakłóceniem przepływu powietrza przez kadłub. Generalnie siły F_L i F_p to składowe siły F_c, czyli całkowitego ciągu wirnika nośnego (rys.2a).

Dla zainteresowanych warto dodać, iż przy tej samej mocy ciąg rośnie wraz ze zwiększaniem średnicy wirnika głównego (średnicy okręgu zakreślanej przez obracające się końce łopat). Zastosowanie bardzo długich łopat wiązałoby się jednak z koniecznością wydłużenia belki ogonowej (większe wymiary maszyny) a także byłoby skomplikowane technologicznie. Eksploatowane obecnie przez HEMS śmigłowce Eurocopter EC 135 mają czteropłatowy wirnik nośny o średnicy 10,2 m. Natomiast ich poprzednik, czyli helikopter Mi-2, posiadał wirnik trójłopatowy o średnicy 14,5 m. Generalnie w przypadku, gdy liczba łopat jest mniejsza, ich końce muszą obracać się z większą szybkością, wytwarzany ciąg jest pulsacyjny, a podczas lotu pojawiają się zwiększone drgania. Prędkości obrotowe wirników głównych współczesnych śmigłowców zawierają się zazwyczaj w przedziale 250-600 obrotów na min (dla EC-135 wynoszą 395 rpm). Energia potrzebna do ich napędzania przenoszona jest przez układ transmisyjny (wały i reduktory) z dwóch silników turbinowych.

Śmigłowiec unosi się w powietrzu dzięki siłom aerodynamicznym wytwarzanym w wyniku przepływu powietrza przez tarczę jego wirnika głównego[2]. Łopaty tego wirnika mają specjalny profil (rys. 3a), czyli kształt poprzecznego przekroju. Zwykle jest on niesymetryczny i może kojarzyć się z profilem skrzydła samolotu. Z lekcji fizyki pamiętamy zapewne uproszczony opis, wskazujący, że napływający strumień powietrza rozdziela się i opływa taki płat od góry i od dołu. Przepływ nad górną, zakrzywioną krawędzią obiektu jest szybszy, natomiast ten pod dolną wolniejszy. Zgodnie z prawem Bernoulliego, które wywodzi się z zasady zachowania energii, w miejscu, gdzie prędkość przepływu wzrasta, ciśnienie dynamiczne rośnie, natomiast statyczne musi zmaleć. Stąd ciśnienie statyczne jest niższe nad powierzchnią górną niż pod dolną, zatem na tę ostatnią działa większa siła parcia. Wypadkowa sił parcia działających na obie strony płata zwrócona jest w górę i stanowi siłę nośną.

W rzeczywistości na ciąg wirnika głównego śmigłowca składają się przyczynki od sił aerodynamicznych wytwarzanych przez poszczególne fragmenty łopat:

$$F_c = n \cdot \left(\sum_i \Delta F_{c_i} \right)$$

gdzie: n – liczba łopat, ΔFc_i – ciąg elementu łopaty.

W przypadku, gdy helikopter wznosi się lub opada pionowo bądź pozostaje w zawisie strumień napływającego powietrza skierowany jest wzdłuż osi obrotu jego wirnika. Wówczas kąt natarcia wirnika nośnego α (zawarty między kierunkiem napływającego powietrza a płaszczyzną obrotu tegoż wirnika) wynosi ± 90° i mamy do czynienia z opływem osiowym. W czasie t przez powierzchnię tarczy wirnika S przepływa masa powietrza równa:

$$m = \rho \cdot (v + v_1) \cdot t \cdot S$$

gdzie:
ρ – gęstość powietrza,
v – prędkość strumienia powietrza opływającego wirnik nośny,
v_1 i v_2 – indukowane prędkości zasysania i odrzucania powietrza przez ten wirnik.

Uzyskuje ona przyspieszenie:

$$a = \frac{v_2}{t}$$

Siła ciągu wirnika wynosi wówczas:

$$F_c = ma = \rho \cdot S \cdot v_2 \cdot (v + v_1)$$

Dla maszyny znajdującej się w zawisie (v = 0 m/s a $v_2 = 2v_1$), mamy:

$$F_c = 2 \cdot \rho \cdot S \cdot v_1^2$$

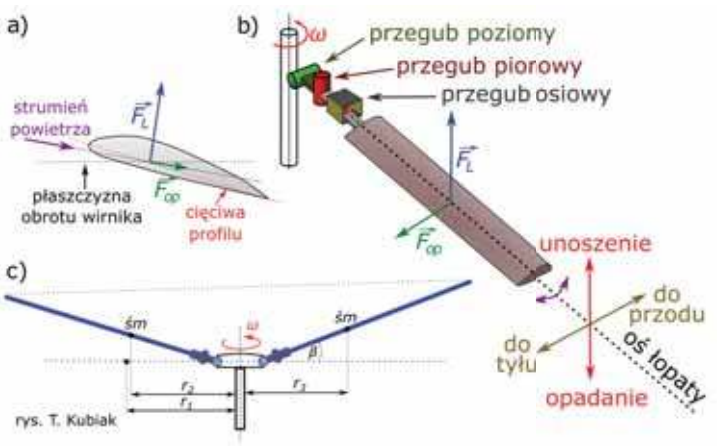
Sytuacja robi się znacznie bardziej skomplikowana, kiedy helikopter porusza się ruchem postępowym a strumień powietrza napływa na wirnik nośny pod dowolnym kątem α, różnym od kąta prostego (opływ ukośny, patrz rys. 2b). Wówczas możemy zapisać:

$$F_c = \rho \cdot S \cdot v_2 \cdot \sqrt{v^2 \cos^2 \alpha + (v \cdot \sin \alpha + v_1)^2}$$

Rozpatrując zagadnienie nie można oczywiście zapominać o takich czynnikach, jak zależność gęstości powie-

[2] Tarczą wirnika nazywana jest powierzchnia zakreślana przez obracające się łopaty.

eprasa.pl 02d20e786f



Rys.3. a) Profil łopaty wirnika głównego; b) przegubowe zawieszenie łopat wirnika głównego; c) stożek zakreślany przez łopaty przy opływie ukośnym.

trza od temperatury i wysokości lotu oraz wpływach prędkości obrotowej i kąta ustawienia łopat na indukowaną prędkość podsysania.

Zachowanie łopat lecącego helikoptera można opisać złożeniem następujących ruchów: obrotowego, postępowego, drgającego względem przegubu pionowego oraz wahliwego względem przegubu poziomego. W tym miejscu warto spojrzeć na rys. 3b i uświadomić sobie, że dzięki przegubom poziomym łopaty mogą opadać lub unosić się (następuje zmiana kąta β między ich osią a płaszczyzną piasty wirnika) w zależności od tego, czy ich ruch odbywa się zgodnie czy przeciwnie do strumienia napływającego powietrza.

Zwróćmy uwagę, że w konsekwencji wahań środek masy łopat zmienia swe położenie względem osi obrotu wirnika a one same zakreślają w przestrzeni powierzchnię zbliżoną do stożka (rys.3c). Z kolei przeguby pionowe umożliwiają łopatom odchylanie się w płaszczyźnie rotacji wirnika do przodu (w kierunku obrotu) i do tyłu. Para łopat może zatem oddalać się lub zbliżać do siebie. Trzeci typ połączeń ruchowych, czyli przeguby osiowe, pozwalają natomiast na regulację skoku łopat, czyli kąta ich ustawienia, co realizuje się poprzez ich obrót wokół osi podłużnych.

Warto jeszcze wspomnieć, że w literaturze często używa się pojęcia azymutalne położenie łopaty. Definiuje się je jako kąt Ψ pomiędzy kierunkiem napływającego podczas lotu powietrza a podłużną osią łopaty, przy czym jego wartość ustalana jest w kierunku obrotu wirnika nośnego (patrz ponownie rys. 1). Dla zainteresowanych warto dodać, że gdyby łopaty obracały się sztywno ze stałym kątem natarcia, miałyby nierównomierny udział w wytwarzaniu całkowitej siły nośnej (te znajdujące się w danym momencie po stronie nacierającej wirnika dawałyby znacznie większy przyczynek do F_L).

Nierównowagę wielkości sił nośnych względem azymutu balansują jednak cykliczne wahania łopat, które możliwe są właśnie dzięki przegubom poziomym. Kiedy bowiem łopata porusza się w naprzeciw napływającego strumienia (azymut 0° – 180 °) ze względu na przyrost siły nośnej unosi się w górę. To z kolei zmniejsza kąt natarcia a tym samym siłę nośną, pozwalając łopacie opaść. Po drugiej stronie wirnika (azymut 180°–360°) dla łopaty poruszającej się zgodnie ze strumieniem powietrza zachodzi proces odwrotny. Wahania łopat pozwalają zatem wyrównać ich siły nośne na wszystkich azymutach a tym samym zachować równowagę maszyny w locie.

Sterowanie śmigłowcem

Wiemy już, w jaki sposób śmigłowiec utrzymuje się w powietrzu i porusza ruchem postępowym. Warto jednak zastanowić się nad sposobem wykonywania manewrów taką maszyną. Kierunek jej lotu zależy oczywiście od ustawienia wirnika głównego, który nie tylko wytwarza siłę nośną, ale także momenty odpowiedzialne za sterowanie. Tak więc sterowność podłużną i poprzeczną (odpowiednio ruch przód – tył oraz prawo – lewo przy zachowanej orientacji kabiny) zapewnia się w wyniku nachylenia płaszczyzny rotacji wirnika głównego. Nietrudno domyślić się również, iż w celu obrócenia maszyny względem osi tegoż wirnika (sterowność kierunkowa) należy zmienić ciąg śmigła ogonowego. Wówczas to albo niezrównoważony moment reakcyjny, albo nadmiarowy ciąg śmigła ogonowego obróci maszynę w wybraną stronę. Natomiast zmianę prędkości pionowej realizuje się poprzez regulację kąta ustawienia łopat wirnika głównego i mocy silnika. Przykładowo zwiększenie kąta natarcia pociąga za sobą wzrost oporu a tym samym spadek prędkości obrotowej wirnika, co musi zostać skompensowane dostarczeniem mu dodatkowej mocy.

Oczywiście trzeba pamiętać, iż na zachowanie śmigłowca w locie wpływają warunki pogodowe (siła wiatru, temperatura i wilgotność powietrza) a także obciążenie maszyny.

Bezpieczeństwo lotu

Zarówno pacjenci transportowani śmigłowcem, jak i niektórzy czytelnicy tego artykułu, zastanawiają się zapewne, czy lot taką maszyną jest bezpieczny? A co stanie się, gdy silniki zawiodą? Czy helikopter spadnie na ziemię jak kamień? Okazuje się, że jeśli wiropłat sterowany jest przez dobrze wyszkolonego pilota, nawet w przypadku awarii jednostki napędowej może bezpiecznie wylądować dzięki mechanizmowi autorotacji wirnika nośnego. Oczywiście osoba siedząca za sterami musi szybko zareagować, gdyż zaprzestanie pracy silnika pociąga za sobą spadek siły nośnej oraz naruszenie równowagi śmigłowca. Zanika moment reakcyjny, przód maszyny (tzw. „nos”) ulega opuszczeniu, a kadłub przechyla się z powodu innego opływu przez powietrze. Należy zatem nie tylko zmienić kierunek ciągu śmigła ogonowego (aby maszyna nie zaczęła się obracać), ale przede wszystkim kąt ustawienia (czyli skok) łopat wirnika nośnego, żeby utrzymywać w zadanym przedziale prędkość ich rotacji. Po awarii silnika wirnik główny uzyskuje bowiem zdolność do swobodnego obrotu a przepływ powietrza z dołu do góry przez jego tarczę podczas opadania śmigłowca zapewnia dodatkowy ciąg. W trakcie awaryjnego lądowania helikopter w miarę możliwości powinien poruszać się lotem ślizgowym. Kąt nachylenia

eprasa.pl 02d20e786f

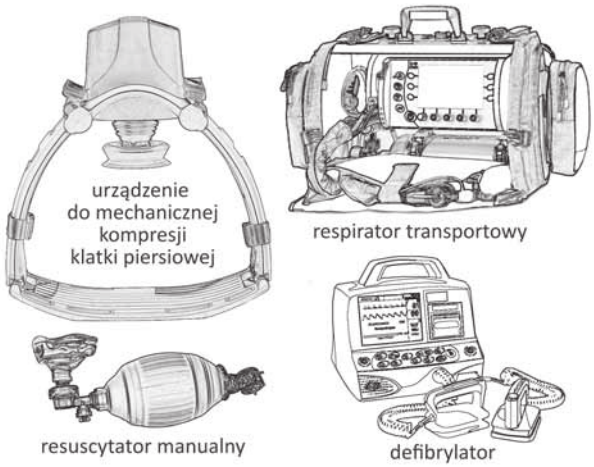
toru dobiera się w zależności od odległości do wybranego lądowiska. Przed przyziemieniem pilot musi zmniejszyć szybkość maszyny względem ziemi i wyrównać jej sylwetkę, aby nie zawadzić ogonem o podłoże. Niekiedy jednak sprowadzenie statku powietrznego na ziemię z prędkością postępową nie jest możliwe i wówczas podejmuje się próbę autorotacyjnego lądowania z pionowym opadaniem, co nie jest bezpieczne i często kończy się uszkodzeniem maszyny.

Chociaż z pozoru wydaje się to zaskakujące, śmigłowiec, który przed startem lub po wylądowaniu stoi na sprężystym podłożu z obracającym się wirnikiem przegubowym, również może ulec poważnemu wypadkowi. Przyczyną jest zjawisko nazywane rezonansem naziemnym. Jeśli częstość poziomych oscylacji łopat zrówna się z częstością drgań własnych kadłuba, helikopter stanie się dynamicznie niestateczny. Kadłub, który jest połączony z podłożem za pomocą podwozia zacznie bowiem oscylować w odpowiedzi na obciążenie bezwładnościowe związane z odsunięciem się środka ciężkości wirnika od jego piasty na skutek zaburzenia synchronizacji ruchu łopat (a te, przypomnijmy, mogą zbliżać się do siebie bądź oddalać dzięki przegubom pionowym). Drgania układu będą narastać i w konsekwencji doprowadzą do gwałtownego uszkodzenia konstrukcji maszyny. Warto wspomnieć, że to właśnie rezonans naziemny był przyczyną katastrofy, jaka miała miejsce w 2009 roku, kiedy to śmigłowiec Lotniczego Pogotowia Ratunkowego Agusta A 109E Power rozpadł się na płycie lotniska Warszawa-Babice, tracąc m.in. ogon obcięty przez łopaty wirnika głównego.

Współczesne helikoptery są tak projektowane, aby stojąc swobodnie na podłożu, nie były podatne na rezonans naziemny w całym zakresie prędkości obrotowych wirnika. Źródłem potencjalnego zagrożenia pozostaje jednak niesymetryczne lądowanie na jedno koło albo płozę. Przechylony na określoną stronę wał główny maszyny powoduje bowiem zachwianie jej równowagi i wspomnianą wcześniej utratę synchronizacji ruchu łopat. Pilot może próbować zapobiec zjawisku, odrywając śmigłowiec od ziemi lub uruchamiając hamulec wirnika. Generalnie jednak należy podkreślić, iż zagrożenia bezpieczeństwa lotu śmigłowców zdarzają się rzadko, a osoby siedzące za sterami maszyn z floty HEMS to doskonale wyszkoleni specjaliści.

Wyposażenie śmigłowca sanitarnego

Wprawdzie już samo zjawisko wytwarzania siły nośnej przez wirnik statku powietrznego jest bardzo ciekawe, ale w przypadku śmigłowców ratowniczych fascynująca fizyka odpowiada również za działanie ponad 100 urządzeń medycznych znajdujących się na ich pokładzie.



Rys.4. Cztery najważniejsze urządzenia medyczne znajdujące się na wyposażeniu śmigłowca HEMS.

Warto wymienić chociażby defibrylator służący do przerywania bardzo niebezpiecznego zaburzenia rytmu serca, jakim jest migotanie komór.[3] Taka zdezorganizowana aktywność elektryczna komór skutkuje ich nieskoordynowanymi skurczami oraz niezdolnością do efektywnego wyrzutu krwi do krążenia obwodowego. Podanie przez ścianę klatki piersiowej krótkiego impulsu elektrycznego o dużej energii (np. 200 J) prowadzi do jednoczesnej depolaryzacji komórek mięśnia sercowego i umożliwia odzyskanie kontroli przez naturalny rozrusznik, jakim jest węzeł zatokowo-przedsionkowy.

W przypadku transportu osób z zatrzymaniem krążenia niezwykle przydatne jest także urządzenie do mechanicznej kompresji klatki piersiowej pacjenta, które przy zasilaniu bateryjnym potrafi przez kilkadziesiąt minut wykonywać masaż serca w sposób w pełni automatyczny z częstotliwością 80-120/minutę. Co ciekawe, maszyna dostosowuje przykładaną siłę (300 – 600 N) do oporności klatki piersiowej (6 – 12 N/mm), aby zapewnić optymalną głębokość uciskania (np. do 5 cm). Zastosowanie systemu pozwala zatem uzyskać lepsze wyniki działań resuscytacyjnych a przy tym znacznie odciążyć personel medyczny, zastępując go podczas wykonywania wyczerpującej czynności ratowniczej. Dodatkowo u chorych z brakiem oddechu lub niewydolnością oddechową konieczne jest prowadzenie sztucznej wentylacji z użyciem będących na wyposażeniu śmigłowca resuscytatorów manualnych bądź przenośnych respiratorów. W pierwszym z wymienionych przypadków wtłaczanie powietrza do dróg oddechowych pacjenta odbywa się na skutek ręcznego ściskania worka samorozprężalnego przez ratownika, natomiast w drugim objętość oddechowa jest cyklicznie dostarczana przez maszynę. Cztery wspomniane powyżej urządzenia medyczne pokazane są na rys. 4.

[3] O zasadzie działania defibrylatora, resuscytatora manualnego oraz pulsoksymetru można przeczytać w artykule: T. Kubiak, Fizyka w karetce pogotowia, Fizyka w Szkole nr 6 (2014), s. 4-7.

[4] Informacje o sfigmomanometrach rtęciowych, zegarowych (aneroidowych) oraz elektronicznych (oscylometrycznych) zawarte są w artykule: T. Kubiak, Fizyka u internisty, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 2 (2018), s. 4-7.

[5] Szczegółowe wiadomości o ultrasonografii można znaleźć w tekście: T. Kubiak, Ultrasonografia, czyli fale akustyczne w służbie medycyny, Fizyka w Szkole z Astronomią, nr 5 (2017), s. 4-9.

eprasa.pl 02d20e786f

Oczywiście na pokładzie helikoptera sanitarnego oprócz sprzętu do podtrzymywania funkcji życiowych pacjentów musi znaleźć się podstawowa aparatura diagnostyczna i monitorująca. Zakładany na palec pulsoksymetr sprawdza wysycenie krwi tętniczej tlenem na podstawie pomiaru różnic w absorpcji promieniowania czerwonego $\lambda_1 = 660$ nm i podczerwonego $\lambda_2 = 940$ nm przez przenoszącą tlen oksyhemoglobinę oraz odtlenowaną deoksyhemoglobinę. Z kolei glukometr umożliwia wyznaczenie stężenia glukozy we krwi, natomiast sfigmomanometr pozwala na pośredni pomiar ciśnienia tętniczego.[4]

Bardziej zaawansowaną diagnostykę zapewniają natomiast przenośne ultrasonografy, będące od 2018 roku na wyposażeniu śmigłowców Lotniczego Pogotowia Ratunkowego w Polsce. Przypomnijmy, że ultrasonografia wykorzystuje fale akustyczne o częstotliwościach 1-15 MHz i pozwala uzyskiwać obrazy różnych struktur anatomicznych dzięki pomiarowi ech, czyli fal odbitych od granic tkanek różniących się wartościami impedancji akustycznej.[5] Warto zwrócić uwagę na fakt, że nawet pobieżny przegląd aparatury medycznej ulokowanej na pokładzie śmigłowca uzmysławia nam ogromną rolę fizycznych metod diagnostyki i terapii we współczesnym ratownictwie medycznym.

dr Tomasz Kubiak
Wydział Fizyki UAM w Poznaniu
oraz Poznański Park Naukowo-Technologiczny Fundacji UAM

LITERATURA

[1] Helicopter Flying Handbook, U.S. Department of Transportation & Federal Aviation Administration, Oklahoma City, 2012.
[2] A. Krzyżanowski, Mechanika lotu śmigłowców, WAT, Warszawa 2010.
[3] J. G. Leishman, Principles of Helicopter Aerodynamics, Cambridge University Press, Cambridge 2006.
[4] J. Marszałkiewicz, Śmigłowce ratownicze w Polsce jako element środków transportu lotniczego, Logistyka 4 (2015), 7935-7942.
[5] C. Rotaru and M. Todorov, Helicopter Flight Physics [w:] Flight Physics - Models, Techniques and Technologies pod red K. Volkov, Rijeka, 2018, s. 19-47.
[6] J. Seddon, S. Newman, Basic Helicopter Aerodynamics, Blackwell Science, Oxford 2002.
[7] C. Lewis, J. H. Darbo, Helicopter Ground Resonance, Flight Safety Information Journal, 2006.
[8] M. Parafiniak, Analiza sterowania wirnikiem śmigłowca bezpilotowego, Prace Instytutu Lotnictwa nr 206 (2010), s. 112-118.
[9] https://www.lpr.com.pl/pl/o-nas/wyposazenie-medyczne-smiglowca-ec-135/ (dostęp 28.05.2019)
[10] https://www.lpr.com.pl/pl/o-nas/flota/ (dostęp 28.05.2019)

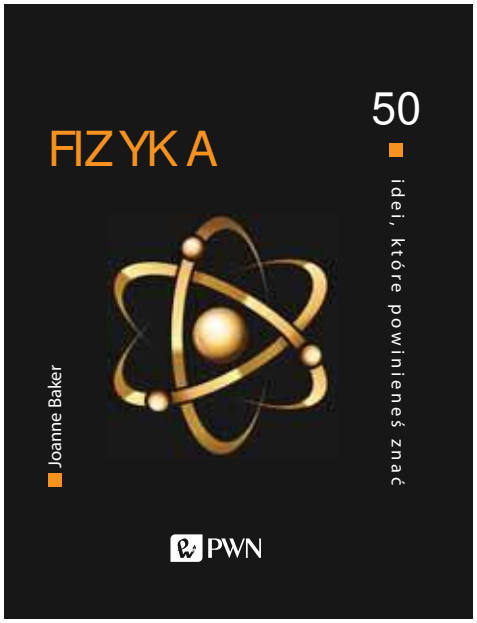
Nowe wydanie światowego bestsellera literatury popularnonaukowej, część pasjonującej serii:

50 idei, które powinieneś znać

Książka zawiera 50 krótkich, świetnie napisanych esejów, które prezentują najważniejsze koncepcje w dziejach fizyki, słynne odkrycia naukowe, prawa fizyczne i zasady ich działania, które wyjaśniają dlaczego wszechświat wygląda i funkcjonuje tak, a nie inaczej. W bardzo przystępny sposób, bez posługiwania się wzorami, opowiada o najważniejszych teoriach i odkryciach w dziedzinie fizyki. Wyjaśnia je na podstawie zjawisk, z którymi spotykamy się codziennie.

Autorka opisuje historyczne przełomy naukowe w zrozumieniu fizycznego świata, takie jak prawo o ruchu planet Keplera czy prawo grawitacji Newtona. Przedstawia również złożoność współczesnych teorii – od prawa Plancka do zasady wykluczenia Pauli'ego oraz od cięcia Schrodingera do teorii struny. Obala mit o niedostępności fizyki jako nauki dla przeciętnego człowieka. Tekst uzupełniają rozbudowane dodatki w postaci biogramów najsłynniejszych fizyków, kalendarium odkryć naukowych oraz wykresy i diagramy.

50 idei, które powinieneś znać to seria książek wprowadzających w fascynujący świat pytań i zagadnień – tych trudnych oraz tych zupełnie podstawowych – które od dawna towarzyszą ludzkości w misji zrozumienia świata. Seria prezentuje najważniejsze teorie i idee z głównych dziedzin wiedzy, stanowiąc świetny punkt wyjścia do dalszej nauki. Obowiązkowa lektura dla każdego początkującego erudyty!



Joanne Baker. 50 idei, które powinieneś znać. FIZYKA.
Tytuł oryginału: 50 Physics Ideas
you Really Need to Know. Tłumacz: Katarzyna Sorowiecka.
Wydanie II. ISBN: 978-83-01-20720-5
Format -165 x 205, Objętość: 264 str. Oprawa twarda.
Cena 49 zł.
Termin wydania: 10.09.2019

eprasa.pl 02d20e786f

Samochód na wodę

Grzegorz **Karwasz**, Katarzyna **Wyborska**,
Andrzej **Karbowski**, Anna **Kamińska**, Tadeusz **Bury**

Artykuł mówi o przyszłości, zupełnie niedalekiej, perspektywach energetycznych i technologiach wodorowych. Całe mnóstwo nowych zagadnień będzie wymagała przygotowania interdyscyplinarnego uczniów: nie tylko w fizyce i chemii, ale i ekonomii.

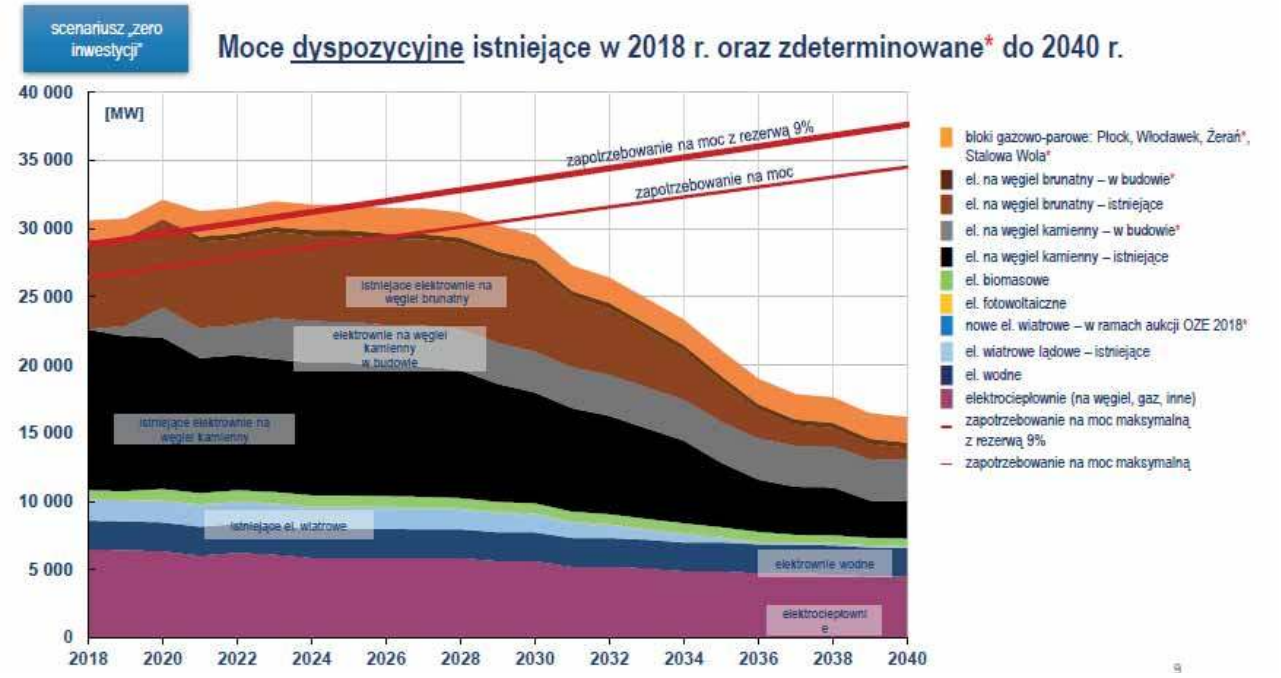
Koniec węgla

Ministerstwo Energii nawołuje do elektromobilności. Za kilka lat ma być w Polsce nawet dwa miliony samochodów elektrycznych. W Gdyni (i paru innych miastach Polski) jeżdżą trolejbusy (czyli autobusy zasilane prądem elektrycznym jak tramwaj) – kiedy zjeżdżają ze wzgórza, ich silniki działają jak prądnice i oddają prąd do sieci. Między innymi dzięki trolejbusom, Gdynia ma najczystsze powietrze w Polsce. Ale gdzie i jak powstaje prąd do zasilania trolejbusów (i przyszłych samochodów elektrycznych)? Dokładne porównanie (ryc.1) wskazuje, że prąd ten powstaje na Śląsku, w Bełchatowie, w Koninie. I prąd ten ma kolor czarny lub brunatny.

Ale z prognozy zapotrzebowania i podaży mocy elektrycznej w Polsce do 2040 roku, ryc. 1, wynika jeszcze kilka pesymistycznych wniosków. „Produkcja”[1] energii elektrycznej z węgla kamiennego i brunatnego ulegnie znacznej redukcji: złoża kopalin po prostu kończą się. Jeśli nie podjęte zostaną innowacyjne inwestycje, np. w energetyka jądrowa, tak na „oko”, w 2040 roku zabraknie 50% potrzebnej mocy elektrycznej (w Polsce zapotrzebowanie wynosi mniej więcej 1 GW na milion mieszkańców, a w Republice Korei jest to 1,5 GW).

Ryc. 2. Polska jest, według najnowszego raportu „Nature” [6] jednym z czterech krajów (obok Mongolii, Kazachstanu i Indii) opierających swą energetykę o węgiel. Tak dymią kominy elektrowni na węgiel brunatny w Pątnowie koło Konina (foto M. Karwasz)

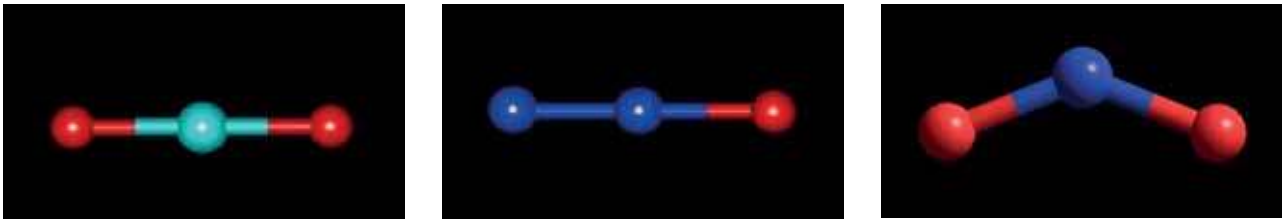
Węgla i ropy zabraknie nie tylko w Polsce. W chwili obecnej najwięcej reaktorów jądrowych powstaje w krajach arabskich. Oczywiście, rządy tych krajów znają wła-



Ryc. 1. Raport Ministerstwa Energii (22/1/2019): prognoza zapotrzebowania i podaży mocy elektrycznej w Polsce do 2040 roku. Główne „źródła” energii – węgiel kamienny i brunatny (paski czarny i brązowy) są na wyczerpaniu. https://www.gov.pl/web/energia/raport-mit-o-przyszlosci-energii-jadrowej

[1] Energii, oczywiście, nie „produkuje się” ale tylko przetwarza jej jedną formę na inną.

eprasa.pl 02d20e786f



Ryc. 3. Cząsteczka CO_2 jest liniowa i symetryczna; dopiero wzbudzona do drgań zginających (010) uzyskuje moment dipolowy. Cząsteczka N_2O jest liniowa, ale ma moment dipolowy. Cząsteczka NO_2 jest zgięta, więc ma moment dipolowy, choć 5-krotnie mniejszy niż H_2O; di-tlenek azotu powstaje w miejskim smogu i jest trujący. Model w skali – obliczenia HyperChem.

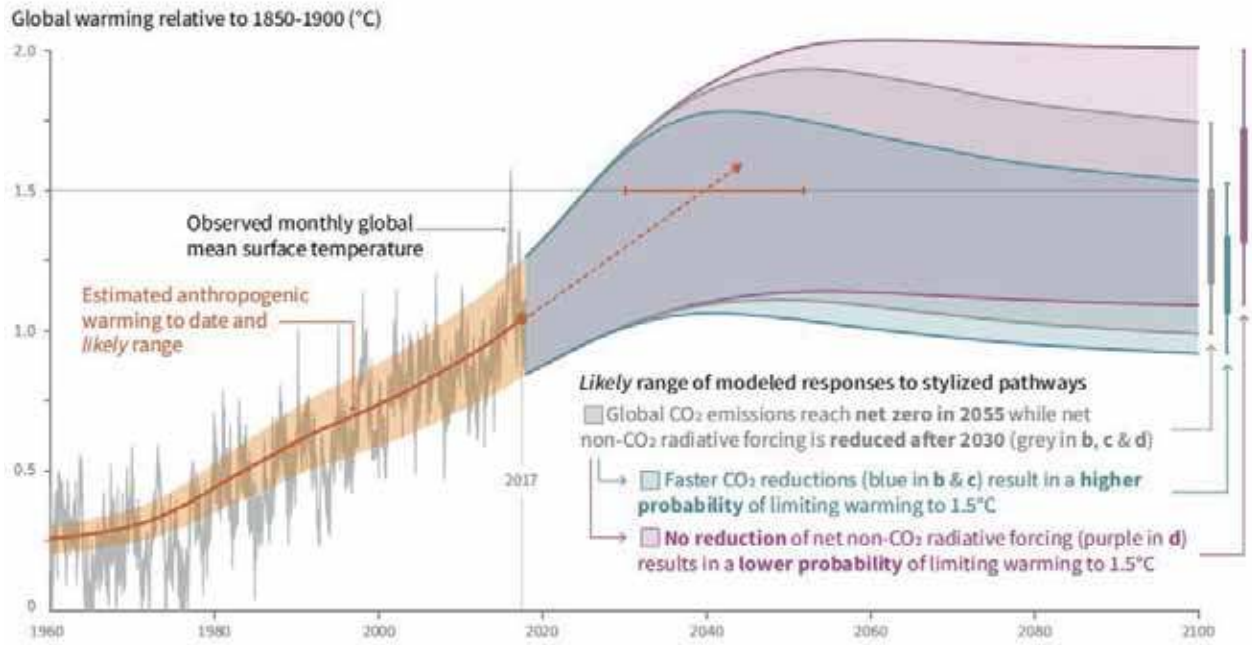
sne zasoby i na czas planują zastąpienie ropy przez inne „źródła" energii. Reaktor jądrowy nie jest tani – 1 GW mocy kosztuje tak około 4 mld euro. A Polska zaczęła właśnie płacić kary za emisję CO_2 – po parę miliardów euro rocznie. Dymiące kominy pod Koninem, ryc. 2, muszą więc zniknąć, nie tylko ze względu na kary, ale też przez szacunek dla mieszkańców Pątnowa i okolic.

Coraz cieplej

Globalny wzrost temperatury jest faktem coraz rzadziej negowanym. Zresztą, fizycy nie mają wątpliwości. To gazy „odsyłające" promieniowanie podczerwone z powrotem w kierunku powierzchni Ziemi są odpowiedzialne za efekt cieplarniany. Przypominamy zresztą, że naturalny (bez działań człowieka) efekt cieplarniany na Ziemi wynosi +33K: bez niego średnia temperatura wynosiłaby nie +15ºC a -18ºC. I to para woda jest głównym gazem cieplarnianym, jak to dyskutowaliśmy we wcześniejszym artykule [1].

Fizycy nie tylko rozumieją mechanizmy, ale też potrafią szybko szacować. Wzrost zawartości CO_2 w atmosferze z 270 ppm przed początkiem ery przemysłowej do ponad 400 ppm to tak, znów „na oko", co najmniej 50%. Tak dużo CO_2, jak wykazują badania lodów Antarktydy, nie było przez ostatnie 400 tysięcy lat. Na szczęście (?), węgiel, gaz, ropa kończą się: miarodajne czasopismo, jakim jest „Nature" w 2002 roku oceniło światowe zasoby węgla na 200 lat a gazu ziemnego na 55 lat[2] .

Niestety, wzrost temperatury nie ustanie wraz z emisją CO_2: inne gazy, jak N_2O (pochodzący z upraw rolnych) i CH_4 (wydobywający się z rozmarzającej tundry i emitowany przez bakterie w procesach trawiennych) są jeszcze bardziej „cieplarniane". Wszystkie te gazy są cząsteczkami wieloatomowymi: istnieje wiele różnych sposobów (modów), na które mogą w nich drgać atomy. Energia tych drgań odpowiada energii kwantów światła podczerwonego, tak więc gazy te nie „wypuszczają" ciepła promieniowania z Ziemi. Cząsteczka CO_2 ma geometrię liniową, symetryczną: dopóki nie zacznie drgać, słabo pochłania promieniowanie elektromagnetyczne. Cząsteczka N_2O (N=N=O), ryc.3. mimo że liniowa, posiada stały *moment dipolowy* – ładunek dodatni i ujemny są w niej przesu-



Ryc. 4. Najistotniejszy wynik ostatniego raportu IPCC nt. zmian klimatycznych: przewidywany wzrost temperatury (w stosunku do epoki przed-przemysłowej) wyniesie około 1-2ºC (w zależności id scenariuszy emisji CO2) i osiągnie maksimum około roku 2050. W modelu zakłada się zredukowanie emisji CO2 do zera w roku 2055. Źródło: [4]

[2] Było to przed rozpoczęciem przemysłowego wydobycia gazu łupkowego w USA. Polska, w opinii geologów, ma po USA największe złoża gazu łupkowego. Niestety, jego wydobycie powoduje znaczne spustoszenie środowiska przyrodniczego.

eprasa.pl 02d20e786f

nięte. W efekcie, jej wpływ na efekt cieplarniany jest 300 razy większy niż CO_2 (a czas „życia" w atmosferze 144 lata [2]).

Ostatni raport Międzyrządowego Panelu nt. Zmian Klimatycznych (IPCC) mówi o wzroście temperatury o 1,5ºC do roku 2050 (w porównaniu z rokiem 1850). Już nie tylko „ekolodzy" biją na alarm. Kolejne prestiżowe czasopismo, „Science" poświęciło w 2013 cały sierpniowy numer (No. 341) zmianom klimatycznym. Najgorzej dzieje się polarnym misiom: letni zasięg lodu na Arktyce zmniejszył się od 1980 roku o połowę [3] – nie mają gdzie polować na foki.

Nowe energie

Nie ma jednej recepty na nowe źródła energii. Panele fotowoltaiczne do niedawna miały czas zwrotu inwestycji 20 lat; nowy raport „Nature" [4] mówi o czasie zwrotu 1 roku. Dla zapewnienia energii na potrzeby jednego gospodarstwa domowego (moc używana 3 kW maksimum), przy efektywności paneli 10%, potrzebne jest pokrycie nimi części dachu domku jednorodzinnego (przypominamy wartość stałej słonecznej 1340 W, ale jest to wartość energii przypadającej na $1m^2$ w kierunku prostopadłym i poza atmosferą).

Problemem paneli (i wiatraków) jest magazynowanie energii w okresie, kiedy słońce nie świeci i nie wieje wiatr. W Niemczech ten problem już jest rozumiany jako ogólnopaństwowy. Rozważa się najróżniejsze możliwości – od gigantycznych baterii akumulatorów litowych, przez zbiornik na wodór, do pompowania sztucznie wytworzonego metanu do podziemnych pieczar. (W Polsce zbiorniki rezerwowe gazu są, podobno, w żupach solnych w Inowrocławiu, ale gazu w nich starczy dla kraju jedynie na 48 godzin.)

Wspomniany raport „Nature" wymienia kilkanaście opcji „źródeł" energii, od elektrowni jądrowych, poprzez elektrownie wiatrowe na morzu, wodne na rzekach, do spalania śmieci i wytwarzania metanu z biomasy. Autorzy zakładają, że w różnych częściach świata będą się się rozwijały - niejako prawem „doboru naturalnego" różne technologie, przy czym w roku 2050 większość energii elektrycznej będzie wytwarzana z ogniw fotowoltaicznych. A główny koszt rachunku za prąd to będzie jego magazynowanie. Jednym z rozwiązań są technologie wodorowe: wytwarzanie i magazynowanie wodoru.

Ekonomia wodorowa

Wodór, mimo że jest głównym składnikiem Wszechświata (czytaj: gwiazd) na Ziemi nie występuje w stanie wolnym: zbyt lekki, aby pozostać w atmosferze. Na Ziemi jest związany w postaci wody (a także węglowodanów i wielu różnych minerałów). Istnieje kilka sposobów wytwarzania wodoru, np. przez pirolizę (tj. rozkład w wysokiej temperaturze) metanu $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$ (odpadem jest węgiel w postaci sadzy) lub poprzez reakcję reformingu $H_2O + CH_4 \rightarrow CO + 3H_2$ (też w wysokiej temperaturze).

Najczystszym ekologicznie (choć nie najtańszym) sposobem wytwarzania wodoru jest elektroliza wody. Ale ważną zaletą elektrolizy jest, że nie wymaga wielkich instalacji przemysłowych. Jak to opisał w 2002 roku noblista Jeremy Rifkin, pojawia się nowa ekonomia, wodorowa („Hydrogen Economy"): każde gospodarstwo domowe wytwarza wodór na własne potrzeby (z własnych paneli słonecznych lub wiatraków) i zużywa go w miarę potrzeb, np. do tankowania zbiornika w samochodzie.

I znów problemem nie będzie wytwarzanie, ale magazynowanie. Naukowcy pracują nad różnymi rozwiązaniami: wtłaczaniem do butli (mówi się o ciśnieniu 800 atm.), skraplaniem lub chemicznym wiązaniem w porowatych metalach, w postaci wodorków, np. MgH_2, Wadą tego ostatniego pomysłu są trudności w szybkim (i regulowanym) odzyskiwaniem wodoru, co jest potrzebne np. w samochodzie. Potrzebny też jest nowy „silnik".

Spalanie wodoru w silniku termicznym nie miałoby sensu: wydajność takiego procesu jest ograniczona prawem Carnota – różnicą temperatur między silnikiem a chłodnicą. W praktyce wydajność silników spalinowych sięga jakiś 35%. Sposobem na uzyskanie wydajności, teoretycznie nawet do 80%, są tzw. ogniwa paliwowe, choć powinny się nazywać raczej „wodorowe". Ogniwo wodo-

Ryc. 4a) Oryginalne ogniwo Volty z Muzeum w Como: stosik par krążków cynkowych i miedzianych, przełożonych filcem zwilżonym kwasem. b) To samo muzeum – dwa ogniwa „stosy" i bateria szklanek, połączonych elektrycznie (płytki cynkowe i miedziane). Foto: GK; Tempio Voltiano, Como.

eprasa.pl 02d20e786f

rowe to nic innego jak odwrócenie elektrolizy. A działa jak każda „bateria” Volty (lub Galvaniego – sami Włosi się o to spierają).

Ogniwo Volty

Pierwowzorem ogniwa paliwowego jest ogniwo Volty – dwa różne metale zanurzone w wodzie (z dodatkiem soli, kwasu, zasady[3]). Pierwsze ogniwo Volty (1799 r.) to był stosik monet – cynowych i srebrnych, ułożonych na przemian, a pomiędzy nimi (tj. między każdą parą) – filc nasączony rozcieńczonym kwasem. Volta próbował działania ogniwa kładąc pary monet na języku [6]. Zauważył, że jeśli na czubku języka kładł monetę cynową, czuł smak kwaśny.[4]

Volta słusznie stwierdził, że przyczyną powstawania prądu jest obecność dwóch różnych metali. A kierunek prądu określił od srebra (droższego) do cyny. Dziś wiemy, że jest to odwrotnie niż kierunek przepływu elektronów. Ale elektron został odkryty dopiero sto lat później.

To z różnic chemicznych między metalami, np. srebra i cyny wynika, że jeden z nich (cyna) łatwiej traci elektrony a inny trudniej. W fazie gazowej mówilibyśmy o energii jonizacji. Dla srebra wynosi ona 7,58 eV a dla cyny 7,34 eV. W fazie stałej wartości energii niezbędnej do wybicia elektronu (np. poprzez efekt fotoelektryczny) są niższe: 4,7 eV dla Ag i 4,3 eV dla Sn. (Wartości energii fotonów niezbędne do wybicia elektronów z metalu nazywamy, za Einsteinem, „pracą wyjścia”).

„Praca wyjścia” w ogniwie Volty – metalach zanurzonych w wodzie – jest jeszcze inna. Fizycy nie potrafią jeszcze wyliczyć, jakie napięcie powstanie między srebrem a cyną czy miedzią a cynkiem (to była druga wersja ogniwa Volty – w postaci blaszek zanurzonych w szklankach z kwasem, foto 4b).

Procesy zachodzące w ogniwie Volty (a właściwie Daniella, o tym za chwilę) to oddawanie elektronu przez atom cynku (i przechodzenie powstałego jonu Zn^+ do roztworu), przepływ elektronów zewnętrznym przewodem do miedzi, oraz na elektrodzie miedzianej - przyłączanie elektronu do jonu miedzi (osadza się metaliczna miedź z roztworu ubywa Cu^+).

$Zn \rightarrow Zn^+ + e$ (chemicy nazywają to utlenianiem)
$Cu^+ + e \rightarrow Cu$ (chemicy nazywają to redukcją)

Elektrodą ujemną w ogniwie Daniella jest cynk (fizycy nazywają taką elektrodę anodą) a dodatnią (katodą) jest miedź.

Szereg elektrochemiczny

Fizycy (ani chemicy) nie potrafią jeszcze wyliczyć, jakie napięcie powstanie między dwoma różnymi metalami. To nie tylko metal, ale również granica faz woda-metal, decydują o tym napięciu. Dopiero kilka miesięcy temu pojawiła się praca, próbująca wyliczyć pracę wyjścia elektronów z platyny zanurzonej w wodzie [7]. Nie jest to jeszcze wynik w pełni poprawny, ale zaczynamy rozumieć, że *interface* (warstwa graniczna) między wodą a metalem zasadniczo zmienia fizykę procesu.

Jeśli nie można policzyć, to trzeba zmierzyć, przyjmując jakiś punkt odniesienia. Punktem tym jest najlżejszy metal-niemetal, czyli wodór. Nie dysponujemy jednak wodorem w postaci elektrody; używa się więc elektrody z platyny (ale koniecznie pokrytej platyną koloidalną, tzw. czernią platynową). Platyna działa jak katalizator (o tym za chwilę), „zachęcając” wodór do oddawania elektronów (a przed tym, ułatwiając rozpad drobiny wodoru H_2 na atomy, czyli *dysocjację*).

Potencjały elektrochemiczne wynoszą[5]:

Li	Al.	Zn	Fe	Sn	H_2	Cu	Ag	Au	O_2*
-3,04	-1,66	-0,76	- 0,44	-0,13	0	+0,34	+0,80	+1,23	

* Reakcja ma przebieg $O_2 + 4H^+ + 4e^- \leftrightarrow 2H_2O$

Na początku szeregu Volty leży lit, z napięciem w stosunku do wodoru -3,05 V (dlatego bateria litowe dają największe napięcia). Cynk daje napięcie -0,76 V a miedź +0,34 V. Nie oznacza to jednak, że wkładając do roztworu soli lub kwasu elektrodę miedzianą i cynkową otrzymamy różnicę potencjałów 0,76+0,34=1,1 V. Byłoby tak, gdyby w ogniwie zachodziły reakcje jak w równaniu (1). Ogniwo powinno mieć dwa zbiorniki na elektrolit – jeden z jonami cynku, drugi z jonami miedzi. To jest właśnie „poprawka” wprowadzona do ogniwa Volty przez Johna Daniella (1836 r.): unika się bąbelkowania wodoru na katodzie.

Bez przegrody (i dwóch różnych elektrolitów) na elektrodzie dodatniej nie wydzieli się miedź, bo nie ma jonów Cu^+ w roztworze - wydzieli się wodór z wody. Użyteczne napięcie wyniesie więc jedynie 0,76 V, nawet jeśli jako katody użyjemy elektrody ze złota. Ale dla zamknięcia obwodu, potrzebna jest albo porowata przegroda (aby umożliwić przepływ jonów SO_4^{-2}) albo wręcz zewnętrzny „klucz jonowy” wypełniony żelem z KNO_3. Elektrochemia jest skomplikowaną dziedziną badań.

Ogniwo wodorowe

Ogniwo wodorowe (zwane też „paliwowym”) zostało zaproponowane w 1838 roku przez Wiliama Grove’a [8]. Dopiero przy okazji lotów Apollo znalazło prawdziwą realizację: i tlen i wodór były w zbiornikach rakiety,

[3] Ten dodatek wynika z niskiej przewodności elektrycznej czystej wody. Aby się o tym przekonać, wystarczy wrzucić bateryjkę „paluszek” do szklanki z wodą: bez dodatku soli nie obserwujemy bąbelków wodoru i tlenu. A sama bateria musi być nowa, bo do elektrolizy potrzeba napięcia 1,23 V.

[4] Dziś to doświadczenie można powtórzyć z eurocentami. Są one, co prawda, żelazne, ale pokryte miedzią. Zawijamy je do połowy aluminiową folią (jak pół-księżyc) i dotykamy końca języka: kwaśny smak (od jonów Al^{+3} przechodzących do śliny) czujemy jeszcze po zdjęciu monety z języka.

[5] Jest to wersja uproszczona: w rzeczywistości należy zdefiniować, jaka reakcja zachodzi. Inny jest np. potencjał elektrochemiczny, jeśli w roztworze są jony miedzi Cu^+, czyli reakcja ma przebieg $Cu^+ + e \rightarrow Cu$ (potencjał +0,52 V) a inny, gdy jony Cu^{2+} (reakcja $Cu^{2+} + 2e \rightarrow Cu$, potencjał +0,34 V).

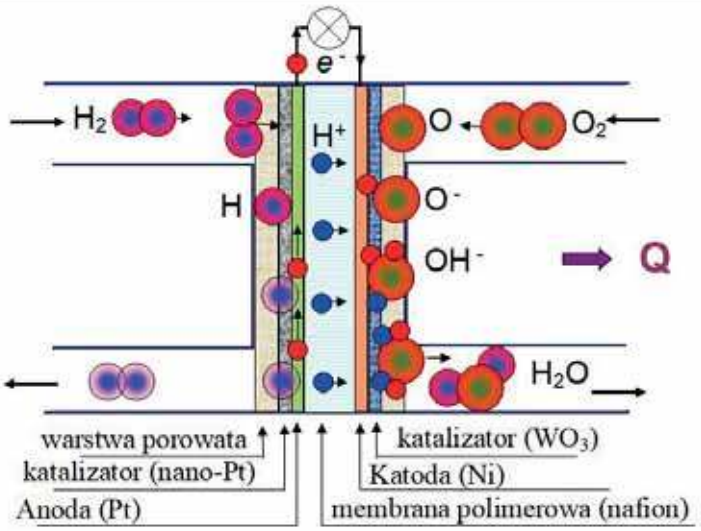
eprasa.pl 02d20e786f

ogniwo wytwarzało prąd elektryczny a powstała woda służyła do picia.

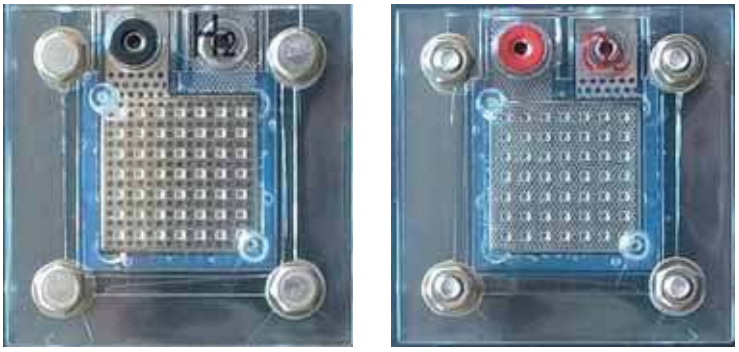
Ogniwo „paliwowe" jest odwróceniem elektrolizy wody. W elektrolizie, aby z wody wytworzyć H_2 i O_2, należy do elektrod przyłożyć napięcie elektryczne (minimum 1,23 V). W ogniwie dostarczając do dwóch elektrod gazowy tlen i wodór uzyskujemy na elektrodach użyteczne napięcie. Jest to niejako oczywiste, bo reakcja syntezy wody jest reakcją egzotermiczną.

To „oczywiste" nie jest jednak takie proste w realizacji: i wodór, i tlen są gazami, więc najpierw należy je rozpuścić w wodzie (ale są dość dobrze rozpuszczalne), później należy „zmusić" oba gazy, H_2 i O_2 do przejścia do postaci atomowej, H i O, czyli do *dysocjacji*. Potrzebne są ku temu odpowiednie katalizatory. W przypadku wodoru używa się platyny, w jej koloidalnej (nano-strukturalnej) postaci, zwanej przez chemików czernią platynową. W przypadku O_2 próbuje się różnych katalizatorów, tak metalicznych (Ni) jak tlenkowych (np. tlenków wolframu odpowiednio aktywowanych). Ogniwo ma jednak sporo ograniczeń – mocy, konstrukcji, materiałów (i ceny[6]).

Kluczem ogniwa paliwowego jest membrana oddzielająca dwa obszary. Jak w ogniwie Daniella obwód elektryczny jest zamknięty przez jony SO_4^{-2} dyfundujące przez przegrodę (lub inne jony w zewnętrznym kluczu jonowym), tak w ogniwie wodorowym obwód elektryczny jest zamknięty przez przepływ jonów H^+ z obszaru anody do katody: to tam zachodzi reakcja powstawania H_2O z H^+ i tlenu, zob. ryc. 5.



Ryc..5. Schemat (GK) ogniwa paliwowego. Z dwóch stron dopływa gazowy wodór i tlen. Przegroda rozdzielająca dwa obszary ma wielowarstwową strukturę: zewnętrzne porowate warstwy mają na celu „uwięzienie" gazu, tak aby wszedł on w kontakt z katalizatorem. Membrana z nafionu ma 20 μm Od strony wodorowej używa się platyny (warstwa rzędu 1 μm), od strony tlenowej próbuje się różnych technologii, jak Ni, nano-strukturalny WO_3, Se itd. Procesy od strony tlenowej są słabiej zrozumiane niż od strony wodorowej. Od strony wodorowej H_2 ulega dysocjacji na H, w kontakcie z katalizatorem traci elektron (ten płynie na drugą stronę ogniwa poprzez obwód zewnętrzny), proton H^+ dyfunduje w kierunku anody. Po stronie anody H^+ łączy się z O (lub OH i OH^-, dokładnie nie wiadomo) tworząc wodę. W postaci wyblakłych krążków pokazujemy, że wodór był, ale rozpadł się na e^- i na H^+.



Rys.6a) Strona H_2 ogniwa paliwowego z zabawkowego modelu samochodu "na wodę". Widoczny platynowy katalizator i perforacje prowadzące do membrany. b) strona O_2 – widoczna jest nieco inna konstrukcja. Foto AK.

Przepływ jonów H^+ (czyli „gołych" protonów, o średnicy ostatnio zmierzonej $0{,}86 \times 10^{-15}$ m) nie jest jednak procesem fizycznym, a raczej chemicznym. W specjalnym fluoryzowanym polimerze, z grupami kwasu sulfonowego, protony „skaczą" od cząsteczki do cząsteczki polimeru. Membrana więc izolować dwa katalizatory, nie przepuszczać wody ani gazów a transportować protony. Mimo wielu wysiłków, powszechnie używany pozostaje fluorowany polimer z grupą kwasu sulfonowego, tzw. nafion, o grubości 20 μm, zob. foto z mikroskopu elektronowego w Internecie [8].

Nie do końca rozumiemy tak chemię jak fizykę ogniwa wodorowego. Nie wiadomo, czy to grupa sulfonowa czy fluoryzowanie polimeru zapewnia transport H^+. Platyna jest droga. Nie wiadomo, gdzie traci się część napięcia elektrycznego. Do elektrolizy potrzeb 1,23 V a najwyższe napięcie pozyskane z ogniwa wodorowego do 1,0 V. Na razie technologowie nazywają tę stratę „potencjałem aktywacji". Ale raczej przypomina ona tzw. napięcie polaryzacji (0,6-0,8 V) w krzemowym ogniwie fotowoltaicznym [9].

Samochód na wodę

W pełni użyteczne samochody na „wodę" zostały skonstruowane już kilkanaście lat temu. Nadal brakuje jednak właściwej motywacji ekonomicznej (ropa naftowa jest wciąż tania) a technologie nie są do końca opracowane. Nafion jest drogi i niezbyt odporny na temperaturę (w procesie powstawania H_2O wydziela się ciepło) nie mówiąc o odporności całego ogniwa na mróz. Ale nafion to nie jedyna technologia możliwa.

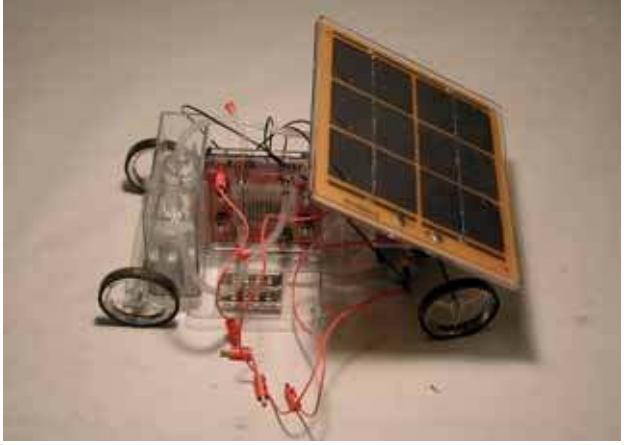
Zbiorniki na wodór zajmują cały bagażnik, podobnie jak baterie ołowiowe w samochodach dziś, w 2019, deklarowanych na targach w Szwajcarii jako elektryczne. Nie mówiąc, że brakuje stacji do tankowania wodoru. Najbardziej zaawansowane prace nad konstrukcją samochodu z ogniwami paliwowymi są prowadzone w Korei, Chinach i Japonii.

Potrzebni eksperci

Wspomniana prognoza światowej „produkcji" energii w 2050 roku zakłada, że węgla i ropy już nie ma: 80% zapotrzebowania światowego jest pokrywane z ogniw

[6] Analiza kosztów wskazuje, że dla zasilania samochodu osobowego koszt samego ogniwa jest porównywalny z obecnym kosztem wytworzenia całej „reszty" samochodu (karoserii, wnętrza, itd.).

eprasa.pl 02d20e786f



Ryc. 5. Zabawkowy samochód „na wodę" (firmy „Kosmos & Thames"). Najpierw wlewa się wodę (koniecznie destylowaną) do zbiornika z lewej strony, podłączając do ogniwa paliwowego (w środku) panel słoneczny (z prawej). Prąd powstający w panelu słonecznym dokonuje elektrolizy wody (ogniwo pracuje jako elektrolizer), a H_2 i O_2 trafiają do zbiorników (z lewej strony): zbiornik na H_2 jest dwukrotnie szerszy). Po wytworzeniu (gazowego) paliwa, przełącza się przewody, tak aby silnik samochodu (pod panelem) był zasilany prądem powstającym w ogniwie paliwowym. Oczywiście, w pełnym słońcu silnik może być zasilany bezpośrednio z panelu fotowoltaicznego (foto GK).

fotowoltaicznych. To z kolei rodzi problem magazynowania energii w czasie, kiedy słońce nie świeci, a energia elektryczna jest potrzebna. Rozważa się najróżniejsze pomysły, jak wytwarzanie (z CO_2 i H_2) sztucznego metanu, nowe zbiorniki do przepompowywania wody, a przede wszystkim technologie oparte o wodór. Pracujemy również [10] nad reaktorem termojądrowym, syntetyzującym hel z ciężkiego wodoru.

Bez wątpienia, potrzebne są nowe pomysły. I nowi specjaliści. Jacy? Nie wiadomo. Ale znajomość fizyki będzie kluczowa.

Artykuł powstał w ramach projektu EU H2020 „Fuel Cells HydroGen educational mOdel for schools" (FCHgo). Celem projektu jest przybliżenie, w edukacji szkolnej, problemów energii, środowiska i technologii wodorowych [11].

Prof. Grzegorz Karwasz
jest kierownikiem Zakładu Dydaktyki Fizyki UMK i ekspertem IAEA ONZ w tematykach energii termojądrowej

Dr Anna Kamińska
jest adiunktem w Akademii Pomorskiej w Słupsku, współtwórcą interaktywnych wystaw „Fizyka zabawek" (1997), współ-wykonawcą projektu UE „Physics is Fun" (2004)

Dr Andrzej Karbowski
jest adiunktem w ZDF UMK, koordynatorem pakietu doświadczeń z elektromagnetyzmu w projekcie UE LdV MOSEM (2009)

Mgr Tadeusz Bury
jest nauczycielem informatyki i techniki w IX LO w Gdyni i w ZS Szkół Energetycznych w Gdańsku oraz doradcą metodycznym w zakresie informatyki, zdobywcą wielu nagród (jako nauczyciel laureatów) w konkursach krajowych z informatyki

Mgr Katarzyna Wyborska,
absolwentka UMK, jest nauczycielem fizyki w Dąbrowie Biskupiej i Ośniszczewku, zdobywczynią II nagrody w ogólnopolskim konkursie „Postaw na Słońce" (2016)

LITERATURA

[1] G. Karwasz, K. Służewski, Ziemia pod pierzynka, czyli o naturalnym efekcie cieplarnianym, Foton, 121 (Lato 2013) 37-42. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2013/Cieplo1_2013.pdf
[2] https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases
[3] „Global Warming of 1.5ºC. Sumary fo Policymakers", IPCC, 2018 https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2018/07/SR15_SPM_version_stand_alone_LR.pdf
[4] E. Post et al. , Ecological Consequences of Sea-Ice Decline, Science 341 (2013), 519.
[5] D. Bogdanov et al., Radical transformation […], Nature Communications, 10 (2019) 1077.
[6] G. Karwasz and A. Karbowski, Na końcu języka (Volty), Foton 96 (2007) 34.
[7] S. Sarong and A. Groß, The electric double layer […], J. Chem. Phys. 114 (2018) 084705
[8] https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_cell
[9] G. Karwasz, Zjawisko fotoelektryczne (wewnętrzne), Na ścieżkach Fizyki Współczesnej, http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Wystawy_archiwum/z_omegi/statki2.html
[10] G. Karwasz, Słońce w (magnetycznym) koszyku, Głos Uczelni, UMK, 3/2017, 24. http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/Publikacje_2017/GK_Slonce_w_koszyku_2017.pdf
[11] FCHGo Project, https://fchgo.eu/
[12] http://dydaktyka.fizyka.umk.pl/nowa_strona/?q=node/837

This project has received funding from the Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking (JU) under grant agreement No 826246.
The JU receives support from the European Union's Horizon 2020 research and innovation programme and Italy, Denmark, Poland, Germany, Switzerland

Ryc. 7a) Płytka aluminiowa i miedziana, włożone do jabłka „dają" różnicę potencjałów (warsztaty Uniwersytetu Dziecięcego w Głogowie, 2011, foto Maria Karwasz). b) Miłe zaskoczenie, gdy z wodoru i tlenu można zasilić ogniwo paliwowe a z powstałego prądu mały wiatraczek (foto KW).

eprasa.pl 02d20e786f

Radon – zmierz to

Dariusz **Aksamit**

Czy uczniowie ostatnich klas szkół podstawowych są w stanie zbudować układ doświadczalny i dokonać za jego pomocą pomiarów stężenia promieniotwórczego gazu w powietrzu? Przez ostatni rok odpowiadaliśmy na to pytanie w praktyce, prowadząc projekt badawczy „Radon – zmierz to". Poniżej prezentujemy odpowiedź na to trudne pytanie. Prace odbywały się w ramach projektu edukacyjnego „Szkoła bliżej nauki"[1].

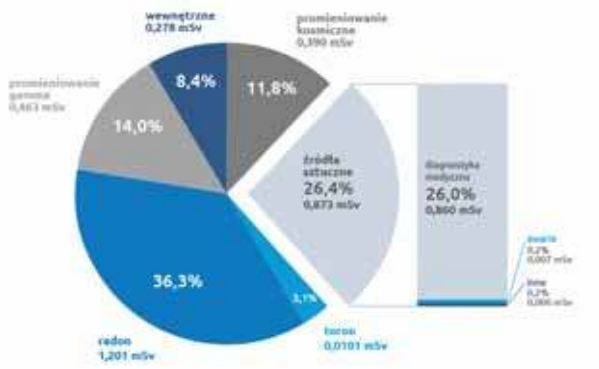
Problem radonu w Polsce i na świecie

Czym jest radon? I dlaczego zajmowaliśmy się właśnie nim? Radon to naturalny składnik środowiska obecny w powietrzu atmosferycznym. Nie jest go dużo, pod względem składu procentowego powietrza jest praktycznie nieistotny. Ale ma pewną istotną cechę, która go wyróżnia i nadaje mu znaczenie – jest promieniotwórczy! Co więcej, jest jedynym naturalnie występującym gazem promieniotwórczym. Powstaje z rozpadu radu, obecnego w skorupie ziemskiej, który z kolei powstaje z rozpadu równie naturalnie tam występującego toru i uranu.

Ot, ciekawostka, gdyby nie fakt, że właśnie oddychanie radonem ma największy udział w ekspozycji na promieniowanie jonizujące dla każdego z nas! Przyjrzyjmy się Ilustracji 1. Widzimy, że sumując dawkę, jaką otrzymujemy od promieniowania kosmicznego, promieniowania gamma z izotopów obecnych w glebie i materiałach budowlanych oraz w pożywieniu i nas samych, nadal łącznie jest to mniej niż otrzymujemy, oddychając. Warto też pamiętać, że dla większości z nas powoduje to większe narażenie na promieniowanie niż typowa diagnostyka obrazowa jak prześwietlenia rentgenowskie.

Jak dużo radonu jest w powietrzu? Jego stężenie wyrażamy w liczbie rozpadów promieniotwórczych, jakie zachodzą w każdej sekundzie w jednym metrze sześciennym powietrza – czyli w Bq/m^3 (bekerele na metr sześcienny). Średnio w polskich domach oddychamy powietrzem o stężeniu radonu około 50 Bq/m^3. WHO nie zaleca życia w miejscu o stężeniu przekraczających 200-300 Bq/m^3 ze względu na rosnące ryzyko zachorowania na nowotwory układu oddechowego.

Niestety, bywają miejsca, gdzie to stężenie jest znacznie podwyższone. Przyczyną może być specyficzna budowa geologiczna okolicy, rodzaj materiałów budowlanych, z których wykonany jest budynek, sposób wentylacji pomieszczeń, wysokość danego piętra…



Ilustracja 1. Udział procentowy różnych źródeł promieniowania w rocznej dawce efektywnej dla mieszkańca Polski. Źródło: Raport www.paa.gov.pl

Zadaniem uczniów realizujących projekt badawczy „Radon – zmierz to" było wykonanie pomiaru stężenia radonu w wybranych przez siebie miejscach, zapisując wszystkie istotne informacje na temat miejsca ekspozycji płytek. Po odczycie należało wyciągnąć wnioski, które z tych parametrów były najważniejsze (w czyim domu stężenie radonu okazało się największe?). Zanim omówimy pracę, którą wykonali uczniowie, przyjrzyjmy się, jak takie pomiary robi się w laboratorium.

Jak wyglądają profesjonalne pomiary?

W laboratorium dozymetrycznym (mierzącym dawki promieniowania jonizującego) stosuje się na co dzień plastikowe płytki z poliwęglanu (PADC – poliwęglan allilo diglikolowy). Właśnie z ich pomocą uczniowie prowadzili swoje pomiary w projekcie badawczym „Radon – zmierz to". Cząstki alfa pochodzące z radonu powodują uszkodzenia radiacyjne płytek. Uszkodzone miejsca możemy uwidocznić, wytrawiając płytki w roztworze stężonej zasady sodowej – tam, gdzie przeszła cząstka alfa trawienie zachodzi szybciej i pojawiają się wgłębienia. Pozostaje wtedy obejrzeć płytkę pod mikroskopem i policzyć, ile jest otworów na centymetr kwadratowy. Większa gęstość śladów oznacza, że ekspozycja płytki na radon była wyższa.

W Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej w Warszawie znajduje się system do automatycznej analizy płytek PADC – Politrack, widoczny na ilustracji 2. Układ wyposażony jest w trzy automatycznie sterowane silniki krokowe. Dwa służą do przesuwania stolika pomiarowego, umożliwiając przemieszczanie go w osiach poziomych.

[1] Projekt „Szkoła bliżej nauki" został przygotowany przez Centrum Nauki Kopernik w partnerstwie z 6 mazowieckimi samorządami (Warszawa, Otwock, Żyrardów, Kobyłka, Lesznowola, Grodzisk Mazowiecki). Uczestniczyło w nim blisko 2000 uczniów i uczennic oraz ponad 160 nauczycieli i nauczycielek z Warszawy i okolicznych gmin. Podstawowym celem było stworzenie w szkołach, na terenach objętych programem, warunków dla nauczania z wykorzystaniem elementów metody badawczej. Projekt był realizowany od września 2017 do sierpnia 2019 roku i został dofinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego.

Artykuł promocyjny

eprasa.pl 02d20e786f

Ilustracja 2. Układ doświadczalny w Centralnym Laboratorium Ochrony Radiologicznej – u góry z lewej termostat, po prawej mikroskop z przesuwnym stolikiem, z lewej na dole obraz spod mikroskopu.

Ilustracja 3. Zdjęcia szkolnego układu pomiarowego. U góry, z lewej strony – pojemnik na detektor, z prawej – płyta grzewcza z garnkiem do wytrawiania. Na dole, z lewej strony – szkolny mikroskop, z prawej – obraz spod mikroskopu uzyskany telefonem komórkowym.

Trzeci silnik zmienia położenie mikroskopu w pionie i pozwala automatycznie znajdować ostrość obrazu. W efekcie możemy wykonać kilkadziesiąt lub kilkaset zdjęć pojedynczej płytki w parę minut. Oprogramowanie od razu dokonuje automatycznej analizy obrazu – szybko otrzymujemy wynik i przydatne statystyki. Wytrawianie płytek w zasadzie sodowej odbywa się w automatycznym termostacie z cyfrową regulacją temperatury.

Pomiary w szkolnej rzeczywistości

Czy szóstoklasiści mogą dokonać takich pomiarów, nie mając zaawansowanej aparatury? Tak, mogą. Czasem trzeba trochę kreatywności – grunt, żeby osiągnąć cel. W tym przypadku najważniejsze, żeby trawienie płytek odbyło się w określonej, stałej temperaturze. Ale to, czy ktoś będzie stał z termometrem i pilnował temperatury w garnku (i regulował ją, np. odkrywając lub przykrywając garnek przykrywką), czy będzie miał automatyczny system obiegu wody i regulator temperatury ze sprzężeniem zwrotnym to tylko kwestie techniczne, związane z wygodą i możliwościami.

Poniżej widać jak uczniowie poradzili sobie z zagadnieniem. Najpierw trzeba było dokonać ekspozycji płytek pomiarowych PADC przez trzy miesiące – u siebie w domu lub w szkole. Żeby chronić płytki przed pyłami i zabrudzeniami oraz pochodnymi rozpadu radonu (patrz Ilustracja 7), należało przygotować obudowę – tu posłużyły styropianowe kubki, gazy i gumki recepturki. Trawienie płytek odbyło się w wspomnianym garnku (w zlewce w łaźni wodnej) ustawionym na kuchennej płycie grzewczej – przez 100 minut trzeba było utrzymać temperaturę 90°C. Odczyty – z pomocą szkolnego mikroskopu z pracowni biologicznej. „Cyfryzacja" obrazu spod mikroskopu polegała na zrobieniu zdjęcia smartfonem przyłożonym do okularu. I gotowe. Na zdjęciach płytek widać kropki – należy je policzyć.

Przez trzy miesiące (gdy detektory były eksponowane na stężenie radonu) uczniowie mieli czas na przygotowanie się do tej fazy. Dostali ode mnie przykładowe płytki z laboratorium – znaliśmy stężenie radonu, na jakie były eksponowane. Płytki posłużyły uczniom do testów trawienia i do nauki analizy obrazu w programie *ImageJ*.

Wyniki naszego projektu

Na co dzień, w laboratorium na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej mam dostęp do profesjonalnego sprzętu. Pomysł przeprowadzenia procedury w warunkach domowych brzmiał sensownie – ale czy to na pewno takie proste? Pamiętam, jak na etapie testowania pomysłu z bijącym sercem wyjąłem płytkę z garnka, włożyłem ją pod prosty mikroskop – uff, widać! Pierwszy kamień milowy osiągnięty. Ale czy uczniom ze szkół podstawowych też się to uda?

We wrześniu 2018 roku już wiedziałem, że mam pod skrzydłami 474 uczniów z 21 klas w 9 szkołach. Przekazałem im prawie tysiąc płytek PADC. Uczniowie przez jesień i zimę eksponowali je na radon w różnych miejscach – w każdym z nich umieszczając dwie płytki. Jedną odczytywali sami, drugą odsyłali do mnie, do laboratorium. Dzięki temu mogliśmy stwierdzić, na ile miarodajne są uczniowskie wyniki.

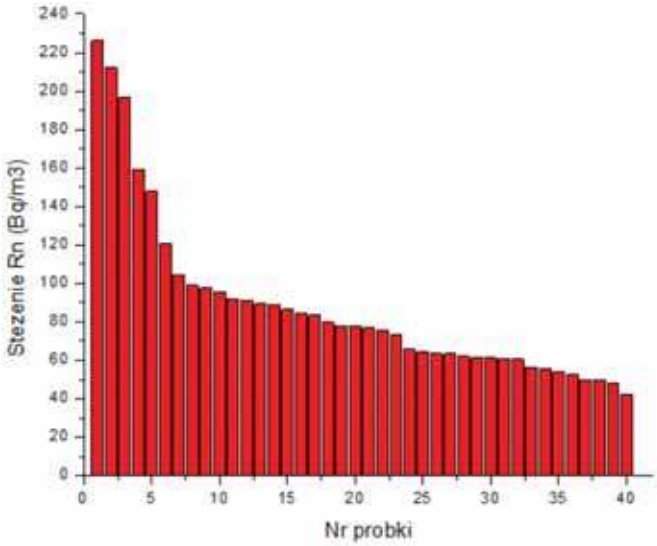
Jest czerwiec 2019 roku i jestem pod wrażeniem. Myślałem, że sukcesem będzie, jeśli niektórym uda się cokolwiek (!) zaobserwować. Ilustracja 5 pokazuje, na przykładzie SP nr 81 z Warszawy, że uczniowie byli w stanie poprawnie wytrawić i odczytać płytki. A ponieważ płytki testowe widoczne na zdjęciu były wcześniej poddane w laboratorium ekspozycji na znane stężenia radonu – uczniowie mogli zrobić własną krzywą kalibracyjną! Dzięki niej obliczyli stężenie radonu na podstawie zmierzonej na obrazie gęstości śladów.

Uczniowie zatem otrzymali nie tylko wynik jakościowy, że stężenie w różnych miejscach się zmienia. Mają też wynik ilościowy – na podstawie kalibracji płytek eksponowanych na znane stężenie przeliczyli gęstość otworów w płytkach ze swoich domów, otrzymując wynik poprawny nie tylko co do rzędu wielkości, ale z dokładnością do kilkunastu-kilkudziesięciu procent zgodny z pomiarami laboratoryjnymi (patrz Ilustracja 6).

Uważam ten projekt za trudny, ale pouczający przykład, że uczniowie są w stanie realizować pod opieką zaangażowanych nauczycieli prawdziwe projekty badawcze. Ostateczne wyniki czekają na publikację w czasopiśmie naukowym!

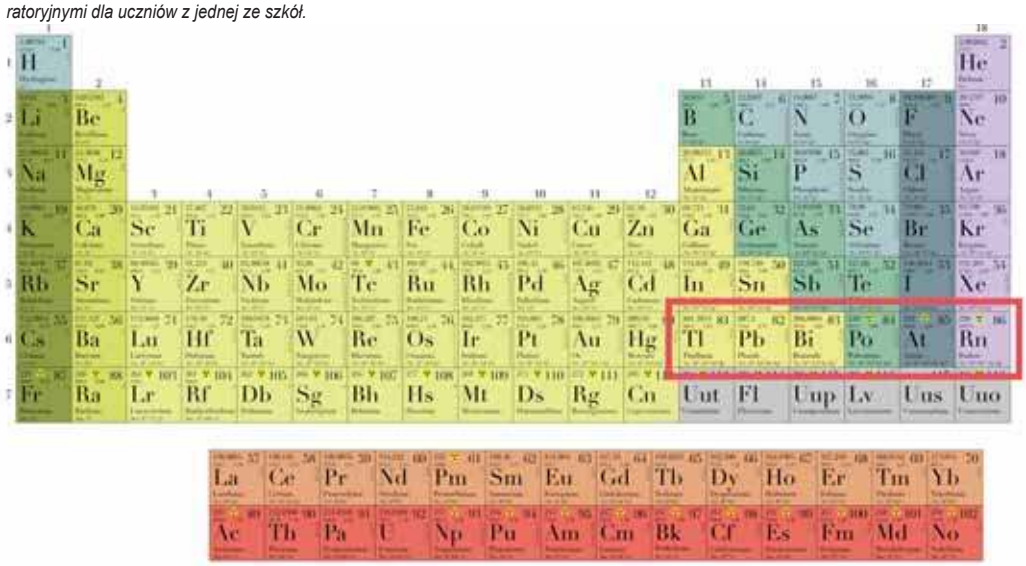
eprasa.pl 02d20e786f

Ilustracja 4. Zdjęcia płytek kalibracyjnych uzyskanych przez jedną ze szkół w projekcie.

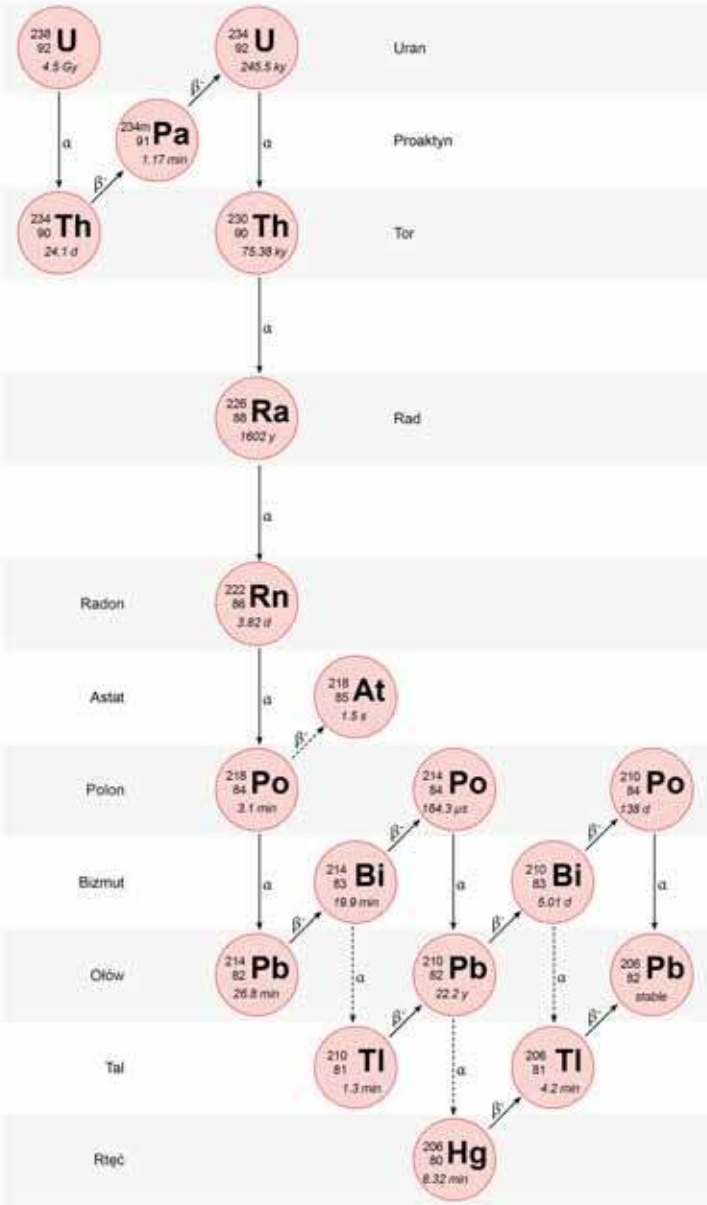


Ilustracja 5. Wyniki otrzymane przez uczniów z SP nr 81 w Warszawie. Z wykresu wynika uspokajającą informacja – maksymalne zmierzone stężenie wyniosło 226 Bq/m3, co nie przekracza zalecanego przez WHO progu (300 Bq/m3), a większość pomiarów oscyluje koło średniej dla Polski (czyli 50 Bq/m3).

Ilustracja 6. Różnice w odczytanych gęstościach śladów na płytce a pomiarami laboratoryjnymi dla uczniów z jednej ze szkół.



Ilustracja 7. Radon i pochodne jego rozpadu w układzie okresowym.



Ilustracja 8. Łańcuch rozpadu radonu.

Opiekun projektu Dariusz Aksamit – fizyk medyczny, absolwent Politechniki Warszawskiej, popularyzator nauki w mediach, promuje krytyczne myślenie i walczy z pseudonauką https://www.facebook.com/AksamitD www.aksamit.info.

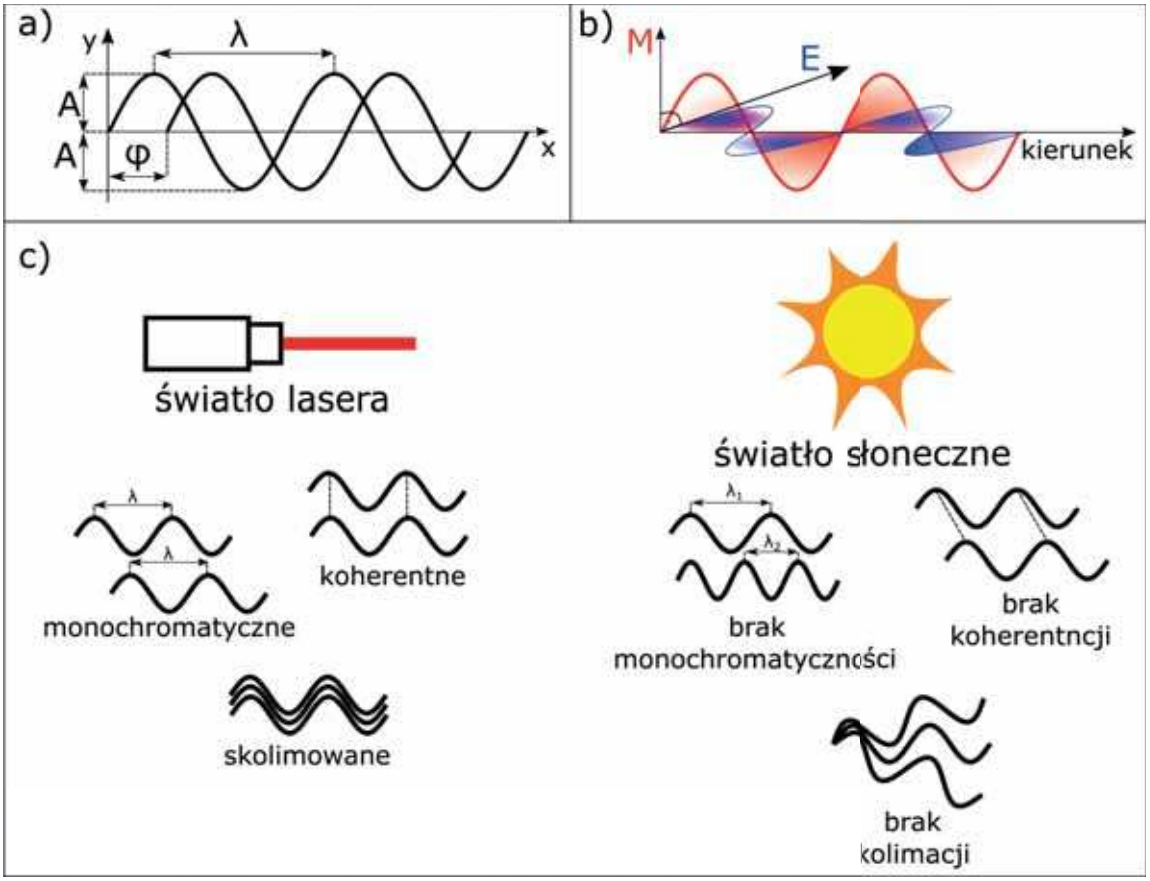
eprasa.pl 02d20e786f

Oświeć mnie,
czyli jak oddziałuje światło z materią

Łukasz **Haryński**, Katarzyna **Grochowska**

Fala elektromagnetyczna jest rozchodzeniem się drgań pola elektromagnetycznego w przestrzeni. W odróżnieniu od fal mechanicznych, których propagacja polega na przekazywaniu drgań cząstek ośrodka, może rozchodzić się w próżni. Do opisu zjawisk związanych z ruchem falowym wykorzystuje się m. in.: długość fali λ – odległość dwóch odpowiadających sobie punktów zgodnych w fazie, amplitudę A – wychylenie z położenia równowagi, częstotliwość kątową ω – szybkość zmiany fazy w czasie, okres T – czas jednego drgania, przesunięcie fazowe φ – gdy jedna fala jest w fazie 0, druga ma pewną inną fazę α, odległość jaka je dzieli to przesunięcie fazowe (Rysunek 1. a). Światło jest falą elektromagnetyczną, której składowa pola E jest prostopadła do składowej pola magnetycznego M (Rysunek 1. b). Może ono zostać m.in. odbite, rozproszone czy też częściowo pochłonięte kiedy na swojej drodze napotka przeszkodę.

Na charakter oddziaływań światła z materią ma wpływ wiele czynników, jak energia czy jego polaryzacja. Energia padającego światła zależy od jego częstotliwości. Mniejsza długość fali (większa częstotliwość) niesie ze sobą większą energię. Polaryzacja światła określa kierunek drgań pola elektrycznego. Polaryzacja liniowa ma miejsce gdy pole E drga wzdłuż linii prostej, tzn. gdy składowe E_x i E_y wykonują drgania zgodne w fazie w danym kierunku, ale o różnej amplitudzie. W przypadku drgań o różnych fazach i takiej samej amplitudzie występuje polaryzacja kołowa, lub eliptyczna, w zależności czy wektor pola E porusza się po okręgu, czy po elipsie. Światło spolaryzowane całkowicie charakteryzuje jeden kierunek drgań pola E. Promieniowanie spolaryzowane niecałkowicie można opisać jako zespół fal o różnej polaryzacji. Promieniowanie laserowe jest przykładem światła o wysokiej polaryzacji, którego zespół fal charakteryzuje: monochromatyczność – jedna długość fali, kolimacja – zgodność w fazie, oraz koherentność – równoległość. Porównanie



Rysunek 1. a) Krzywa funkcji falowej, gdzie: A – amplituda, λ – długość fali, φ – przesunięcie fazowe, b) składowe fali elektromagnetycznej, c) porównanie właściwości światła laserowego i światła słonecznego.

eprasa.pl 02d20e786f

właściwości światła laserowego i światła słonecznego przedstawiono na rysunku 1. c.

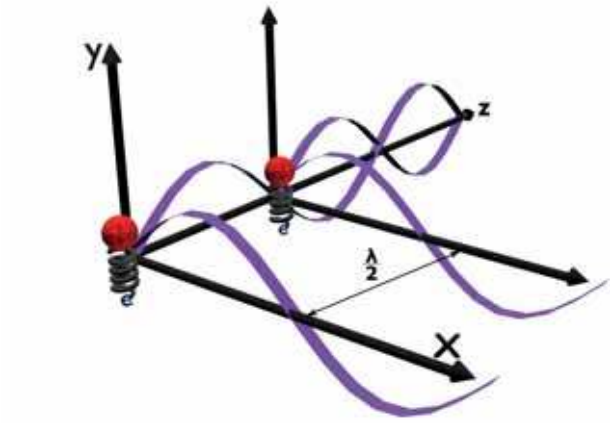
Model oscylatora do opisu oddziaływania światła z materią

Podczas rozważań dotyczących oddziaływania światła z materią należy zwrócić uwagę na model atomu. Powszechnie znany model atomu Bohra, z masywnym, dodatnio naładowanym jądrem oraz krążącymi po orbitach kołowych elektronami jest w tym przypadku błędny. Właściwy model podaje teoria mechaniki falowej, w której atom opisywany jest jako oscylator, którego elektrony utrzymywane są na dodatnio naładowanym jądrze przy pomocy sprężyn. Padające światło, tj. drgające pole elektryczne, wprowadza w drgania elektrony atomu. Pobudzony elektron drga w taki sam sposób, jak pobudzające go promieniowanie. Staje się źródłem nowej fali elektromagnetycznej, a powstała fala ma taką samą częstotliwość jak pole źródła. Takie zjawisko nazywa się rozpraszaniem. Tak więc, jeżeli skierujemy światło lasera na powierzchnię zwierciadła w taki sposób, że odbije się ono pod pewnym kątem, to obserwowana wiązka odbita nie jest dosłownie „odbitą" wiązką padającego światła, tylko nową falą emitowaną przez materię zwierciadła (o tej samej częstotliwości).

Interferencja

Zastosowanie modelu oscylatora pozwala na wyjaśnienie zjawisk zachodzących podczas oddziaływania światła z materią. Na rysunku 2 przedstawiono model dwóch oscylatorów leżących na osi z, wykonujących takie same, zgodne w fazie drgania w kierunku osi y.

Oscylatory zachowują się jak drgające elektrony w atomach, które są pobudzane drganiami pola E, czyli składowej światła. Rozważmy jak zmienia się natężenie pola E wytworzone przez pobudzone do drgań oscylatory w różnych kierunkach (natężenie pola jest równe kwadratowi jego wartości). W kierunku z oscylatory są odsunięte względem siebie o połowę długości fali, stąd ich różnica faz wynosi ½ λ. Oznacza to, że fala pierwszego oscylatora musi przebyć drogę równą połowie swojej długości fali, zanim dotrze do drugiego. Za drugim oscylatorem wejdą w interakcję dwie fale pochodzące od pierwszego i drugiego oscylatora. Ponieważ wartość pola E pierwszego oscylatora wyprzedza wartość drugiego dokładnie o połowę drgania, zatem każdy punkt na osi z, za drugim oscylatorem odczuwa jednocześnie dwa pola o przeciwnych wartościach. Stąd w kierunku z natężenie pola wynosi 0.



Rysunek 2. Fale emitowane przez dwa zgodne w fazie oscylatory odległe o pół długości fali.

Przeciwny efekt ma miejsce w kierunku x. Fale powstałe w wyniku drgania obu oscylatorów są zgodne w fazie, ponieważ mają wspólny początek. Natężenie pola w tym kierunku jest cztery razy większe od natężenia każdego z oscylatorów. Istnieją oczywiście inne kierunki i inne warunki drgania oscylatorów. Przy kącie pośrednim – 30° natężenie promieniowania jest równe natężeniu dwóch oscylatorów. Ponadto, gdyby zmienić fazę początkową drgań któregoś oscylatora o połowę długości fali, wówczas natężenie w kierunku z wynosiłoby 4, a w kierunku x 0. Jeżeli w danym miejscu w przestrzeni oddziałują dwie fale, to zjawisko powstawania z nich nowej fali w wyniku ich nałożenia nosi nazwę interferencji.

Dyfrakcja

W poprzednim przykładzie pokazano istotę dodawania amplitud fal. W układzie dwóch oscylatorów uzyskano duże natężenie promieniowania jedynie w kierunku x (co jest równoznaczne ze stwierdzeniem, że dla kąta $\theta = 0°$). W kolejnym przykładzie rozważany będzie układ składający się z wielu oscylatorów. Konstruowanie takich urządzeń ma na celu uzyskanie dodatkowej intensywnej wiązki światła pod pewnym kątem.

Na rysunku 3 przedstawiono układ n oscylatorów odległych od siebie o d. Wielkość Δ, jest nadwyżką drogi jaką pokonuje fala ostatniego oscylatora względem pierwszego. Iloraz Δ/λ jest równy ilości długości fal na dystansie Δ, a z kolei $2\pi\Delta/\lambda$ to przesunięcie fazowe między oscylatorami, wynikające z różnicy odległości. Biorąc pod uwagę fazę własną poszczególnych oscylatorów α, całkowite przesunięcie fazowe między skrajnymi oscylatorami wynosi:

$$\varphi = \alpha + 2\pi\frac{\Delta}{\lambda} \quad . \tag{1}$$

Zakładając, że wszystkie oscylatory wykonują drgania zgodne w fazie ($\alpha = 0$):

$$\varphi = 2\pi\frac{\Delta}{\lambda} \quad . \tag{2}$$

Na podstawie funkcji trygonometrycznej, z Rysunku 3 można wyprowadzić:

$$sin\theta = \frac{\Delta}{nd} \quad , \tag{3}$$

stąd:

$$\Delta = ndsin\theta. \tag{4}$$

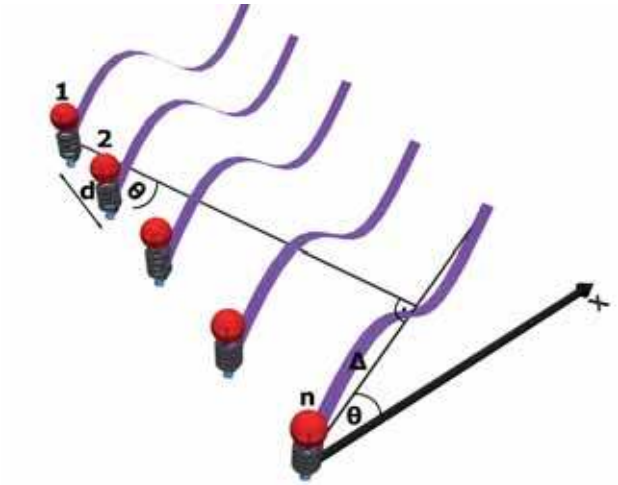
Wstawiając Δ do wzoru na φ:

$$\varphi = 2\pi\frac{ndsin\theta}{\lambda} \quad . \tag{5}$$

Załóżmy, że przesunięcie fazowe między pierwszym i ostatnim oscylatorem wynosi $\varphi = 2\pi$ (odległość między sąsiednimi oscylatorami jest znacznie mniejsza od długości fali):

$$2\pi = 2\pi\frac{ndsin\theta}{\lambda} \quad , \tag{6}$$

eprasa.pl 02d20e786f



Rysunek 3. Fale emitowane przez układ n zgodnych w fazie oscylatorów pod kątem.

otrzymujemy:

$$\lambda = nd\sin\theta. \quad (7)$$

W takim układzie fazy drgania wszystkich oscylatorów (nd) są równomiernie rozłożone od 0 do 360°, czyli o jedną długość fali (λ). Dodawanie amplitud takiego układu przedstawiono na rysunku 4a. Funkcje falowe znoszą się, brak intensywnej wiązki w innym kierunku poza $\theta = 0°$.

Pozostaje pytanie jak dobrać parametry układu wielu oscylatorów, aby uzyskać duże natężenie promieniowania pod pewnym kątem θ. Wartość funkcji okresowej po przesunięciu o jeden cykl drgań daje zawsze tę samą wartość. Zatem gdy przesunięcie fazowe między sąsiednimi oscylatorami wynosi całkowitą wielokrotność długości fali: 2π, 4π, 6π itd., wówczas wszystkie oscylatory są zgodne w fazie. Tak więc, warunkiem jest przesunięcie fazowe między sąsiednimi oscylatorami $\varphi = 2\pi mn$, gdzie m jest liczbą całkowitą. Wstawiając φ do wzoru 5 otrzymamy

$$m\lambda = d\sin\theta. \quad (8)$$

Drgania poszczególnych oscylatorów (d) są przesunięte względem siebie o 360°. Dodawanie amplitud w takim układzie przedstawiono na rysunku 4b. Drgania są zgodnie w fazie. Układ charakteryzuje się wysokim natężeniem w różnych kierunkach.

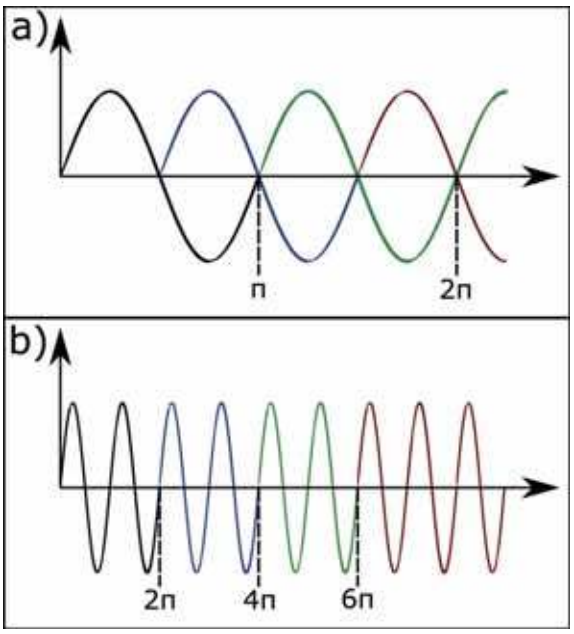
Omówiony układ stanowi przykład zmiany kierunku rozchodzenia się fali, czyli dyfrakcji. Znajduje zastosowanie w siatkach dyfrakcyjnych – urządzeniach wykonanych z materiału przezroczystego (np. szkła) z precyzyjnie wykonanymi nacięciami. Szczeliny między nacięciami stają się nowymi źródłami światła. Można zatem traktować każdą szczelinę jako nowe źródło światła, czyli jak oscylator. Siatka dyfrakcyjna może pozwolić na rozdzielenie fal o różnych długościach (kąt ugiętej wiązki θ zależy od długości fali λ.

Załamanie światła

Wiadomo już w jaki sposób światło oddziałuje z elektronami atomów oraz jakim zjawiskom podlega światła, tj. dyfrakcja oraz interferencja. Jednakże różne ośrodki: próżnia, atmosfera, woda oraz różne materiały: szkło, stal, drewno oddziałują ze światłem w inny sposób. Ośrodkiem, w którym światło rozchodzi się najłatwiej (najszybciej) jest próżnia. W sensie technicznym, próżnię definiuje się jako gaz pod bardzo niskim ciśnieniem. Cząsteczki gazu znajdują się w nieustannym ruchu, uderzając o ograniczającą je powierzchnię. Działa więc na nią siła. Im mniej cząsteczek gazu, tym mniejsza siła (ciśnienie), a próżnia większa. Jak już wspomniano, światło może rozchodzić się bez ośrodka materialnego. Szybkość światła w próżni c wynosi w przybliżeniu 300 tysięcy kilometrów na sekundę. Światło ulega ugięciu na granicy dwóch różnych ośrodków oraz w różnych ośrodkach rozchodzi się z różną szybkością.

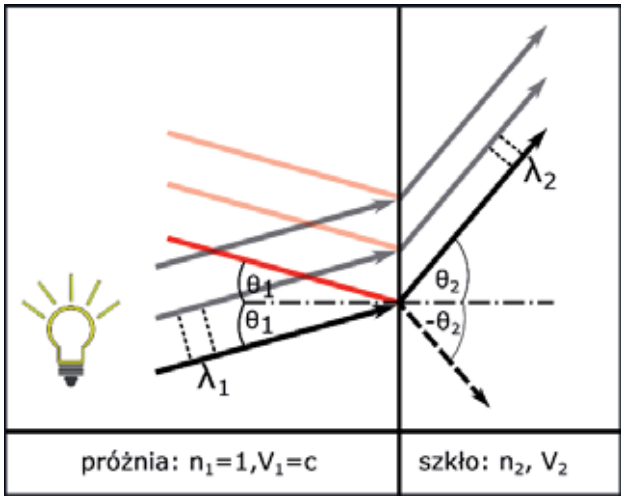
Na rysunku 5 przedstawiono źródło światła umieszczone w próżni w taki sposób, że światło przebywa pewną drogę w próżni, następnie trafia do ośrodka materialnego – szkła. Światło pokonuje odcinek w próżni z szybkością c. Po przejściu do szkła, światło „porusza" jego elektronami i stają się one nowym źródłem fali. Całkowite pole elektryczne po stronie próżni jest równe polu elektrycznemu wytwarzanemu przez źródło, natomiast wewnątrz szkła oddziałuje pole elektryczne źródła i pole wytworzone przez wszystkie pobudzone do drgań elektrony.

Szybkość światła po przejściu do drugiego ośrodka ulega zmniejszeniu ze względu na powstanie nowej fali, która cofa jej fazę o pewną wartość. Elektron znajdujący się na granicy ośrodków wykonuje drgania zgodnie z drganiami pola źródła i wytwarza falę o takiej samej częstotliwości. Tak więc obie fale na granicy tych ośrodków mają tę samą częstość. Grzbiety fal muszą leżeć w takich samych odstępach na granicy obu ośrodków, a ponieważ światło rozchodzi się w tych ośrodkach z różną szybkością, fala zmienia swoją długość fali λ i ulega załamaniu. Długość fali jest równa szybkości fali podzielonej przez jej częstotliwość; dla próżni wynosi:



Rysunek 4. Wynik dodawania amplitud czterech oscylatorów: a) gdy przesunięcie fazowe między pierwszym, a ostatnim wynosi 2π, b) gdy przesunięcie fazowe między sąsiednimi oscylatorami wynosi 2.

eprasa.pl 02d20e786f



Rysunek 5. Załamanie światła. Kolorem czarnym oznaczono wiązkę promieniowanie źródła oraz ugiętą, kolorem czerwonym wiązkę odbitą.

$$\lambda_0 = \frac{2\pi c}{\omega}, \tag{9}$$

dla gazu: $$\lambda_1 = \frac{2\pi \frac{c}{n}}{\omega}, \tag{10}$$

gdzie n to jest współczynnik załamania światła.

Z równania 10 wynika, że wraz ze wzrostem wartości n zmniejsza się długość fali promieniowania.

Prawo opisujące zmianę kierunku rozchodzenia promieniowania elektromagnetycznego podczas przejścia między dwoma ośrodkami o różnych współczynnikach załamania światła opisuje prawo Snellusa:

$$n_1 sin\theta_1 = n_2 sin\theta_2.$$

Dyspersja

Im współczynnik załamania światła danego ośrodka jest bliższy 1, tym jest bardziej przezroczysty dla światła (tzn. światło rozchodzi się podobnie jak w próżni). Współczynnik załamania światła jest proporcjonalny do ilości materii w danym ośrodku oraz odwrotnie proporcjonalny do częstości padającego promieniowania. Oznacza to, że n danego ośrodka jest różne w zależności od tego jaka jest długość padającego światła. Dzięki tej właściwości możemy „rozszczepić" białe światło na inne kolory przy pomocy pryzmatu, lub odpowiedniego kryształu. Dyspersję światła w kroplach wody można zaobserwować jako tęczę.

Wspomniana zależność może stanowić problem w uzyskaniu odpowiedniej ostrości w mikroskopii świetlnej (odbiciowej). Soczewki ogniskują światło o różnej długości fali w różnej odległości. Jest to uznawane za wadę soczewek i nosi nazwę aberracji chromatycznej. Jeżeli różne długości fali światła nie zostaną zogniskowane odpowiednio blisko siebie, uzyskany obraz będzie nieostry.

Odbicie

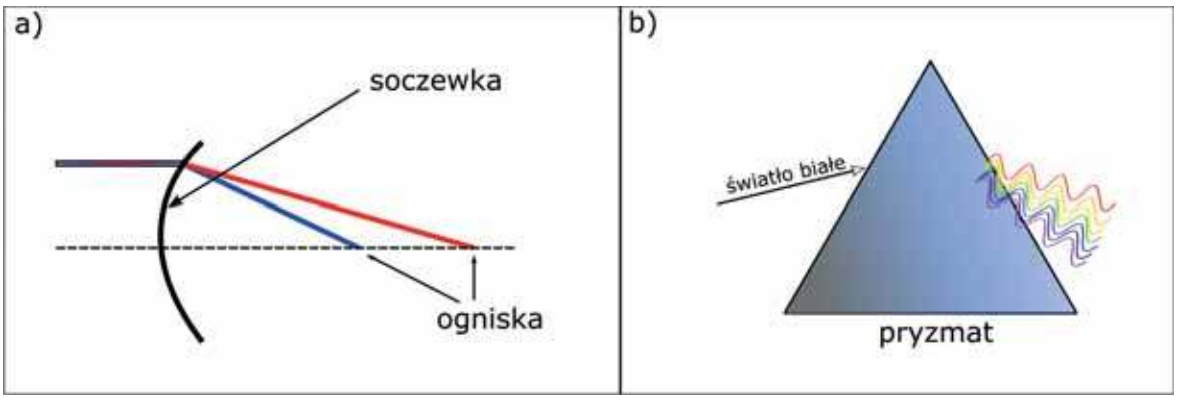
Procesowi ugięcia światła towarzyszy także inne zjawisko. Ruch elektronów wytwarza dodatkowe pole elektryczne w kierunku źródła. Takie światło obserwujemy jako odbite (czerwone linie na rysunku 5). Co ciekawe, tak odbite światło nie pochodzi wyłącznie z powierzchni, lecz z całej objętości. Na granicy ośrodków o różnych współczynnikach załamania światła część padającej wiązki może być emitowana z powrotem, a część może przejść przez ośrodek pod zmienionym kątem. Udział poszczególnych procesów zależy od kąta padania promieniowania i różnicy współczynników załamania światła ośrodków.

Na charakter odbicia światła od powierzchni ma także topografia powierzchni. Światło odbite od chropowatych powierzchni promieniuje w różnych kierunkach. Z kolei gładkie powierzchnie odbijają światło lustrzanie. Ma tutaj wpływ także absorpcja. Energia wypromieniowana może być zmniejszona o energię zaabsorbowaną.

Przezroczystość materiałów

Współczynnik załamania światła zależy także od innych wielkości, m.in. od przenikalności elektrycznej ε i przenikalności magnetycznej μ. Ośrodki oraz materiały charakteryzujące się ujemną wartością jednej z tych wielkości są nieprzezroczyste (dla danej długości fali). Niektóre metale, np. złoto i srebro charakteryzują się ujemną wartością ε dla światła widzialnego. Patrząc na nie widzimy jedynie połysk, który z kolei jest efektem innego zjawiska. Ośrodki transparentne takie jak powietrze, woda, szkło mają dodatnie wartości ε i μ oraz wartość współczynnika załamania światła zbliżoną do 1.

Ciekawą grupę materiałów stanowią metamateriały. Mają obie wartości ε i μ ujemne, stąd wartość ich współ-



Rysunek 6. (a) Aberracja chromatyczna soczewki (b) rozczepienie światła białego przy przejściu przez pryzmat.

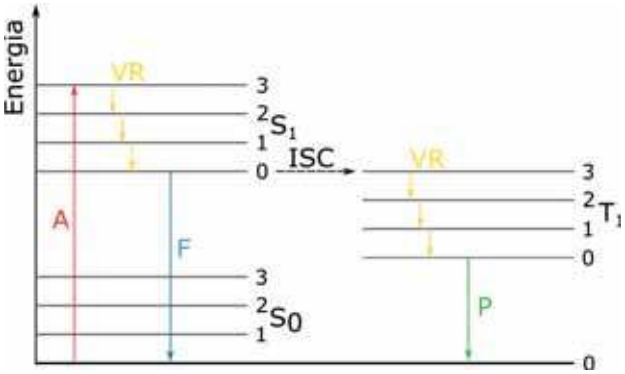
eprasa.pl 02d20e786f

czynnika załamania światła jest mniejsza od zera. W konsekwencji wiązka padającego światła ulega załamaniu pod ujemnym kątem. Wiązkę światła ugiętą pod ujemnym kątem (-θ) przedstawiono linią przerywaną na rysunku 5.

Absorpcja

Pierwszym etapem rozpraszania światła jest absorpcja padającego promieniowania. Polega ona na pochłonięciu kwantu energii padającego promieniowania elektromagnetycznego (fotonu) przez elektron i przeniesieniu go na wyższy poziom energetyczny. Proces przejścia elektronu na wyższy poziom nosi nazwę wzbudzenia. Zdolność materii do pochłaniania promieniowania zależy od długości fali oraz natury materii (struktury atomowej). Foton o energii mniejszej od różnicy między dwoma poziomami energetycznymi nie może zostać zaabsorbowany. Wyjątek może stanowić koherentna absorpcja, np. dwóch fotonów. Ma miejsce w sytuacji gdy dwa fotony mają energię równą dokładnie połowie różnicy między poziomami. Elektron znajdujący się na wyższym poziomie energetycznym powraca na niższy poziom (w tym procesie zwykle bierze udział cała powłoka elektronowa, lub nawet wszystkie elektrony molekuły). Proces nosi nazwę relaksacji. Nadwyżka energii jaką zyskał elektron podczas przejścia, zgodnie z zasadą zachowania energii, może zostać zamieniona na drgania cząsteczek czy może być przekazana do otoczenia.

Wybrane procesy związane z absorpcją i emisją fotonu przedstawiono schematycznie w postaci diagramu Jabłońskiego na rysunku 7. Absorpcja promieniowania o odpowiedniej energii powoduje wzbudzenie ze stanu singletowego podstawowego S_o do stanu singletowego wzbudzonego S_2. Warto zaznaczyć, że w obrębie poszczególnych stanów (S_o, S_1, itd.) możliwe są także do obsadzenia stany wibracyjne (0, 1, 2, itd.). W tym przypadku absorpcja spowodowała wzbudzenie do wzbudzonego stanu wibracyjnego S_1. Następnym procesem jest relaksacja wibracyjna (VR, ang. *vibrational relaxation*) ze wzbudzonego stanu wibracyjnego S_1 do podstawowego stanu wibracyjnego S_1. Podczas tego przejścia następuje przekazanie energii do otoczenia. W materiałach krystalicznych elektron przekazuje nadmiar energii sieci krystalicznej, która zamienia ją w drgania. Innym przykładem może być przekazanie nadmiaru energii cząsteczkom rozpuszczalnika, które zwiększają swoją energię kinetyczną. W kolejnym etapie cząsteczka może powrócić ze stanu wzbudzonego S_1 do stanu podstawowego S_o, emitując nadmiar energii w postaci fotonu o energii równej różnicy między poziomami. Proces nosi nazwę fluorescencji (F, ang. *fluorescence*). Konkurencyjnym procesem dla fluorescencji jest przejście międzysystemowe (ISC, ang. *intersystem crossing*) ze stanu singletowego S_1 do stanu trypletowego T_1. Prawdopodobieństwo takiego przejścia jest znacznie mniejsze od przejścia między stanami singletowymi. Po takim przejściu cząsteczka traci energię podczas relaksacji wibracyjnej. W kolejnym etapie następuje powrót cząsteczki do stanu podstawowego z emisją fotonu o energii równej różnicy między poziomami. Proces nosi nazwę fosforescencji (P, ang. *phosphorescence*). Fosforescencja jest znacznie wolniejszym procesem od fluorescencji.



Rysunek 7. Diagram Jabłońskiego dla procesów: absorpcji (A), relaksacji wibracyjnej (VR), fluorescencji (F) oraz fosforescencji (P).

Podsumowując, światło oddziałuje z materią wprowadzając w drgania jej elektrony. Skutkiem tego są m.in.: załamanie, dyspersja, odbicie czy absorpcja. Dzięki wykorzystaniu modelu oscylatora możliwy jest opis tych zjawisk zarówno w sposób jakościowy, jak i ilościowy. Interakcja promieniowania z materią zależy od właściwości padającego promieniowania oraz ośrodka. Znajomość współczynnika załamania światła oraz różnic między poszczególnymi stanami energetycznymi pozwala przewidzieć jak oddziaływać będzie światło z materią.

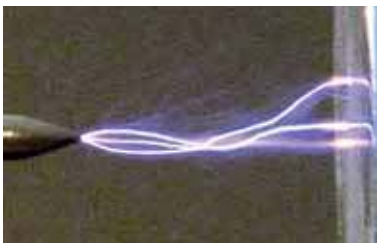
Łukasz Haryński
Katarzyna Grochowska

LITERATURA

[1] Feynman R. P., Leighton R. B., Sands M., *Feynmana wykłady z fizyki*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2014, s. 41-73.
[2] Herman M. A., Kalestyński A., Widomski L., *Podstawy fizyki dla kandydatów na wyższe uczelnie i studentów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2011, s. 381-438.
[3] Flammer J., Mozaffarieh M., Babie H., *Basic Sciences in Ophthalmology: Physics and Chemistry*, Springer Science & Business Media, 2013.
[4] Kawski A., *Fotoluminescencja roztworów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 1992, s. 20-25.
[5] Atkins P. W., *Chemia fizyczna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2001, s. 489-490.

W następnym numerze:

Wysokie napięcie: źródła i niezwykłe efekty z nim związane



Według przyjętej w elektrotechnice konwencji, wysokim napięciem w obwodach prądu przemiennego, nazywa się napięcie większe od 1000 V i płynące przy częstotliwości nie większej od 60 Hz.

eprasa.pl 02d20e786f

Modelowanie fal podłużnych za pomocą sprężyny (springy)

Andrzej **Sokolowski**

Artykuł poniższy zawiera kartę pracy ucznia, jak również wskazówki dydaktyczne do wykonania doświadczenia o przenoszeniu energii i właściwościach fal podłużnych. Doświadczenie to jest adresowana do klas licealnych, jednakże może być ono, w części, również zrealizowane w klasie VIII. Uczniowie będą pracować w grupach 4-osobowych. Doświadczenie stanowi niejako podsumowanie wiadomości o falach podłużnych i może być przeprowadzone zamiast tradycyjnego powtórzenia.

Cele dydaktyczne	Wymagane pomoce dydaktyczne
1. Springy jako ośrodek przenoszenia energii. 2. Policzenie prędkości fali. 3. Zrozumienie istoty przemieszczania energii za pomocą fali podłużnej i idei frontu fali. 4. Modelowanie równania ruchu falowego. 5. Modelowanie zależności energii fali od amplitudy.	1. Sprężyna śrubowa (springy). 2. 3. Statyw. 4. Trzy stopery. 5. Przymiar do mierzenia długości (1m).

Podstawa merytoryczna

Uczniowie będą pracować samodzielnie nad pobraniem danych i formułowaniem hipotez i wniosków, zalecane jest, by nauczyciel omówił skrótowo niektóre merytoryczne elementy tego doświadczenia, co jest przedstawione poniżej.

1. ***Policzenie prędkości ruchu fali***

Wszystkie pomiary uczniowie będą wykonywać na podstawie obserwacji ruchu pulsu lub fali poruszającej się w ośrodku modelowanym przez rozciągniętą (na podłodze) sprężynę (tzw. springy). Sugerowane jest, by doświadczenie przeprowadzić np. na sali gimnastycznej, gdzie uczniowie będą mieli więcej miejsca, aby rozciągnąć sprężynę.

Podkreślamy, że springy modeluje ośrodek, w którym będzie przemieszczała się energia. Mechaniczna. Ośrodek będzie nieruchomy. Ponieważ wykonywane przez ucznia wibracje będą równolegle do kierunku ruchu fali, powstałe zaburzenie obrazuje przemieszczanie się fal podłużnych. Rozciągamy sprężynę na stole i uderzamy sprężynę z jednej strony tak, aby przemieszczający się puls był dla uczniów widoczny. Mając do dyspozycji stopery i przymiar, pytamy uczniów, jakie wielkości fizyczne należy pomierzyć, by policzyć prędkość tego pulsu? Uczniowie zasugerują wzór:

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

gdzie:
Δs oznacza drogę przebytą przez puls zmierzona w metrach, Δt reprezentuje czas ruchu pulsu na sprężynie zmierzony w sekundach.

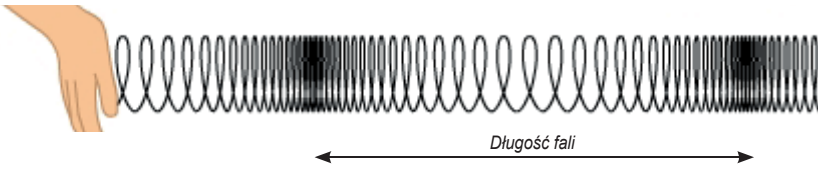
2. ***Modelowanie równania ruchu falowego***

Wykonujemy dwa uderzenia tak, by można było oszacować długość powstałej fali i zastosować równanie falowe do policzenia jej częstotliwości. Jak znaleźć tę częstotliwość? Stwierdzamy, że za pomocą stoperów mierzenie czasu (okresu fali) pomiędzy pulsami będzie obarczone dużym błędem pomiarowym, dlatego musimy zastosować inne metody. Sugerujemy równanie falowe:

$$v = f\lambda.$$

Jak zmierzyć długość tej fali? Długością fali jest tu dystans pomiędzy dwoma zgęszczeniami (kompresjami) fali, który to można pomierzyć (oszacować), kiedy fala się porusza. Potrzebna do tego będzie też prędkość fali.

Rys. 1. Ruch pulsu modelowany przez energię poruszającą się na sprężynie.



Rys. 2. Oznaczenie długości fali podłużnej.

eprasa.pl 02d20e786f

Czy musimy raz jeszcze policzyć tą prędkość? Jeśli rozciągnięcie sprężyny się nie zmieniło, ośrodek nie zmienił swoich właściwości, dlatego prędkość fali też się nie zmieniła i jest taka sama jak wcześniej pomierzono. Mamy więc:

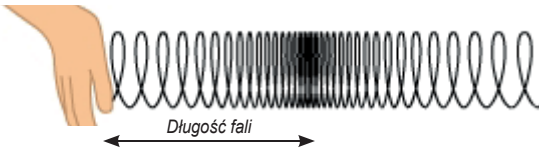
$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t} = f\,\lambda$$

Częstotliwość generowania fali można policzyć dzieląc prędkość fali propagacji przez jej długość.

$$f = \frac{v}{\lambda}$$

3. ***Analiza amplitudy fali***

Jak zmierzyć i zaznaczyć na rysunku amplitudę fali podłużnej? To zadanie jest dosyć osobliwe, więc podpowiadamy uczniom czy energia fali zależy od amplitudy? Zauważamy, że jeśli bardziej kompresujemy sprężynę, przekazujemy jej więcej energii. Większa kompresja sprężyny łączy się z większą amplitudą. Ten wątek myślenia powinien pomóc uczniom powiązać ideę dystansu wzdłuż którego sprężyna zostaje uderzona z wielkością amplitudy fali. Stwierdzamy, że amplitudę



Rys. 3. Oznaczenie amplitudy fali podłużnej.

można pomierzyć i oznaczyć jako odcinek pomiędzy punktem równowagi ośrodka i punktem o maksymalnej kompresji lub maksymalnego rozciągnięcia sprężyny, co ilustruje niebieska strzałka na rysunku poniżej (Rys. 3).

4. ***Wpływ ośrodka na prędkość fali***

Własności ośrodka można zmienić poprzez większe rozciągniecie sprężyny. Bardziej rozciągnięta sprężyna będzie symbolizować ośrodek, który jest bardziej elastyczny, ponieważ będąc bardziej rozciągnięta, sprężyna posiada większą wewnętrzną energię potencjalną.

Nie podsuwamy uczniom odpowiedzi, czy większa energia potencjalna sprężyny spowoduje zwiększenie prędkości impulsu. Pozostawiamy dociekanie na odpowiedź na to pytanie uczniom.

Karta pracy ucznia

Doświadczenie: Analiza fal podłużnych

Cel: Podczas tego doświadczenia zbadasz prędkość, częstotliwość i długość fali używając rozciągniętej sprężyny jako ośrodka, w którym ta fala będzie się poruszać. Przed rozpoczęciem doświadczenia, odpowiedź na postawione hipotezy. Hipotezy nie muszą być poprawne, ale dobrze by było, byś wykorzystał całą poznaną wiedzę na temat fal podczas ich formułowania.

Problem 1: Czy wartość użytej siły podczas wytworzenia pulsu wpłynie na prędkość ruchu tego impulsu? Uzasadnij odpowiedź.

Hipoteza**:** _____

_____

Problem 2: Czy w bardziej rozciągniętej sprężynie, puls będzie się poruszał szybciej?

W jakim ośrodku prędkość energii będzie wyższa, kiedy sprężyna będzie rozciągnięta do 5 m lub kiedy będzie rozciągnięta do 7 m? Umotywuj swoje przewidywania.

Hipoteza**:** _____

_____

Problem 3: Czy podczas przemieszczania się energii w ośrodku, cały ośrodek będzie się również się przemieszczać?

Hipoteza**:** _____

_____

Problem 4: Jaki wpływ na energię impulsu ma amplituda fali?

Hipoteza**:** _____

_____

Proces Doświadczenia

Cześć 1: Czy w bardziej rozciągniętej sprężynie, impuls będzie się poruszał szybciej?

- Rozciągnij springy (na podłodze) do 5 m.
- Uderz go z jednej strony, aby wytworzyć impuls.
- Pomierz czas, po którym puls osiągnie przeciwny koniec sprężyny. Upewnij się, że uderzyłeś springy równolegle do kierunku propagacji fali (kierunku prędkości energii).
- Powtórz ten proces trzy razy i wpisz zmierzone czasy do tabeli poniżej.

Numer pomiaru	Czas ruchu impulsu w sekundach

- Znajdź średni czas _____

_____

- Znajdź średnią prędkość przemieszczania się energii

_____

- Rozciągnij sprężynę do 7 m i powtórz proces.

Numer pomiaru	Czas ruchu pulsu w sekundach

eprasa.pl 02d20e786f

- Znajdź średni czas _____
- Znajdź średnią prędkość _____
- Czy prędkości impulsu w obu ośrodkach były takie same? _____
- Czy twoja hipoteza były prawidłowa? _____
- Czy prędkość propagacji energii zależy od elastyczności ośrodka? _____
- Czy ośrodek też się przemieszcza, jeśli energia w nim przepływa? _____

Cześć 2: Badanie zależności między długością fali a okresem fali

Podczas tej części wygenerujesz dwa (lub więcej) impulsów, dzięki czemu wytworzysz falę.

Długość fali zostanie określona przez pomierzenie odległości między dwiema kolejnymi kompresjami ośrodka.

- Rozciągnij sprężynę do 5 m.
- Prędkość impulsu jest taka sama jak pomierzona w części pierwszej.
- Czy długość fali zależy od częstotliwości jej wytwarzania? _____
- Uderz sprężynę dwa razy tak, by wytworzyła się fala. Pomierz jej długość λ_1 = _____
- Uderz powtórnie tą sprężynę, ale tak, by czas pomiędzy impulsami był zdecydowanie krótszy niż w pierwszym przypadku. Pomierz długość fali λ_2 = _____
- Jaka jest zależność pomiędzy częstotliwością i długością fali? Uzupełnij następujące zdanie (wpisz *zwiększy się* lub *zmniejszy się*). Jeśli częstotliwość wzrasta, to długość fali _____

Cześć 3. Związek amplitudy z odcinkiem wzdłuż którego działa siła powodująca puls

W tej części będziesz badał, jak kompresja ośrodka jest związana z amplituda wytworzonej fali.

Rozciągnij sprężynę do 5 m.

- Uderz sprężynę na odcinku 20 cm i obserwuj wielkość kompresji sprężyny.
- Uderz sprężynę na odcinku 40 cm i obserwuj wielkość kompresji sprężyny.
- W którym przypadku wytworzony impuls posiadał większą energię? _____
- W którym przypadku amplituda fali była większa? _____
- Jaka jest zależność pomiędzy amplitudą i energią fali? Uzupełnij poniższe zdanie (wpisz *wzrasta* lub *maleje*). Jeśli amplituda wzrasta to energia fali _____

Refleksje

Zweryfikuj hipotezy, które postawiłeś(aś) na wstępie doświadczenia. Które były poprawne, a które nie?

1. Czy to doświadczenie pomogło ci lepiej zrozumieć zjawiska dotyczące przemieszczenia się energii za pomocą fal podłużnych? W jakim stopniu? Referuj do konkretnych przykładów.
2. Co uważasz za najbardziej odkrywcze w tym doświadczeniu?

Żywoty fizyków

Asnastasio Volta – wynalazca baterii

Tadeusz **Wibig**

Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta (1745-1827) jest najbardziej rozpowszechnionym na świecie badaczem elektryczności – każdy ma ich w domu w każdym elektrycznym gniazdku 230 (słownie: dwustu trzydziestu). Nie każdy jednak wie, czym Volta zasłużył sobie na nazwanie jego imieniem jednostki napięcia elektrycznego.

Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta – commons.wikimedia

Aleksander od młodości pasjonował się elektrycznością. Najpierw eksperymentował, z sukcesami, nad indukowaniem elektryczności statycznej popularyzując i nadając dzisiejszą nazwę: *elektrofor* sprytnemu urządzeniu do przenoszenia ładunku elektrycznego z jednego ciała na drugie i dodatkowo umożliwiającego jeszcze elektryzowanie ciał „przez wpływ", czyli inaczej mówiąc przez indukcję.

To nie Volta jednak był jego wynalazcą elektroforu, wymyślił go Szwed, a właściwie Niemiec **Johan Carl Wilcke** (1732-1796). Volta idąc dalej śladami innego zagranicznego naukowca **Benjamina Franklina** (1706-1790), amerykańskiego wynalazcy piorunochronu, wziął się za studiowanie gazu błotnego. Jako pierwszy zidentyfikował i wyizolował zeń palny składnik – metan. W ramach popularyzacji nauki podpalił go kiedyś w bardzo widowiskowy sposób z użyciem iskry elektrycznej.

Luigi Aloisio Galvani – commons.wikimedia

Kolejnym naukowcem, którego prace zainspirowały Voltę był inny włoski badacz elektrycznej natury życia **Luigi Aloisio Galvani** (1737-1798). Nie był, jak można by sądzić pochopnie właścicielem pierwszego zakładu galwanizacyjnego, a w pewnym sensie jako pierwszy miał do czynienia z ogniwem galwanicznym (przymiotnik *galwaniczny* wymyślony został przez… Voltę!). Badając reakcje żaby, a konkretnie żabich udek na bodźce elektryczne Galvani zauważył, że nieżywa żaba traktowana impulsem elektrycznym wydaje się lekko drgać, jakby jeszcze ciągle żyła troszkę. Po głębszym zastanowieniu Galvani doszedł do wniosku, że być może wszelkie wyższe czynności zwierząt, a może nawet i człowieka, są z natury swojej elektryczne.

W jakimś sensie Galvani odkrył układ nerwowy (żaby), ale poszedł w swych rozważaniach niestety jednak odrobinę za daleko. Najważniejsze doświadczenie, jakie w życiu wykonał polegało na dotknięciu żabiego udka jednocześnie dwoma połączonymi drucikami, jednym zrobio-

eprasa.pl 02d20e786f

nym z żelaza, drugim z miedzi. Udko też jakby drgnęło, nieznacznie, ale jednak i to drgnęło, mimo iż nie dostarczono doń z zewnątrz żadnej elektryczności! Z faktu tego Galvani wyciągnął wniosek, że zwierzęta posiadają elektryczność same w sobie i używają jej w miarę potrzeb podskakując i żyjąc, ogólnie rzecz biorąc. Stad już tylko krok do stworzenia przez Mary Shelly koncepcji potwora doktora Frankensteina.

Volta nie zgadzał się z teorią zwierzęcej elektryczności Galvaniego. Badając skrupulatnie i dogłębnie zjawiska elektryczne zachodzące pomiędzy różnymi metalami a żabą, stwierdził, że żaba nie jest tu wcale konieczna. Zamiast żabiego udka powstanie prądu można spowodować wkładając między dwa różne metale coś zupełnie i definitywnie nieżywego, na przykład bibułę nasączoną słoną wodą. Największym i oryginalnym osiągnięciem Volty było jednak połączenie kilku ogniw w jedną całość tak, aby napięcie tak skonstruowanej baterii było sumą napięć poszczególnych ogniw. Volta zademonstrował światu swój stos złożony z wielu par elektrod cynkowych i miedzianych w roku 1800 rozpoczynając tym samym spektakularnie wiek XIX nazwany później – nie bez racji – *wiekiem pary i elektryczności*.

Doświadczenie domowe

Stos Volty – bateria ogniw galwanicznych

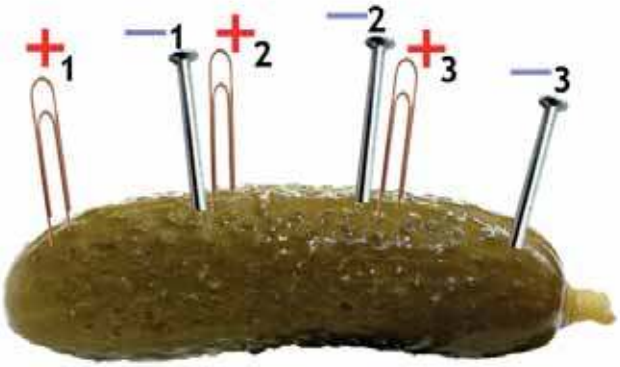
A. Potrzebne materiały

1. Ogórek kiszony.
2. Dioda świecąca (LED).
3. Trzy miedziane spinacze biurowe, lub inne kawałki miedzianego drutu.
4. Trzy stalowe gwoździe.
5. Druciki do elektrycznego łączenia elementów.

B. Narzędzia – nożyczki, nóż, woltomierz (jeśli nie ma, to trudno, poradzimy sobie jakoś)

C. Kolejność czynności

1. Wbijamy w ogórek stalowy gwóźdź i w niedużej odległości miedziany spinacz.
2. Jeśli mamy woltomierz, mierzymy napięcie pomiędzy gwoździem z spinaczem. Powinno być nieco mniej niż 1 V. Dioda połączona z elektrodami nie zaświeci. Napięcie jest zbyt małe.



3. Wbijamy w ogórek następne pary gwóźdź i spinacz, jak pokazuje to obrazek.
4. Mierzymy, jeśli mamy czym, napięcie pomiędzy każdą z par: gwóźdź i spinacz. Powinniśmy otrzymywać stale napięcie około 1 V. Dioda połączona z odpowiednimi elektrodami nie zaświeci.
5. Łączymy drucikami gwóźdź z pierwszego ogniwa („–” numer 1) ze spinaczem z ogniwa drugiego („+” numer 2) i gwóźdź z drugiego ogniwa („–” numer 2) ze spinaczem z ogniwa trzeciego („+” numer 3).
6. Wygląda to tak, jakbyśmy mieli połączone szeregowo trzy ogniwa, z których każde wytwarza napięcie około 1 V.

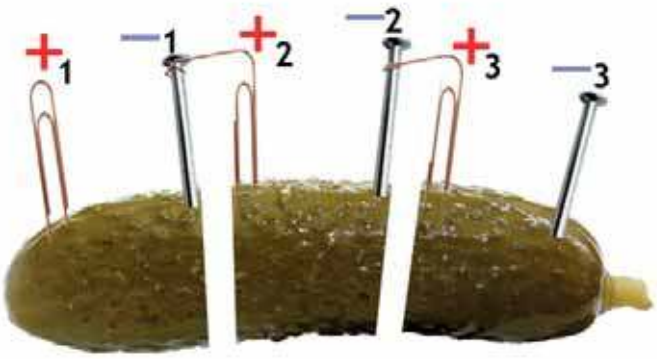
Pytanie zagadka:

Jakie będzie teraz napięcie pomiędzy spinaczem („+” numer 1) i gwoździem („–” numer 3)?

Może to być nieco zaskakujące, ale po zmierzeniu okazuje się, że ciągle jest to nieco poniżej 1V. Jeśli nie mamy woltomierza i nie jesteśmy w stanie zmierzyć napięcia, możemy połączyć z końcowymi elektrodami diodę LED.

Dioda nie zaświeci!

Dalszy ciąg pytania zagadki:



Dlaczego?

Podpowiedź:

Pokrójmy nożem ogórek na trzy części tnąc pomiędzy gwoździem („–” numer 1) i spinaczem („+” numer 1) i pomiędzy gwoździem („–” numer 2) i spinaczem („+” numer 3), tak, aby trzy ogniwa były wyraźnie i pod każdym względem od siebie oddzielone. Upewnijmy się, że leżą one na podłożu suchym, nieprzewodzącym.

1. Jeśli teraz zmierzymy napięcie pomiędzy skrajnymi elektrodami, powinno ono wynieść ponad 2 V. Jeśli zamiast miernika podłączyć do tych elektrod diodę LED powinna zdecydowanie zaświecić

Ostatnie pytanie naszej zagadki:

Dlaczego tak się stało?

Fizyk powinien potrafić wyjaśnić, jak się ma gastronomiczny proces krojenia ogórka, do jego zdolności elektryfikacyjnych.

eprasa.pl 02d20e786f

Paradoksy szczególnej teorii względności
Część IV

Jan **Kurzyk**

W poprzednich częściach artykułu [1-3] zajmowałem się zjawiskiem kontrakcji długości, czyli w pewnym sensie własnościami części przestrzennej kontinuum czasoprzestrzennego. Teraz zajmę się niektórymi cechami czwartej współrzędnej, czyli czasu.

Współrzędna czasowa i współrzędne przestrzenne są ściśle ze sobą powiązane poprzez transformację Lorentza. Skoro więc długość odcinka przestrzennego nie jest niezmiennikiem transformacji Lorentza możemy się spodziewać, że podobnie jest z długością odstępów czasowych. I rzeczywiście, okazuje się, że czas trwania tych samych zjawisk w układach poruszających się względem siebie nie są jednakowe. Obserwując dane zjawisko zachodzące w układzie poruszającym się względem nas stwierdzimy, że trwa ono dłużej niż to samo zjawisko przebiegające w naszym układzie. Efekt ten nazywamy *dylatacją czasu.*

Dylatacja czasu

Wykonajmy eksperyment polegający na obserwacji wskazań zegara poruszającego się względem nas z prędkością v wzdłuż osi X. Umieśćmy ten zegar w punkcie o współrzędnych x'_0 związanego z nim układu S'. Załóżmy, że w chwili t'_1 układu S' mija on obserwatora układu S znajdującego się w punkcie o współrzędnej x_1 w chwili t_1 układu S. W chwili t_2 (układu S) obserwowany zegar będzie mijał obserwatora znajdującego się w punkcie o współrzędnej $x_2 = x_1 + v\,(t_2\text{-}t_1)$. Jaki czas na poruszającym się zegarze odczyta obserwator znajdujący się w punkcie x_2? Zgodnie z transformacją Lorentza

$$t'_2 + (t_2 - vx_2)\gamma.$$

Po prostych przekształceniach dostaniemy

$$t'_2 = (t_2 - t_1)/\gamma + (t_1 - vx_1)\,\gamma = (t_2 - t_1)/\gamma + t'_1$$

I ostatecznie

$$\Delta t = \Delta t'\gamma,$$

gdzie $\Delta t = t_2 - t_1$ jest odcinkiem czasu, jaki upłynął w układzie S pomiędzy momentami, w których zegar przemieścił się między punktami o współrzędnych x_1 i x_2 układu S, a $\Delta t' = t'_2 - t'_1$ jest odcinkiem czasu, jaki zgodnie ze wskazaniami poruszającego się zegara, minął w układzie S'. Jak widzimy czas trwania naszego eksperymentu (czas przelotu zegara od pierwszego obserwatora do drugiego) jest inny dla obserwatorów znajdujących się w układzie S i obserwatora poruszającego się razem z zegarem. Dla obserwatorów z układu S czas ten jest dłuższy niż dla obserwatora związanego z zegarem, czyli dla obserwatorów z S czas w układzie S' poruszającym się względem nich płynie wolniej. Zjawisko to nazywamy dylatacją lub wydłużeniem czasu.

Dla przykładu załóżmy, że obserwujemy zegar umieszczony w początku układu współrzędnych układu S', poruszający się z szybkością v = 0,6 względem układu S. Przypominam, że tak jak w poprzednich częściach artykułu odległość mierzę w takich jednostkach jak sekunda świetlna (ls – ang. light second), godzina świetlna (lh – ang. light hour) czy rok świetlny (ly – light year). W takich jednostkach prędkość jest bezwymiarowa, a prędkość światła ma wartość c = 1. Gdy obserwowany zegar będzie mijał zegar umieszczony w początku układu współrzędnych układu S, to oba będą pokazywać godzinę 00:00. Po pięciu godzinach lotu zegar doleci do zegara oddalonego o 3 lh od początku układu współrzędnych układu S. Wszystkie (zsynchronizowane) zegary w układzie S będą wówczas pokazywać godzinę 05:00, zaś zegar poruszający się będzie wskazywać godzinę 04:00 (patrz rysunek 1).

Porównajmy to zjawisko ze zjawiskiem kontrakcji długości, jakie omawiałem w poprzednich odcinkach tego cyklu artykułów [1-3]. Tamto zjawisko polega na zmniejszeniu się odległości między dwoma punktami układu S' obserwowanymi w tym samym momencie układu S (obiekty będące względem nas w ruchu ulegają skróceniu w kierunku ruchu). Teraz mamy do czynienia z wydłużeniem odcinka czasu pomiędzy dwoma zdarzeniami zachodzącymi w tym samym punkcie układu S'. To ostatnie stwierdzenie jest bardzo istotne dla zrozumienia istoty zjawiska dylatacji czasu [4]. Zauważmy, że do stwierdzenia z jaką szybkością upływa czas na poruszającym się względem nas zegarze musimy porównać wskazania tego zegara ze wskazaniami co najmniej dwóch zegarów naszego układu. Co prawda są to zegary zsynchronizowane ze sobą [1], ale potrzebujemy ich co najmniej dwa (inne rozwiązanie opiszę nieco dalej).

(a) (b)

Rysunek 1. Zegar związany z układem S' (czerwona linia i opis) porusza się z prędkością v = 0,6 względem układu S (niebieska linia i opis). (a) Zegar mija w chwili t = 0 h zegar umieszczony w początku układu współrzędnych układu S. (b) Po 5 godzinach mierzonych w układzie S zegar dociera do zegara oddalonego o 3 lh od początku układu współrzędnych S. Na poruszającym się zegarze upłynęły 4 godziny.

eprasa.pl 02d20e786f

Względność dylatacji czasu

Dylatacja czasu, podobnie jak omawiana przeze mnie wcześniej kontrakcja długości, jest zjawiskiem rzeczywistym, chociaż od razu rodzi się wiele wątpliwości i prób kwestionowania tego faktu w oparciu o zasadę względności Galileusza [5]. Z własności czasoprzestrzeni, którą nazwaliśmy dylatacją czasu wynika, że dowolne obiektywne zjawisko przebiegające w układzie będącym względem nas w ruchu obserwowane przez obserwatorów z naszego układu będzie trwało dłużej, niż to samo zjawisko przebiegające w naszym układzie.

Załóżmy, że oba zjawiska rozpoczęły się w momencie, gdy punkty, w których zjawiska będą przebiegać mijały się. Wówczas dla obserwatorów z układu S zjawisko zachodzące w układzie S' zakończy się później niż zjawisko w ich układzie. Ale zgodnie z zasadą względności Galileusza, dla obserwatorów z układu S' układ S jest w ruchu względem nich. A zatem dla nich czas w układzie S biegnie wolniej i zjawisko zachodzące w tym układzie dla nich zakończy się później niż to samo zjawisko w ich układzie. Jak to możliwe? Mamy kolejny paradoks przypominający paradoks *pociągu i tunelu*. W tamtym paradoksie dla obserwatorów związanych z tunelem pociąg był krótszy od tunelu, a dla pasażerów pociągu krótszy był tunel.

Jak pokazałem poprzednio [2] w stwierdzeniach obserwatorów związanych z tunelem i pasażerów pociągu nie ma sprzeczności jeśli zrezygnujemy z intuicyjnego, opartego o mechanikę newtonowską, patrzenia na ten problem. Podobnie jest w przypadku dylatacji czasu. Dla przykładu, załóżmy, że obserwator O układu S i obserwator O' układu S', obaj znajdujący się w początkach swoich układów współrzędnych, w momencie mijania się, czyli w chwili $t = 0$ i $t' = 0$ zaczynają oglądać ten sam film trwający Δt minut. W momencie, gdy obserwator O zobaczy na ekranie swojego kina napisy końcowe filmu, obserwator O' będzie mijał obserwatora A oddalonego od obserwatora O o $v\Delta t$. Obserwator A podglądając ekran, na który patrzy obserwator O' zauważy, że film jeszcze trwa, a mijający go zegar pokazuje czas

$$t'_A = (\Delta t - v \cdot v\Delta t)\,\gamma = \Delta t/\gamma.$$

W układzie S' film trwa (tak jak w układzie S) Δt minut, więc zakończy się, gdy zegar obserwatora O' (i wszystkich innych zegarów w S') pokaże czas $t' = \Delta t$. Obserwator O' będzie wówczas mijać obserwatora B układu S, który znajduje się w punkcie o współrzędnej x_B

$$x_B = (x'_0 + v\Delta t)\gamma = v\Delta t\gamma.$$

Zegar tego obserwatora będzie pokazywać czas

$$t_B = (\Delta t + vx'_0)\,\gamma = \Delta t\gamma.$$

Zwróćmy uwagę na fakt, że w jednym i drugim układzie film trwa tyle samo – Δt minut. Z dylatacji czasu nie wynika, że na obejrzenie godzinnego filmu obserwator poruszający się względem nas będzie musiał poświęcić więcej swojego czasu niż godzinę. On też obejrzy go w ciągu godziny. Chodzi o to, że wskutek dziwnych związków między czasem, a przestrzenią opisanych transformacją Lorentza zjawisko zachodzące w układzie poruszającym się względem nas będzie dla nas trwało dłużej niż to samo zjawisko zachodzące w naszym układzie.

Dokładnie odwrotny będzie wynik tego doświadczenia zaobserwowany przez obserwatorów z układu S'. Dla nich zjawisko w naszym układzie będzie trwało dłużej niż to samo zjawisko w ich układzie. Zwróćmy uwagę na bardzo ważny fakt. Eksperyment polegający na pomiarze czasu trwania filmu w naszym układzie nie jest symetryczny z eksperymentem polegającym na pomiarze czasu trwania filmu w układzie będącym względem nas w ruchu.

W pierwszym przypadku wystarczy nam jeden obserwator (osoba oglądająca film). W drugim przypadku potrzebujemy przynajmniej dwóch obserwatorów o różnych współrzędnych mierzonych w kierunku ruchu układu S' względem nas. Sam obserwator O' (osoba oglądająca film w układzie S') nie jest w stanie stwierdzić jak długo trwa film oglądany przez obserwatora O. Potrzebuje on drugiego obserwatora np. A' mijającego obserwatora O w momencie, gdy obserwator O' kończy oglądanie filmu lub np. obserwatora B' mijającego obserwatora O w momencie, gdy ten kończy oglądanie filmu. Oczywiście obaj obserwatorzy z układu S' muszą dysponować zsynchronizowanymi ze sobą zegarami [1]. Zgodnie z transformacją Lorentza w chwili $t' = \Delta t$, czyli w momencie, gdy dla O' kończy się film, obserwator O będzie mijał obserwator A', którego współrzędną x' możemy wyliczyć ze wzoru

$$x_0 = 0 = (x'_A + v\,\Delta t)\gamma.$$

Stąd

$$x'_A = -v\Delta t.$$

Zegar obserwatora O będzie wówczas pokazywać czas

$$t_0 = (t' + vx'_A)\gamma = (\Delta t - v^2\Delta t)\,\gamma = \Delta t/\gamma.$$

Wynika z tego, że O ogląda jeszcze film. Dla niego film skończy się w chwili $t = \Delta t$ i wówczas będzie go mijać obserwator B' o współrzędnej

$$x'_B = (x_0 + v\Delta t)\gamma = -v\Delta t\gamma.$$

Zegar tego obserwatora będzie wskazywał czas

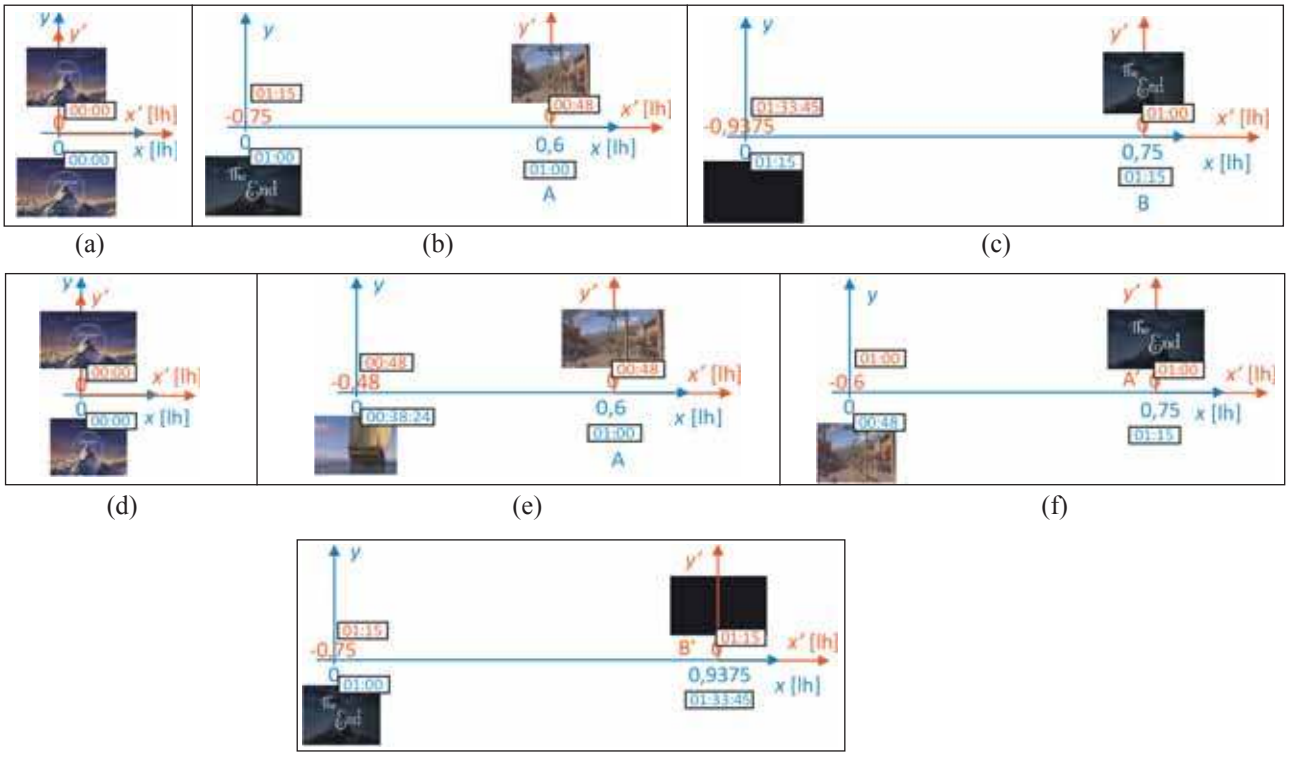
$$t'_B = (t_0 + vx_0)\gamma = \Delta t\gamma.$$

Jak widzimy zjawisko dylatacji czasu jest w pełni symetryczne. Z punktu widzenia obserwatorów z układu S w układzie S' czas biegnie wolniej niż w ich układzie, a z punktu widzenia obserwatorów z układu S' wolniej płynie czas w układzie S. I jak pokazałem w tym stwierdzeniu nie ma żadnej sprzeczności. Tak jak nie było sprzeczności w stwierdzeniu, że z punktu widzenia obserwatorów związanych z tunelem pociąg jest krótszy od tunelu, a z punktu widzenia pasażerów pociągu krótszy jest tunel [2].

Podobnie jak w tamtym przypadku również teraz możemy popatrzeć na efekt dylatacji czasu wykorzystując problem względności równoczesności [1]. Wyobraźmy sobie dwa układy inercjalne S i S'. Układ S' porusza się względem S z prędkością $v = 0{,}6$ w kierunku osi X. Niech obserwatorzy znajdujący się w początkach swoich układów zaczynają w chwili $t = 0$ i $t' = 0$ oglądać ten sam film trwający jedną godzinę (patrz rysunek 2 (a) i (d)).

W układzie S po upływie jednej godziny obserwator O kończy oglądać film. W tym momencie obserwator O' znajduje się w odległości 0,6 lh od obserwatora O, mija obserwatora A. Zarówno obserwator O', jak i obserwator A widzą na ekranie kina (w układzie S') scenę rozpoczynającą się w 48. minucie filmu ($t' = 0{,}6$ h). Film jeszcze

eprasa.pl 02d20e786f



Rysunek 2. Układ S' (czerwone oznaczenia) porusza się z szybkością v = 0,6 względem układu S (niebieskie oznaczenia) wzdłuż osi X. Gdy początki obu układów współrzędnych mijają się, obserwatorzy w tych punktach rozpoczynają oglądać ten sam film trwający jedną godzinę (a), (d). Rysunki (b) i (c) przedstawiają obserwacje z układu S. Gdy w układzie S minęła godzina, film w O zakończył się, a w O' jeszcze trwa, widzimy scenę z 48. minuty (b). Po kolejnych 15 minutach zakończył się film w O' (c). Rysunki od (d) do (g) przedstawiają obserwacje z układu S'. W 48. minucie w kinie O' widzimy scenę z rysunku (b), ale w tym samym momencie na ekranie O nie ma napisu The End, lecz scena z 38. minuty i 24. sekundy (e). Po godzinie mierzonej w układzie S' kończy się film w O', a na ekranie w O widzimy scenę z 48. minuty. (f) Po kolejnych 15. minutach kończy się film w O. Oczywiście rozmiar ekranów na rysunkach są przesadzone, ale stosunki szerokości ekranów w obu układach są zgodne z efektem skrócenia długości dla podanej prędkości.

trwa. Dla obserwatorów z układu S oba zdarzenia (patrz rysunek 2 (b)): pojawienie się napisu *The End* na ekranie kina O i pojawienie się kadru z 48 minuty filmu na ekranie kina O' mijającego w tym momencie obserwatora A, są jednoczesne. Natomiast dla obserwatorów z układu S' te zdarzenia jednoczesne nie są. Drugie z nich zachodzi w 48. minucie czasu mierzonego w układzie S' (rysunek 2 (e)), a pierwsze o godzinie 01:15 ($t' = 1{,}25$ h), czyli już po zakończeniu się filmu w O' (rysunek 2 (g)).

Względność kolejności zdarzeń

Wielokrotnie zwracałem uwagę na to, jak ważne w zrozumieniu szczególnej teorii względności jest wyzbycie się intuicyjnego traktowania równoczesności. Zdarzenia zachodzące w różnych miejscach przestrzeni w tej samej chwili (równocześnie) w jednym układzie odniesienia zachodzą w różnych momentach (nie są równoczesne) dla obserwatorów będących względem tamtych w ruchu (chodzi o ruch, którego prędkość ma niezerową składową wzdłuż kierunku łączącego punkty, w których zaszły te zdarzenia). Uważny czytelnik mógł zwrócić uwagę na jeszcze bardziej „niepokojące" zjawisko. Dwa zjawiska zachodzące w różnych miejscach przestrzeni i w różnych momentach mogą być przez różnych obserwatorów obserwowane w różnej kolejności. Tak było np. w opisie paradoksu *pociągu i tunelu*. Zachęcam do ponownego przyjrzenia się rysunkowi 2 w drugim odcinku mojego cyklu [2].

Zauważymy tam, że z punktu widzenia obserwatorów związanych z tunelem zdarzenie polegające na tym, że koniec pociągu przejeżdża przez bramę wjazdową do tunelu następuje 10 minut przed zdarzeniem polegającym na tym, że początek pociągu mija bramę wyjazdową z tunelu. Dla pasażerów pociągu kolejność tych zdarzeń jest odwrotna, a dodatkowo inny jest odstęp czasowy między tymi zdarzeniami. Najpierw brama wyjazdowa mija początek tunelu, a 28 minut później brama wjazdowa mija koniec pociągu. Z podobną sytuacją mieliśmy do czynienia w eksperymencie z filmem (patrz rysunek 2). Dla przykładu w układzie S najpierw w kinie O kończy się film (rysunek 2(b)), a 15 minut później kończy się film w kinie O' (rysunek 2(c)). Zaś dla obserwatorów z układu S' najpierw kończy się film w O' (rysunek 2(f)), a 15 minut później kończy się film w kinie O (rysunek 2(g)).

Przeanalizujmy problemem względności kolejności zdarzeń. Rozważmy dwa zdarzenia A i B. Niech w układzie S pierwsze z nich zachodzi w punkcie o współrzędnej x_A w chwili t_A, a drugie w punkcie o współrzędnej $x_B > x_A$ w chwili $t_B > t_A$. A zatem dla obserwatorów w układzie S zdarzenie B jest późniejsze w stosunku do zdarzenia A. Zastosujmy transformację Lorentza, aby policzyć w jakich momentach oba zdarzenia zarejestrują obserwatorzy z układu S' poruszającego się z prędkością v. Będą to następujące czasy

$$t'_A = (t_A - vx_A)\gamma,\ t'_B = (t_B - vx_B)\gamma.$$

eprasa.pl 02d20e786f

Stąd

$$\Delta t' = (\Delta t - v\Delta t)\gamma,$$

gdzie

$$\Delta t' = t_B - t_A > 0,\ \Delta x = x_B - x_A > 0$$

i

$$\Delta t' = t'_B - t'_A.$$

Zobaczmy jaki znak będzie miał odstęp czasu $\Delta t'$ zależnie od prędkości układu S'

a) Jeśli $v < \Delta t/\Delta x$ (przypominam, że v jest bezwymiarowe w innych układach jednostek byłoby tu $v < c^2\,\Delta t/\Delta x$, to $\Delta t' > 0$ Czyli obserwatorzy zarejestrują oba zdarzenia w tej samej kolejności, w jakiej zauważyli je obserwatorzy z układu S.
b) Jeśli $v = \Delta t/\Delta x$ to $\Delta t' = 0$. Czyli dla obserwatorów oba zdarzenia będą równoczesne.
c) Jeśli $v > \Delta t/\Delta x$, to $\Delta t' < 0$. Czyli obserwatorzy zarejestrują oba zdarzenia w odwrotnej kolejności niż ta, w której zauważyli je obserwatorzy z układu S.

Sprawdźmy jak to się ma do naszego eksperymentu z filmem. Zdarzeniem A jest zakończenie się filmu w kinie obserwatora O w punkcie $x_A = 0$ lh, w chwili $t_A = 1$ h (rysunek 2 (b)). Zdarzeniem B jest zakończenie się filmu w kinie obserwatora O' (rysunek 2 (c)) w punkcie $x_B = 0{,}75$ lh, w chwili $t_B = 1{,}25$ h. A zatem

$$\frac{\Delta t}{\Delta x} = \frac{0{,}25\ \text{h}}{0{,}75\ \text{lh}} = \frac{1}{3} \approx 0{,}33$$

Jak widzimy $v = 0{,}6 > 0{,}33$, czyli spełniony jest warunek c) To dlatego obserwatorzy z układu S' widzą odwrotną kolejność zdarzeń. Dla nich najpierw kończy się film w kinie obserwatora O' (rysunek 2 (f)), a potem kończy się film w kinie obserwatora O (rysunek 2 (g)).

Względność kolejności zdarzeń a przyczynowość

Względność kolejności zdarzeń może wywołać nie tylko zawrót głowy, ale również po raz kolejny zasiać zwątpienie w słuszność szczególnej teorii względności. Skoro dwa zdarzenia można obserwować w różnej kolejności w zależności od prędkości obserwatorów, to co się dzieje ze związkami przyczynowo skutkowymi? Jeśli zdarzenie B jest następstwem zajścia zdarzenia A, to nielogicznym byłoby zaobserwowanie najpierw zdarzenia B, a dopiero potem zdarzenia A. Jeśli ktoś rzuci kamieniem w szybę okienną, a ta następnie rozbije się pod wpływem tego uderzenia. To nie może istnieć układ odniesienia, w którym ktoś zobaczy najpierw rozbitą szybę, a potem wyrzucanie kamienia. Czyżby więc szczególna teoria względności łamała zasadę przyczynowości? Oczywiście nie. Zauważmy, że zmiana kolejności obserwacji zdarzeń zachodzi wówczas, gdy prędkość obserwatorów jest większa niż $\Delta x/\Delta t$. Ale jednocześnie wiadomo, że istnieje górne ograniczenie prędkości. Prędkość układu musi być mniejsza od prędkości światła w próżni c (w naszych jednostkach c = 1), czyli

$$1 > v > \Delta t / \Delta x$$

Stąd dostajemy warunek

$$\Delta x > \Delta t.$$

Innymi słowy zaobserwowanie dwóch zdarzeń w innej kolejności niż miało to miejsce w układzie S jest możliwe jedynie w przypadku takich zdarzeń, które zachodzą w punktach, między którymi odległość jest większa niż droga, jaką pokonuje światło w próżni w czasie równym odstępowi czasowemu pomiędzy tymi zdarzeniami. Warunek ten jest czytelniejszy w tradycyjnych układach jednostek, gdyż wtedy warunek przyjmuje postać $\Delta x > c\,\Delta t$. Zauważmy, że taki warunek nie może być spełniony, gdy zdarzenia powiązane są związkami przyczynowo skutkowymi. Jeśli zdarzenie B ma zajść wskutek zdarzenia A, to informacja o zajściu zdarzenia A musi dojść do punktu, w którym zachodzi zdarzenie B w czasie nie dłuższym niż czas lotu światła pomiędzy tymi punktami. Wyobraźmy sobie dwa zdarzenia. Pierwsze polega na naciśnięciu przycisku i drugie polega na rozbiciu szyby w oknie położonym o L od przycisku. Jeśli odstęp czasu między tymi zdarzeniami jest mniejszy niż równy L, to łatwo możemy wyobrazić sobie, że rozbicie szyby było następstwem naciśnięcia przycisku. Na przykład przycisk zwalniał mechanizm wyrzucający w kierunku okna kamień (wtedy $\Delta t < L$), a w skrajnym przypadku (wtedy $\Delta t = L$) uruchamiał laser dużej mocy. Jeśli odległość między tymi punktami będzie większa niż odstęp czasu między zdarzeniami $L > \Delta t$ ($L > c\Delta t$), to nie ma żadnej możliwości żeby rozbicie szyby było następstwem naciśnięcia przycisku, gdyż żaden obiekt (nawet światło) nie jest w stanie dotrzeć w takim czasie do szyby i spowodować jej rozbicie. Oczywiście nic nie zmieni ustawienie samego urządzenia rozbijającego szybę tuż przy niej i jedynie wysłanie z przycisku do urządzenia impulsu elektrycznego. Przesłanie impulsu elektrycznego wymaga tyle samo czasu, co przesłanie impulsu świetlnego. Podobnie nie zmieni niczego przyłożenie do szyby pręta o długości L i popchnięcie go. Zanim „informacja" o tym, że popchnęliśmy pręt dojdzie do jego drugiego końca, szyba już uległa rozbiciu z innej przyczyny niż nasze działanie. Osoby, które zdziwił ten ostatni przykład odsyłam do drugiej części mojego artykułu [2] i wyjaśnienia paradoksu *pociągu i tunelu* w wersji z wrotami zamykającymi się po wjechaniu pociągu do tunelu.

Podsumowując widzimy, że zdarzenia rozdzielone w przestrzeni o odległość większą od odstępu czasowego między nimi (odległość większą niż ta, jaką w tym czasie jest w stanie pokonać światło w próżni) nie mogą być połączone związkami przyczynowo skutkowymi. A jak ustaliliśmy tylko w przypadku zdarzeń, które spełniają warunek $\Delta x > \Delta t$ istnieją układy odniesienia, w których obserwatorzy zarejestrują te zdarzenia w innej kolejności niż my. Natomiast wszystkie zdarzenia powiązane związkami przyczynowo skutkowymi, a także wszystkie zdarzenia niepowiązane takimi związkami, ale dla których zachodzi warunek $\Delta x < \Delta t$ lub czytelniej $\Delta x > c\Delta t$ będą obserwowane w tej samej kolejności przez dowolnych obserwatorów niezależnie od ich prędkości. Różne będą jedynie odstępy przestrzenne i odstępy czasowe między tymi zdarzeniami jakie odnotują różni obserwatorzy. W przypadku takich zdarzeń mówimy, że zdarzenie B jest w *absolutnej przyszłości* względem zdarzenia A, a zdarzenie A jest w *absolutnej przeszłości* względem zdarzenia B.

eprasa.pl 02d20e786f

Eksperyment z filmem – drugie podejście

W poprzedniej wersji eksperymentu z filmem obserwując czas trwania filmu odtwarzanego w układzie poruszającym się względem nas korzystaliśmy z tego, że w naszym układzie mamy wielu obserwatorów wyposażonych w układ zsynchronizowanych zegarów. W pierwszej części tego cyklu artykułów [1] pisałem, że takie podejście do obserwacji zdarzeń jest wygodniejsze i najbardziej czytelne, gdyż dane zdarzenie jest obserwowane przez obserwatora znajdującego się w najbliższym sąsiedztwie punktu, w którym doszło do zdarzenia. Ale jeśli obserwator oddalony od miejsca zdarzenia zna odległość do tego miejsca i uwzględni czas po jakim dochodzi do niego informacja o zajściu zdarzenia, może samodzielnie określić moment zajścia zdarzenia w jego układzie. Spróbujmy właśnie w taki sposób przeprowadzić nasz eksperyment z filmem opisany wyżej. Załóżmy, że obserwatorzy O i O' umówili się, że każdy z nich po zakończeniu filmu wyśle do drugiego obserwatora sygnał radiowy. Niech τ'_F oznacza czas trwania filmu w układzie S' (oczywiście czas trwania filmu mierzony w układzie własnym jest taki sam w obu układach S i S').

Gdy obserwator O' wysyła do O sygnał o zakończeniu filmu, ten znajduje się od niego w odległości $v\tau'_F$. Czas lotu sygnału τ'_S mierzony w układzie S' do obserwatora O możemy wyliczyć z równania (przypominam, że $c = 1$, więc $c\tau'_S = \tau'_S$)

$$\tau'_S = v\tau'_F + v\tau'_S,$$

gdzie $v\tau'_F$ jest odległością obserwatora O od obserwatora O' w momencie wysyłania sygnału, a $v\tau'_S$ odległością jaką O pokona od tego momentu do momentu, gdy dojdzie do niego sygnał od O'. Stąd

$$\tau'_S = \frac{v\tau'_F}{1-v}$$

Wyliczony powyżej czas jest jednocześnie odległością, w jakiej obserwator O znajduje się od obserwatora O' w momencie odebrania sygnału od niego ($x' = -\tau'_S$). A zatem, gdy obserwator O odbiera sygnał od O', to znajduje się w punkcie o współrzędnej $x' = -\tau'_S$, a zegary w układzie S' pokazują czas

$$t' = \tau'_F + \tau'_S = \frac{1}{1-v}\tau'_F.$$

Zgodnie z transformacją Lorentza zegar obserwatora O będzie w tym momencie pokazywać czas

$$t = \left(\frac{1}{1-v}\tau'_F + v\frac{-v}{1-v}\tau'_F\right)\gamma = (1+v)\gamma\tau'_F.$$

Dla danych, jakie przyjęliśmy w poprzednim eksperymencie, czyli $v = 0{,}6$ i $\tau'_F = 1$ h dostajemy $t = 2$ h, czyli do obserwatora O sygnał dojdzie o godzinie 02:00 (godzinę po zakończeniu się filmu oglądanego przez O). Na ten czas składa się czas τ_F, po którym O' wysłał sygnał o zakończeniu się filmu i czas lotu τ_S tego sygnału (oba czasy mierzone w układzie S)

$$(1 + v)\gamma\tau'_F = \tau_F + \tau_S.$$

W momencie wysyłania sygnału obserwator O' był w odległości $v\tau_F$ od obserwatora O'. Sygnał radiowy z tej odległości dojdzie po czasie

$$c\tau_S = \tau_S = v\tau_F.$$

A zatem

$$(1 + v)\gamma\tau'_F = (1 + v)\tau_F.$$

Stąd ostatecznie dostajemy

$$\tau_F = \tau'_F\gamma.$$

Wynika stąd, że według czasu mierzonego przez obserwatora O obserwator O' oglądał film γ razy dłużej niż on sam. O' zakończył oglądać film po czasie 1h·1,25 mierzonym w układzie S, czyli gdy zegary w układzie S pokazywały godzinę 01:15 (patrz rysunek 2 (c)).

Oczywiście jeśli przeprowadzimy analogiczne rachunki analizując moment dotarcia do O' sygnału od O i moment jego wysłania otrzymamy symetryczną sytuację. Teraz obserwator O' stwierdzi, że O oglądał film γ razy dłużej niż on i według jego zegara zakończył oglądanie filmu o godzinie 01:15 czasu S' (patrz rysunek 2 (g)).

Chciałbym zwrócić uwagę na dwie sytuacje, jakie pojawiły się podczas powyższej analizy. Gdy liczyliśmy czas, jaki w układzie S światło potrzebuje na dotarcie do obserwatora O wzięliśmy odległość między obserwatorami w momencie wysyłania sygnału mierzoną w układzie S i prędkość światła c względem obserwatora O ($c\tau_S = v\tau_F$). Jest to oczywiste z punktu widzenia szczególnej teorii względności. Drugi postulat tej teorii głosi, że dla wszystkich obserwatorów znajdujących się układach inercjalnych prędkość światła w próżni jest taka sama we wszystkich kierunkach niezależnie od prędkości, jaką ma źródło światła [5]. Dlatego w równaniu użyliśmy prędkości c, z jaką światło porusza się względem obserwatora O chociaż sygnał został wysłany z obiektu oddalającego się z szybkością v od O. Ale kiedy liczyliśmy czas, jaki w układzie S' upłynie od momentu wysłania sygnału do momentu dotarcia do obserwatora O wzięliśmy nie tylko odległość, jaka jest między obserwatorami w momencie wysyłania sygnału, ale również drogę, jaką od tego momentu pokona obserwator O względem O' zanim dogoni go światło

$$\tau'_S = v\tau'_F + v\tau'_S.$$

Stąd

$$(1 - v)\tau'_S = v\tau'_F.$$

Czyli *de facto* według obserwatora O' światło zbliża się do obserwatora O z prędkością $1 - v$ lub czytelniej $c - v$. Czy nie jest to sprzeczne z postulatem Einsteina? Oczywiście nie. Światło względem obserwatora O porusza się z prędkością c, a prędkość jaką wyliczyliśmy przed chwilą jest prędkością z jaką światło zbliża się do obserwatora O z punktu widzenia obserwatora O'.

Jeśli w układzie S dwa obiekty poruszają się wzdłuż osi X i mają względem S szybkości v_1 i v_2, to jak wiemy szybkość jednego z nich względem drugiego wynosi

$$v = \frac{v_1 \pm v_2}{1 \pm v_1 v_2}.$$

Znak „+" w powyższym wzorze odpowiada sytuacji, gdy obiekty poruszają się w przeciwne strony (zbliżają się do siebie lub oddalają się), a znak „-" dotyczy sytuacji, gdy oba obiekty poruszają się w tym samym kierunku (jeden dogania drugi).

Powyższy wzór nazywamy wzorem na składanie prędkości. Ze wzoru tego (ze znakiem „+") wynika, że pręd-

eprasa.pl 02d20e786f

kość żadnego obiektu względem drugiego nie może być większa niż 1 (szybkość światła w próżni). Skrajną wartość 1 dostaniemy wówczas, gdy choć jednym z tych obiektów będzie foton, czyli obiekt o szybkości $c = 1$. Zauważmy, że wzór na składanie prędkości określa prędkość jednego obiektu względem drugiego. Co innego zobaczy obserwator z układu S, względem którego obiekty poruszają się z szybkościami v_1 i v_2. On zobaczy, że oba obiekty zbliżają się do siebie lub oddalają się od siebie z szybkością $v_1 + v_2$ (jeśli poruszają się w przeciwnych kierunkach) lub z szybkością $|v_1 - v_2|$, gdy jeden dogania drugi. Z tą drugą sytuacją mieliśmy do czynienia podczas naszej analizy. Z punktu widzenia obserwatora O' obserwator O oddala się względem niego z szybkością v, a foton poruszający się względem niego z szybkością c dogania obserwatora O z szybkością $c - v$.

Czy „coś" może poruszać się szybciej niż światło w próżni?

Z teorii Einsteina wynika, że szybkość światła w próżni jest graniczną prędkością, z jaką względem dowolnego układu inercjalnego mogą przemieszczać się wszystkie znane nam formy energii a tym samym informacji. Często wyciąga się stąd zbyt daleko idący wniosek mówiąc, że „nic nie może poruszać się szybciej niż światło w próżni". Tego typu bezwarunkowe stwierdzenie nie ma sensu. Dla przykładu w opisanej powyżej sytuacji obserwator z układu S obserwujący zbliżające się do siebie (lub oddalające się) obiekty widzi, że zbliżają się one (lub oddalają od siebie) z szybkością $v_1 + v_2$. Łatwo zauważyć, że szybkość ta może być większa od szybkości światła. W granicznym przypadku, gdy tymi obiektami będą fotony szybkość ta będzie równa podwojonej szybkości światła.

Mówiąc o tym, z jaką prędkością może się coś poruszać musimy określić czym jest to „coś" co się porusza i co rozumiemy przez „porusza się" [6]. Wyobraźmy sobie układ żarówek ułożonych jedna za drugą i włączanych niezależnie. Możemy dobrać moment zaświecenia się każdej żarówki tak, żeby zaświecała się ona po poprzedniej po z góry określonym czasie. Jeśli ten czas będzie krótszy niż czas, jaki potrzebowałoby światło na pokonanie drogi od jednej żarówki do następnej, to szybkość z jaką będzie się przesuwać granica zaświeconych i niezaświeconych żarówek będzie większa niż szybkość światła. Mało tego, szybkość ta może być dowolnie duża. W skrajnym przypadku, gdy zaświecimy wszystkie żarówki jednocześnie, to szybkość ta będzie nieskończona! Inny przykład „czegoś" co może poruszać się szybciej niż światło, to ślad tzw. zajączka lub wskaźnika laserowego „przesuwającego się" na odległym ekranie. Plama świetlna widoczna na ekranie może przesuwać się po nim dowolnie szybko. Ale samo światło odbite od lusterka lub wysłane przez wskaźnik laserowy porusza się w kierunku ekranu z prędkością c. Również energia (informacja) przemieszcza się od lusterka lub wskaźnika laserowego w kierunku ekranu, a nie wzdłuż ekranu.

Zauważmy, że żaden z opisanych tu przykładów „ruchu" z szybkością większa niż szybkość światła nie neguje stwierdzenia, jakie zamieściłem na początku tego punktu.

W następnej części cyklu będę kontynuował rozważania na temat dylatacji czasu. Między innymi wykorzystam wzory wyprowadzone w drugiej wersji eksperymentu z filmem do pokazania jak możemy na bieżąco sprawdzać szybkość upływu czasu w układzie poruszającym się względem nas. Omówię też najsłynniejszy paradoks szczególnej teorii względności – *paradoks bliźniąt.*

Jan Kurzyk
Instytut Fizyki Politechniki Krakowskiej

LITERATURA

[1] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część I*. Fizyka w Szkole nr 1/2019.
[2] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część II*. Fizyka w Szkole nr 2/2019.
[3] J. Kurzyk, *Paradoksy szczególnej teorii względności. Część III*. Fizyka w Szkole nr 3/2019.
[4] https://www.youtube.com/watch?v=GZ6tdsFJHhk [dostęp 29.01.2019].
[5] https://pl.wikipedia.org/wiki/Zasada_wzgl%C4%99dno%C5%9Bci [dostęp 29.01.2019].
[6] A. Dragan, *Niezwykle szczególna teoria względności*, http://www.fuw.edu.pl/~dragan/Fizyka/Nstw.pdf [Dostęp 28.10.2018].

Misje Apollo, czyli 50 lat od lądowania na Księżycu

Obecnie mija 50 lat od lądowania człowieka na Księżycu. Tak jak w „Ferdydurce" Gombrowicza trzeba się zachwycać tym osiągnięciem. A jak ktoś się nie zachwyca to widocznie nie jest odpowiednio wyedukowany. Misja Apollo była amerykańską odpowiedzią na radzieckie sukcesy w podboju kosmosu. Tak naprawdę składała się ona z dwóch pod-misji. Pierwszą misją była misja Saturn Apollo. Składała się ona z siedmiu lotów testowych mających sprawdzić moduły, które potem miały być wykorzystane w misji Apollo – właściwej.

Właściwa misji Apollo rozpoczęła się nieszczęśliwie. Podczas prób naziemnych w kabinie statku Apollo 1 wybuchł pożar i śmierć poniosło trzech astronautów. Kolejnymi misjami były misje Apollo 4,5,6. Były to loty bezzałogowe. To nie jest pomyłka – misji 2 i 3 nie było. Loty 7,8,9,10 to już loty załogowe, w czasie których zrealizowano wiele ważnych zadań. Między innymi pierwszy przelot człowieka nad odwrotną stroną Księżyca. Misja ta nie była taka trywialna, gdyż odwrotna strona Księżyca znacznie różni się morfologia powierzchni od tej, którą oglądamy z Ziemi.

Oczywiście po misji Apollo 10 nastąpiła misja Apollo 11. Misja ta liczyła trzech astronautów, z których dwóch zeszło na powierzchnię Księżyca. Następnie miało miejsce jeszcze sześć misji. Najsłynniejsza z nich była misja Apollo 13, podczas której doszło do awarii, która o mało co nie skończyła się śmiercią astronautów. Znana jest głównie z tego, że amerykanie nakręcili film na jej temat, który zresztą przyniósł im ponad 350 milionów dochodu.

Ostatnia misja programu Apollo miała miejsce w grudniu 1972 roku. Z niecierpliwością czekamy na następną, zwłaszcza że obecny władca Białego Domu patrząc przez okno na naszego naturalnego satelitę wypowiedział słynne, znane z wielu horrorów, zdanie. Ja jeszcze tu wrócę.

Od lewej – dowódca - Neil A. Armstrong, piloci - Michael Collins i Edwin E. Aldrin. Foto NASA

eprasa.pl 02d20e786f

Co, jak, dlaczego…? (Cz. VIII)

Waldemar **Reńda**

135. Na pytanie – która jest godzina? Padła odpowiedź: Jest 8^{15}. Czy w tym przypadku można określić niepewność względną tego pomiaru i dlaczego?

Odp.: Nie, bo nie możemy określić czasu, względem którego tę wartość podano.

136. Temperatura ciała to $36{,}6^0$C. Czy można podać niepewność względną tego pomiaru i dlaczego?

Odp.: Nie, bo nie możemy określić temperatury, względem której tę wartość podano.

137. Czy barwa żółta w widmie światła białego jest taką samą barwą, jak barwa żółta otrzymana z syntezy światła czerwonego i zielonego?

Odp.: Nie. Światło żółte z widma ciągłego jest światłem monochromatycznym, czyli o określonej długości fali i określonej energii fotonów. Natomiast barwa żółta otrzymana w wyniku w/w syntezy jest mieszaniną fotonów o dwóch różnych energiach. Zatem wrażenie barwy żółtej otrzymanej z tej syntezy jest efektem fizjologicznym. Również wrażenie bieli jest efektem fizjologicznym wywołanym odbiorem przez oko fotonów wszystkich barw widma słonecznego.

138. Na czym polega addytywne uzyskiwanie barw, a na czym substraktywne?

Odp.: Addytywne uzyskiwanie barw pośrednich to dodawanie barw np. poprzez nałożenie barwnych wiązek światła rzutowanych na biały ekran. I tak np. z połączenia barwy zielonej z czerwoną uzyskamy barwę żółtą; z połączenia barwy niebieskiej i czerwonej – fiolet, a z połączenia zielonej, czerwonej i niebieskiej uzyskamy biel. Substraktywne uzyskiwanie barw następuje w wyniku ich odejmowanie – np. poprzez przepuszczenie światła przez barwne filtry. Stosując trzy odpowiednio dobrane barwne filtry sprawimy, że światło białe nie przejdzie przez nie. Otrzymamy zatem na ekranie czerń.

139. Ile jest barw w widmie ciągłym światła słonecznego?

Odp.: Nieskończenie wiele, bo każdej długości (częstotliwości) fali odpowiada inna barwa. Z tym, że nasze oko odróżnia przede wszystkim tzw. barwy podstawowe: czerwoną, żółtą, niebieską i fioletową.

140. Czy prawa fizyczne uległyby zmianie, gdyby zamienić znaki ładunków?

Odp.: Nie. Najwyżej niektóre reguły uległyby zamianie – np. reguła lewej dłoni na regułę dłoni prawej.[1]

141. Skąd wiemy, że materia w całym Kosmosie jest taka sama i podlega tym samym prawom, które nie ulegają zmianie w czasie?

Odp.: O tym, że materia w kosmosie jest taka sama i rządzą nią te same i niezmienne w czasie prawa, świadczy m.in. to, że widma odległych gwiazd są takie same, jak widma gwiazd bliskich. A wiadomo, że światło od gwiazd odległych dociera do nas nierzadko po wielu milionach lat.

142. Jakich informacji o gwieździe dostarcza nam jej widmo?

Odp.: Są to następujące informacje:

1) o temperaturze; informuje o tym natężenie poszczególnych barw w widmie (prawo Wiena);
2) o składzie chemicznym fotosfery; informuje o tym rozkład i natężenie linii widmowych (analiza widmowa);
3) o ruchu gwiazdy względem obserwatora; informuje o tym dopplerowskie przesunięcie linii widmowych;
4) o rotacji gwiazdy; informuje o tym poszerzenie linii widmowych;
5) o ewentualnym występowanie układu podwójnego wraz z okresem obiegu jego składników; informuje o tym okresowe przesunięcia dopplerowskie linii widmowych.

143. Czy odbierane przez nasze zmysły wrażenia są adekwatne do fizycznych bodźców?

Odp.: Tak. A świadczy o tym fakt, że poprawnie na nie reagujemy. Podobnie jest i z innymi organizmami żywymi, co umożliwia im zarówno przetrwanie jak i przystosowywanie się do nowych warunków. Wprawdzie odbiór ten nie zawsze jest dostatecznie precyzyjny, ale do dokładnych badań służą nam odpowiednie przyrządy pomiarowe, dzięki czemu możemy poznawać otaczającą nas rzeczywistość i formułować prawa nią rządzące.

144. Jaki wybrać czas jako całoroczny, zimowy czy letni?

Odp.: Podobno Polacy wybrali letni. Powinniśmy jednak wiedzieć, że 14 grudnia w **czasie zimowym** słońce w Przemyślu wschodzi o 7^{17}, a w Szczecinie o 8^{08}. Gdyby przyjąć **czas letni**, to w Przemyślu słońce wschodziłoby wówczas o 8^{17}, a w Szczecinie o 9^{08}. Zapewne lekcje w szkołach należałoby rozpoczynać o 9^{00}. Dodam, że przed zmianami

[1] Znaki te ustalił B. Franklin, obserwując iskrę elektryczną, która przeskakiwała pomiędzy ciałami naelektryzowanymi. Nie wiedział jednak, że iskra jest paczką dodatnio naładowanych jonów powstałych w powietrzu, a nie elektrycznością wydobywającą się z naelektryzowanego ciała.

eprasa.pl 02d20e786f

czasu obowiązywał czas zimowy. Jest on naturalnym czasem dla tej strefy czasowej, w której się znajduje Polska. Południkiem środkowym tej strefy jest południk 7,5 st., który biegnie mniej więcej wzdłuż dolnej Odry.

145. Jak długo zachodzi Słońce?

Odp.: Średnica kątowa słońca wynosi $0{,}5^0$. Obrót Ziemi o ten kąt trwa 2 minuty. Tak jest na równiku w dniach równonocy wiosennej i jesiennej. W tych dniach na 50^0 szer. geogr. (Polska) trwa ono $2/\cos 50^0 \approx 3$ min. W czasie przesilenia letniego będzie to 2,2 min, a w czasie przesilenia zimowego 7 min. Dotyczy to zachodu Słońca za horyzont zbliżony do horyzontu astronomicznego.

146. Ile razy nasz cień w zimowe południe jest dłuższy od tego letniego?

Odp.: W grudniu nasz cień jest 12 razy dłuższy niż w czerwcu. Wartość ta jest równa stosunkowi tangensów kątowych wysokości słońca na niebie. Należy o tym pamiętać, budując zegar słoneczny!

147. Jaka jest maksymalna i minimalna wysokość horyzontalna Słońca na danej szerokości geograficznej?

Odp.: Wysokość ta zawiera się pomiędzy $[90 - (\varphi + \varepsilon)]$ a $[90 - (\varphi - \varepsilon)]$, gdzie φ jest szerokością geograficzną danej miejscowości zaś ε jest szerokością geograficzną zwrotników. Zatem dla Krakowa leżącego na 50^0 szer. geogr. będzie to pomiędzy $16{,}5^0$ w dniu przesilenia zimowego a $63{,}5^0$ w czasie przesilenia letniego.

148. A jak wysoko Księżyc może „wędrować" po niebie?

Odp.: Ponieważ płaszczyzna orbity Księżyca jest nachylona pod kątem 5^0 do płaszczyzny orbity Ziemi (ekliptyki), zatem jego wysokość horyzontalna w Krakowie może dochodzić do $68{,}5^0$. Tak się dobrze składa, że dzieje się to w Zimie, kiedy mamy niedobór światła dziennego. Natomiast w lecie osiąga tam wysokość zaledwie $11{,}5^0$. I tu pozwolę sobie na żarcik: Pani w pewnym przedszkolu zapytała dzieci: „Co jest ważniejsze – Słońce, czy Księżyc?" Jeden z przedszkolaków stwierdził: „Księżyc, bo świeci wtedy, gdy jest ciemno."

149. Który z kamertonów: na pudle rezonansowym, czy też trzymany za „nóżkę" dźwięczy dłużej po uderzeniu z jednakową siłą i dlaczego?

Odp.: Dłużej dźwięczy ten trzymany w ręku, bo emituje dźwięk z mniejszą mocą.

150. Jaki jest stosunek energii kinetycznej ciał o tej samej masie poruszających się z II i I prędkością kosmiczną?

Odp.: Ponieważ druga prędkość kosmiczna jest $\sqrt{2}$ razy większą od pierwszej, zatem energia kinetyczna ciała poruszającego się z II prędkością kosmiczną jest dokładnie dwa razy większa niż z pierwszą.

151. Dlaczego kropla wody, która spadła na rozżarzona płytę nie odparowuje natychmiast, lecz przez jakiś czas po niej „tańczy" sycząc?

Odp.: Bo otacza się parą, która izoluje ją od płyty.

152. Czy to prawda, że elektrony nie opuszczają spirali żarówki w czasie jej świecenia?

Odp.: Prawda. W przypadku prądu zmiennego, oprócz ruchu chaotycznego, wykonują one jedynie drgania z częstotliwością prądu. Amplituda tych drgań jest bardzo mała zważywszy, że prędkość ich przemieszczania się nie przekracza 1mm/s, a częstotliwość prądu jest równa 50 Hz.

Waldemar Reńda
Olkusz

Uwaga!

Wydanie specjalne w postaci pliku PDF

150 pytań i doświadczeń

można zamówić wypełniając i wysyłając formularz, który znajduje się na stronie

www.aspress.com.pl/specjalne/

eprasa.pl 02d20e786f

Zobaczyć osobliwość czarnej dziury i przeżyć

Grzegorz **Koczan**[1]

Parafrazując powiedzenie rozsławione przez Goethego „zobaczyć Neapol i umrzeć" autor zaprasza nas na znacznie bardziej egzotyczną i niebezpieczną wycieczkę, która fizycznie nie miałaby prawa zakończyć się powrotem czy też przeżyciem. Jednak matematyka i geometria zanurzeniowa 3D daje nam tanie bilety w obie strony na taką wycieczkę. Chodzi zatem o plastyczną, ale ścisłą wizualizację, a nie o analizę efektów fizycznych takich jak siły pływowe, które podczas takiej podróży byłyby bardziej zabójcze od neapolitańskich infekcji. Główna trudność polega na zajrzeniu pod horyzont czarnej dziury, który skrywa osobliwość i pod którym czas i przestrzeń zamieniają się niejako miejscami. Śmiałkowie będą mogli nawet spróbować przekroczyć samą osobliwość lub ją obejść. Zatem chcemy zobaczyć to samo, a nawet więcej niż pokazali nam laureaci Oscara za efekty specjalne w filmie Interstellar z 2014, w którym konsultantem był późniejszy laureat nagrody Nobla z 2017 Kip Thorne.

Słowa kluczowe: czarna dziura; białe dziury typu 0, I, II, III; paraboloid Flamma, most Einsteina-Rosena, antygrawitacja.

Key words: black hole; white holes 0, I, II, III type; Flamm paraboloid, Einstein-Rosen bridge, antigravity.

Wstęp

Wypada rozpocząć od zapisania twierdzenia Pitagorasa dla kwadratu długości trójwymiarowego wektora przemieszczenia:

$$\Delta r^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 \tag{1}$$

Ściśle rzecz ujmując należy stwierdzić, że ten wzór dla trzech wymiarów wynika z dwukrotnego użycia zwykłego twierdzenia Pitagorasa dla odpowiednich trójkątów prostokątnych. Najważniejsze jest tu jednak to, że niektóre relacje wyglądają podobnie w różnej liczbie wymiarów. Jest to ważna informacja, gdyż już szczególna teoria względności odwołuje się do czwartego wymiaru jakim jest czas. Geometryczne wyobrażenie czwartego wymiaru stanowi dla człowieka naturalną trudność, ale czerpanie z pewnych analogii lub rzutowanie na 3D pozwala ją w pewien sposób rozwiązywać. Jednak czwarty wymiar jakim jest czas różni się od wymiarów przestrzennych tzw. znakiem sygnatury. Oznacza to, że długość czterowymiarowego przemieszczenia zwanego interwałem czasoprzestrzennym zawiera minus dla czasu:

$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - c^2\Delta t^2 = \Delta r^2 - c^2\Delta t^2 \tag{2}$$

Niekiedy interpretuje się ujemną sygnaturę wymiaru czasowego w kategoriach wymiaru czysto urojonego wykorzystując własność jednostki urojonej $i^2 = -1$. Podejście takie formalnie rozwiązuje problem minusa, ale tworzy inne trudności i to nie tylko związane z brakiem liczb zespolonych w programie szkoły średniej. Zatem odwołanie się do liczb urojonych ma tutaj jedynie charakter pewnej interpretacji, która tylko niekiedy przybiera na intensywności (np. w modelu Hawkinga Wszechświata bez brzegu w czasie urojonym albo w zaawansowanych metodach matematycznych [24]).

Formuła (1) określa dobrze znaną geometrię euklidesową, zaś formuła (2) geometrię pseudoeuklidesową (pseudoriemanowską) czasoprzestrzeni Minkowskiego. Oba opisy geometrii są jeszcze proste, gdyż opisują płaską przestrzeń za pomocą kartezjańskich współrzędnych. Do opisu czarnej dziury potrzebna jest miara małych odległości, zwana metryką, która będzie uwzględniała zakrzywienie czasoprzestrzeni. W dużym uproszczeniu polega to na tym, że w formule typu (2) lub (1) zamiast współczynników jednostkowych przy poszczególnych kwadratach będą występowały pewne funkcje współrzędnych. Te funkcje właśnie opisują pole grawitacyjne oraz zakrzywienie czasoprzestrzeni. W przypadku masy M jako źródła pola grawitacyjnego metryka Schwarzschilda, z pominięciem części kątowej[2], ma postać:

$$\Delta s^2 = \frac{\Delta r^2}{1 - R_S / r} - (1 - R_S / r)c^2\Delta t^2 \quad \text{dla} \quad r > R_S \tag{3}$$

gdzie $R_S = 2GM / c^2$ jest promieniem Schwarzschilda horyzontu czarnej dziury. Dla uproszczenia wzór (3) uwzględnia tylko współrzędną radialną z trzech współ-

[1] gkoczan@fuw.edu.pl, WTD SGGW, Katedra Nauki o Drewnie i Ochrony Drewna, Katedra Fizyki.

[2] Kątowy dwuwymiarowy dodatek do metryki ma postać identyczną jak w płaskiej przestrzeni $r^2\Delta\theta^2 + r^2\sin^2\theta\,\Delta\varphi^2$ i stanowi implicite domyślny wkład do wszystkich metryk niniejszego artykułu. Wykresy zanurzeniowe 3D obejmują tylko drugą część tego dodatku w postaci $r^2\Delta\varphi^2$. Nie umniejsza to istotnie ścisłości i ogólności rozważań, gdyż zanurzeniowe ujęcie przestrzennej części metryki w 4D opisane jest taką samą formułą (4), ale po prostu nie da się go narysować. Można to jednak opisać we współrzędnych hipersferycznych [30]: $y = \rho\cos\psi$, $y = \rho\sin\psi\cos\theta$, $y = \rho\sin\psi\sin\theta\cos\varphi$, $y = \rho\sin\psi\sin\theta\cos\varphi$. Wystarczy w ogólnym przypadku przyjąć $r = \rho\sin\psi$, zaś dla mniej wymiarowego zanurzenia dodatkowo $\theta = \pi/2$. Natomiast przedstawienia zanurzeniowe bezpośrednio całej czasoprzestrzeni Schwarzschilda (włączając czas) też są podejmowane przez fizyków np. w sześciu wymiarach o różnych znakach sygnatury [20].

eprasa.pl 02d20e786f

rzędnych przestrzennych (pomija kąty). Dzięki temu wzór ten przypomina bardziej (2) oraz zawiera tylko dwa wymiary (jeden przestrzenny oraz czas). W skrócie umożliwia to analizowanie zakrzywionej przestrzeni niższego wymiaru w zanurzeniu w dobrze znanej geometrii euklidesowej 3D lub w trochę trudniejszej pseudoeuklidesowej 3D. Innymi słowy idea zanurzenia pozwala na wprowadzenie wewnętrznej metryki typu (3) w ramach zwykłej metryki zewnętrznej typu (1) lub (2).

Osobom poszukującym podstaw szczególnej, a także ogólnej teorii względności bez użycia pojęcia metryki można polecić rozdziały starych licealnych podręczników [23, 7].

Czasoprzestrzeń na zewnątrz horyzontu ($r > R_S$)

Na początku zobaczymy, jak można wizualizować radialną część metryki (3) w euklidesowym ujęciu (1). W tym celu rozważmy równanie ramienia odpowiednio dobranej paraboli, po raz pierwszy opisanej w 1916 r. przez Flamma [5] (Rys. 1):

$$r = \frac{1}{4R_S} y^2 + R_S \qquad \text{dla} \qquad y \geq 0 \tag{4}$$

Mały przyrost wartości takiej funkcji wyraża się następująco:

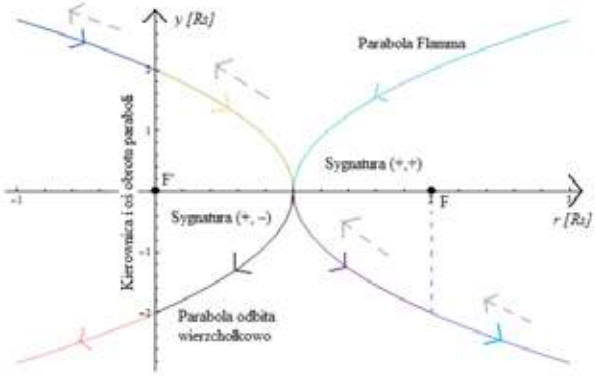
$$\Delta r = \frac{(y+\Delta y)^2 - y^2}{4R_S} = \frac{2y\Delta y + \Delta y^2}{4R_S} \cong \frac{y\Delta y}{2R_S} \tag{5}$$

przy czym został tu pominięty bardzo mały przyrost drugiego rzędu. Równanie to umożliwia wyrażenie przyrostu Δy za pomocą przyrostu współrzędnej radialnej Δr. Można teraz obliczyć kwadrat elementu długości paraboli $\Delta\rho$ z twierdzenia Pitagorasa:

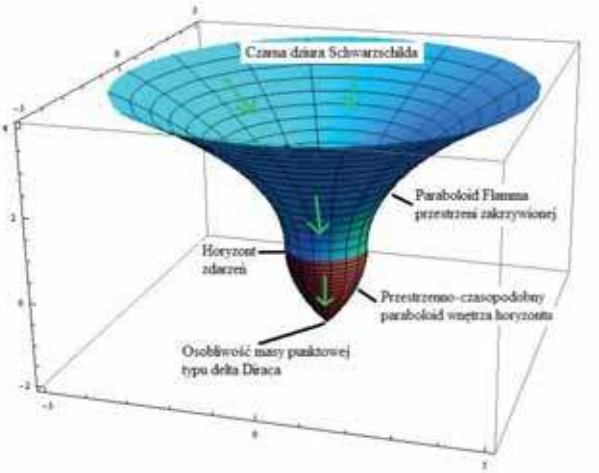
$$\Delta\rho^2 = \Delta r^2 + \Delta y^2 = \Delta r^2 + \frac{R_S \Delta r^2}{r - R_S} = \frac{\Delta r^2}{1 - R_S / r} \tag{6}$$

co rzeczywiście pokrywa się z radialną częścią metryki Schwarzschilda (3). Obrócenie paraboli (4) wokół jej kierownicy, czyli osi y tworzy tzw. paraboloid Flamma, który indukuje przestrzenną część całej metryki nad horyzontem (Rys. 2). Ściśle to indukuje on metrykę dwóch z trzech wymiarów przestrzennych, jednak sytuacja byłaby analogiczna dla trzech wymiarów przestrzennych zanurzonych w czterowymiarowej przestrzeni euklidesowej. Paraboloid Flamma jest dość naturalną powierzchnią opartą na paraboli. Mimo to nie należy go mylić z paraboloidą obrotową ani z inną powierzchnią drugiego stopnia, gdyż jest on powierzchnią czwartego stopnia.

Okazuje się, że również w prosty sposób możemy odtworzyć czasową część metryki. W tym celu wystarczy założyć, że przyrostowi czasu własnego $\Delta\tau$ wraz z przyrostem długości rzeczywistej $\Delta\rho$ można przypisać taki sam przyrost abstrakcyjnego pola powierzchni co we współrzędnych wyjściowych:



Rys. 1. Wykres paraboli Flamma oraz jej wierzchołkowego odbicia. Połowa ramion tych parabol jest zanurzona w zwykłej geometrii euklidesowej (górne albo nieodbite), a reszta w geometrii pseudoeuklidesowej (Minkowskiego, ramiona dolne albo odbite). Cały artykuł opiera się na tych parabolach. Rosnące fragmenty parabol dla r>0 kodują metrykę Schwarzschilda na zewnątrz i wewnątrz horyzontu czarnej dziury. Fragmenty malejące parabol oraz fragment dla r<0 są podstawą uogólnień do tzw. białych dziur kilku rodzajów. Zaznaczony jest zwrot ciążenia grawitacyjnego (w różnych przypadkach) oparty na analizie równań geodezyjnych wykonanej przez autora artykułu.



Rys. 2. Przedstawienie geometrii przestrzeni zakrzywionej czarnej dziury w ujęciu zanurzeniowym w przestrzeni euklidesowej (paraboloid Flamma) lub pseudoeuklidesowej (paraboloid wewnętrzny).

$$\Delta\rho \cdot c\Delta\tau = \Delta r \cdot c\Delta t \tag{7}$$

Skąd wyliczamy już szukany czas własny i uwzględniając sygnaturę jego wkład do metryki (3):

$$-c^2\Delta\tau^2 = -\frac{\Delta r^2}{\Delta l^2} c^2 \Delta t^2 = -(1 - R_S / r) c^2 \Delta t^2 \tag{8}$$

Jak widać warunek (7) oznacza w praktyce, że współczynnik w czasowej części metryki jest pomijając znak równy odwrotności współczynnika w części przestrzennej. Znak minus jest cechą wymiaru czasowego wynikającą z przyjętej sygnatury i natury czasu. Zatem wyrażenia (6) i (8) rekonstruują metrykę Schwarzschilda (3) na zewnątrz horyzontu.

Powyższe ujęcie zanurzeniowe na zewnątrz horyzontu było już prezentowane przez autora w pracy [13]. Teraz zaś nasza wycieczka zapuszcza się głębiej na drugą stronę horyzontu.

eprasa.pl 02d20e786f

Czasoprzestrzeń wewnątrz horyzontu ($0< r< R_S$) oraz za horyzontem zdarzeń ($y< 0$, $r> R_S$)

Okazuje się, że metryka Schwarzschilda mimo, że nie jest określona dla $r=R_S$ to jednak zachowuje pewien sens dla $r<R_S$. Problem polega między innymi na tym, że zmienia się sygnatura współrzędnych r i ct z (+,–) na (–,+). Oznacza to, że teraz r ma charakter współrzędnej czasu pomnożonej przez prędkość światła, a ct pełni rolę współrzędnej przestrzennej. Pamiętając o tej różnicy można przepisać metrykę Schwarzschilda w praktycznie niezmienionej formie dla wnętrza horyzontu:

$$\Delta s^2 = -\frac{\Delta r^2}{R_S / r - 1} + \left(R_S / r - 1\right)c^2 \Delta t^2 \quad \text{dla} \quad 0 < r < R_S \quad (9)$$

Zamiana ról radialnej współrzędnej przestrzennej z czasem wynika z nieistnienia układów odniesienia, które mogłyby fizycznie utrzymać się na stałej „wysokości". W rzeczywistości każdy z dwóch promieni światła (dwóch fotonów) poruszających się z przeciwnymi zwrotami (w sensie składowej przestrzennej) na ogólnie pojętym kierunku radialnym będzie oddalał się od horyzontu i przemieszczał w kierunku osobliwości – innymi słowy jest na nią skazany (patrz Rys. 7a)[3]. Z tego powodu fizycy zwyczajowo nie stosują współrzędnych Schwarzschilda pod horyzontem jak w (9), ale je redefiniują. Najbardziej znaną redefinicją i uogólnieniem są współrzędne Kruskala-Szekeresa lub nieco mniej znane współrzędne Lemaître (albo jeszcze inne i nieortogonalne). Jednak warto wiedzieć, że zabieg zmiany współrzędnych nie jest niezbędny. Wystarczy tutaj zauważyć, że użycie nowych współrzędnych jest tylko przepisaniem metryki (3) lub (9) dla nowych zmiennych, gdy metryka w starych zmiennych była dobrze określona (poza osobliwością i horyzontem). Jedynym kłopotem starych zmiennych jest interpretacja fizyczna, ale nie określoność matematyczna poza horyzontem.

Niezależnie od użytych współrzędnych znak sygnatury danego kierunku czasoprzestrzennego musi być określony jako: przestrzennopodobny (+) albo czasopodobny (–) albo światłopodobny (0). Analogicznie wycinek obszaru powierzchni może być: przestrzennopodobny (+,+) albo przestrzenno-czasopodobny (+,–) lub (–,+) albo światłopodobny (0,+) lub (+, 0). Warto zatem pokusić się o pewną roboczą obserwację czym jest granica obszarów powierzchni o różnych sygnaturach. Właśnie taką niezwykłą granicą może być horyzont zdarzeń, gdy sygnatura zmienia się z (+,+) na (+,–) lub (–,+) albo w drugą stronę.

Własność zmiany sygnatury może zachodzić również dla wielu przypadkowych powierzchni, ale w uproszczeniu współrzędne Schwarzschilda wyznaczają pewne szczególne kierunki i powierzchnie. Wynika to z faktu, że są one blisko powiązane z współrzędnymi w płaskiej przestrzeni zanurzenia. Zatem powyższe uproszczone robocze kryterium rozpoznawania horyzontów jest wystarczające na potrzeby nieniejszego artykułu.

Oprócz najbardziej znanego horyzontu nierotującej czarnej dziury (Rys. 2) znany jest również drugi mały horyzont rotującej czarnej dziury, który został schematycznie uwzględniony na rys. 5. Ponadto inny duży osobliwy horyzont pojawia się na pewnym nowym paraboloidzie tutaj rozpatrywanym (Rys. 3b). Ten blado-purpurowy paraboloid (wraz z jego żółtym wnętrzem) będzie tutaj nazywany białą dziurą I rodzaju.

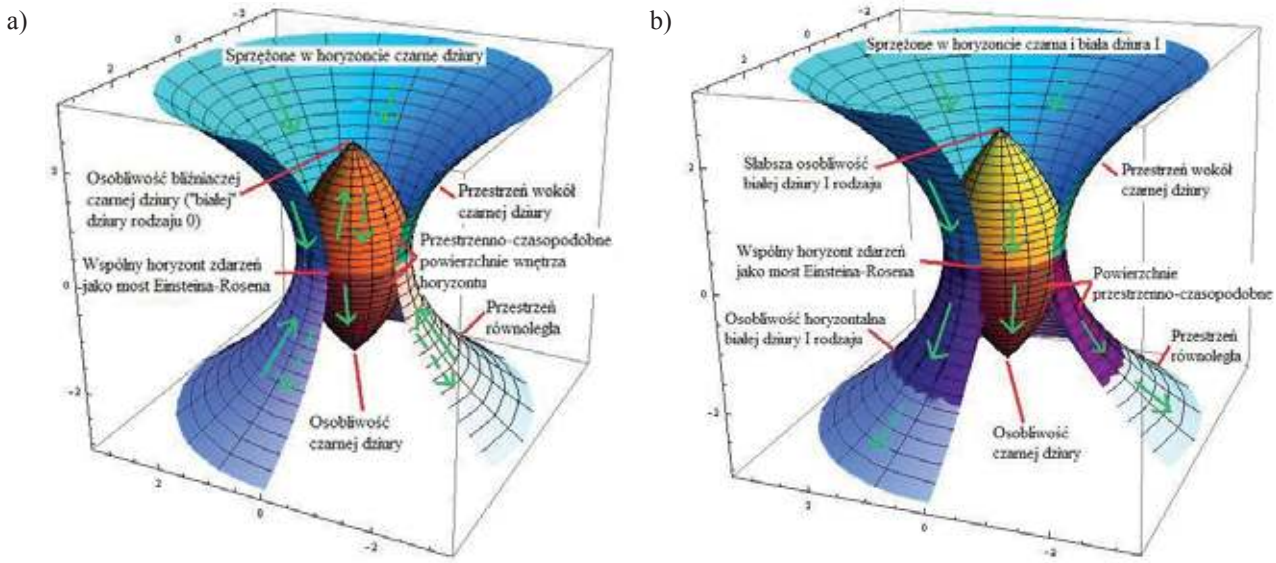
Purpurowa część tej białej dziury przypomina w skali 2:1 model powłoki antygrawitacyjnej opisanej przez polskiego fizyka Zbigniewa Osiaka [19] (patrz przypis „[3]"). Podobieństwo dotyczy dwóch powierzchni charakterystycznych (tutaj dwóch horyzontów, w tym jednego osobliwego), a przede wszystkim antygrawitacji, która między tymi powierzchniami występuje. Antygrawitacja to działająca odśrodkowo siła grawitacji w układzie quasistatycznym, a obiekty wykazujące taką własność nazywane są białymi dziurami bez cudzysłowu. Obecność cudzysłowu w określeniu „białej" dziury świadczy, że dany obiekt był kandydatem na białą dziurę, ale ostatecznie się nią nie okazał.

Najlepszym kryterium określającym zwrot siły grawitacji i tym samym kryterium rozstrzygającym obecności antygrawitacji jest analiza równań ruchu, czyli równań linii geodezyjnych dla danej metryki. Przystępnie zapisane takie równania dla przypadku sferycznej symetrii można znaleźć na stronach internetowych [29, 28]. Wynik tych analiz zaznaczony jest na wszystkich ilustracjach (Rys. 1–7) na pomocą zielonych strzałek lub kolorowych na rys. 1. Istnienie zjawiska antygrawitacji dostarcza obok pojęcia horyzontu swoistej koncepcji ukrywania osobliwości. Można to sformułować w kategoriach pewnej modyfikacji osłabiającej hipotezę kosmicznej cenzury Penrose'a:

Przyroda nie lubi silnej osobliwości i albo zakrywa ją horyzontem zdarzeń albo tworzy wokół niej antygrawitację, która ją osłabia i czyni niestabilną.

[3] Możliwa jest jeszcze przeciwna orientacja strzałki czasu jak to ma rzekomo miejsce w obszarze „białej" dziury rozszerzenia Kruskala-Szekeresa. Zdaniem autora taka orientacja jest sprzeczna z równaniami geodezyjnych (oraz zwrotem wyznaczonym przez zamykające się stożki we współrzędnych Schwarzschilda), gdyż wnętrze horyzontu najwyraźniej fizycznie preferuje określoną orientację spośród dwóch dostępnych i zgodnych z metryką. Zupełnie osobnym zabiegiem jest redefinicja znaku metryki, tylko pod horyzontem, co zostało zaproponowane w pracy [19]. Taka drastyczna ingerencja zmieniłaby w sensie dwuwymiarowym (r, t) stożki na ich dopełnienia. Wówczas wybór stożka przyszłości byłby niezależny od zwrotu grawitacji, choć naturalny byłby wybór dla $t>0$. Zwrot wyznaczony przez zamykające się stożki (dopełnienia stożków z Rys. 7a) tutaj również byłby zgodny ze zwrotem wynikającym z równań geodezyjnych, ale miałby charakter antygrawitacyjny od osobliwości do horyzontu. Niestety słabością takiej redefinicji znaku metryki jest naruszenie implicite sygnatury współrzędnych kątowych. Zatem albo narusza to próżniowe równania Einsteina albo dostajemy trzy współrzędne czasowe i jedną przestrzenną. Zachodzi ten pierwszy przypadek, a we wnętrzu horyzontu rozważane jest jądro o stałej gęstości. Zatem model zasadniczo spełnia pewne niepróżniowe równania Einsteina, ale bez modyfikacji znaków sygnatury, która jest niezbędna dla występowaniaantygrawitacji dla równań ruchu. Oznacza to hybrydowy charakter modelu w kontekście równań pola i równań ruchu. Jednakże, jak zobaczymy w niniejszym artykule, antygrawitacja jest możliwa w ramach niezmodyfikowanej teorii Einsteina – nawet bez stałej kosmologicznej.

eprasa.pl 02d20e786f



Rys. 3. Przedstawienie zanurzeniowe czarnej dziury „zszytej" z „białą" lub białą dziurą w horyzoncie zdarzeń będącym mostem Einsteina-Rosena z 1935 r. [4], jakościowo nawiązujące do rozszerzenia Kruskala-Szekeresa z 1960 r. [15, 25], w przypadku: a) bliźniaczej czarnej dziury – „białej" dziury rodzaju 0 (różna sygnatura dla $r > R_S$ i $r < R_S$), b) białej dziury I rodzaju (sygnatura zanurzenia określona znakiem y). Zielone, ciągłe strzałki wskazują zwrot siły ciążenia wynikający z równań geodezyjnych, zaś strzałki przerywane mają zdaniem autora charakter spekulatywny.

Hipoteza ta ma sens klasyczny, ale nabiera też znaczenia kwantowego w kontekście tunelowania czarnej dziury do białej dziury opisanego przez Haggarda i Rovelli'ego [8].

Model powłoki antygrawitacyjnej Osiaka [19] przypomina pojęcie grawastaru Mazura-Mottoli [16] i temu podobne twory teoretyczne takie jak gwiazda Plancka [22] lub ciężka fotosfera czarnej dziury [14], czy też koncepcja ściany ognia (firewall) [1]. Na mocy powyżej przytoczonych źródeł można nawet pokusić się o stwierdzenie, że obiekty te to polsko-włoska specjalność[4]. Kontekst rozważań większości tych obiektów jest związany z entropią typu Bekensteina-Hawkinga czarnych dziur. Zarówno koncepcja grawastaru i fotosfery czarnej dziury modyfikują entropię i temperaturę czarnej dziury. Jednym z kontrargumentów wobec tych obiektów jest problem ich stabilności w przypadku rotacji. Kontrargumenty tej samej natury wytacza się przeciwko białym dziurom [6, 8, 21]. Wypada jednak wiedzieć, że Układ Słoneczny też posiada teoretyczne cechy układu niestabilnego, a mimo to trwa miliardy lat. W każdym razie w dalszej części artykułu trzeba będzie ustalić czy biała dziura I rodzaju spełnia równania Einsteina jak ma to miejsce w przypadku czarnej dziury.

Wróćmy jeszcze do właściwego wnętrza zwykłej czarnej dziury (brązowa powierzchnia na rys. 2–6). W celu zanurzeniowego odtworzenia radialnej części metryki (9) rozważmy ramię paraboli (Rys. 1) będące odbiciem względem wierzchołka ramienia paraboli Flamma (4):

$$r = R_S - \frac{1}{4R_S} y^2 \qquad \text{dla} \qquad y \le 0 \tag{10}$$

Relacja między przyrostami zmiennych ma tutaj postać analogiczną do (5):

$$\Delta r \cong -\frac{y\Delta y}{2R_S} \tag{11}$$

Uwzględniając efektywnie ujemną sygnaturę zmiennej radialnej, będącą konsekwencją minusowej sygnatury ujemnej półosi y, możemy obliczyć odpowiadający jej interwał fragmentu paraboli, czyli jego część radialną na paraboloidzie:

$$-\Delta\rho_*^2 = \Delta r^2 - \Delta y^2 = \Delta r^2 - \frac{R_S \Delta r^2}{R_S - r} = -\frac{\Delta r^2}{R_S / r - 1} \tag{12}$$

Gwiazdka przy metrycznej zmiennej radialnej ρ_* przypomina, że teraz ta zmienna jest czasopodobna niczym wcześniej $c\tau$. Jak widać dla osiągnięcia zamierzonego celu to bezpośrednio zmienna y dla $y \le 0$ ma teraz sygnaturę ujemną, a więc naturę czasu. Zaś zmienna radialna r w zewnętrznej geometrii ma sygnaturę dodatnią, ale na paraboli (10) zmienia efektywnie znak na sygnaturę ujemną zmiennej ρ_*. Ma to istotne znaczenie ułatwiające interpretacje w ujęciu zanurzeniowym. Ze względu na zgodność z (9) możemy analogicznie jak wcześniej obrócić część nowej paraboli względem osi y. W ten sposób uzyskamy nowy brązowy paraboloid domykający otwór w paraboloidzie Flamma (Rys. 3). Ten paraboloid wewnętrzny ma istotnie odmienną geometrię od zewnętrznego, gdyż przez ujemną sygnaturę stanowi powierzchnię przestrzenno-czasopodobną.

Drugą formalnie przestrzenną część metryki (opisywaną przez analogię nieco myląco parametrem przypominającym czas własny τ_*), podobnie jak wcześniej można uzyskać z warunku równości abstrakcyjnych pól:

$$\Delta\rho_* \cdot c\Delta\tau_* = \Delta r \cdot c\Delta t \tag{13}$$

[4] Przy czym sama koncepcja ściany ognia została wprowadzona przez Amerykanów w roku akademickim 2012/2013 jako propozycja rozwiązania tzw. paradoksu informacyjnego czarnej dziury.

eprasa.pl 02d20e786f

skąd mamy:

$$c^2\Delta\tau_*^2 = \frac{\Delta r^2}{\Delta\rho_*^2}c^2\Delta t^2 = (R_S/r-1)c^2\Delta t^2 \qquad (14)$$

Wkłady metryki (12) i (14) razem budują metrykę brązowego wnętrza horyzontu czarnej dziury (9). Metryka częściowo już dyskutowanej białej dziury I rodzaju będzie opisana dalej. Natomiast jej alternatywna wersja określana tutaj mianem „białej" dziury rodzaju 0 (blado-pomarańczowe paraboloidy na Rys. 3a) jest w sensie matematycznym przystająca do czarnej dziury i ma taką samą metrykę jak ona. Warto wiedzieć, że jej bladą część ($r > R_S$) rozważali w 1935 r. Einstein i Rosen [4]. Ich analiza nie miała charakteru graficznego, ale algebraiczny polegający na dopuszczeniu ujemnych wartości pewnej zmiennej u proporcjonalnej do $y = 2R_S u$. Wówczas horyzont ($y = u = 0$, czyli $r = R_S$) pełnił rolę bramy z jednej czasoprzestrzeni do drugiej (Rys. 3). Bramę tę nazywamy dzisiaj mostem Einsteina-Rosena i przedstawia się ją często w formie wydłużonego tunelu (Rys. 4a). Generalnie przekroczenie horyzontu czarnej dziury powinno prowadzić do jego wnętrza, czyli brązowego paraboloidu. Jednak możliwość traktowania horyzontu jako bramy daje hipotetyczną możliwość przejścia za horyzont w inny sposób niż do jego wnętrza. Alternatywną drogą może być „biała" dziura rodzaju 0 rozważana przez Einsteina i Rosena albo rozważana tutaj biała dziura I rodzaju. Ze względu na antygrawitację przejście do białej dziury I rodzaju wydaje się być bardziej prawdopodobne.

Obliczenie promienia i objętości wnętrza horyzontu

Znamy już metrykę wnętrza czarnej dziury, a nawet udało się ją zwizualizować w 3D. Zatem czemu nie policzyć rzeczywistych parametrów geometrycznych horyzontu takich jak promień oraz objętość? Otóż, mimo że obwód ($2\pi R_S$) oraz powierzchnia ($4\pi R_S^2$) horyzontu są trywialną konsekwencją definicji parametru radialnego, *to oblicz*enie odległości horyzontu od osobliwości nastręcza pewnych trudności, nie tylko rachunkowych. Problem polega na tym, że odcinek radialny paraboloidu od horyzontu do osobliwości jest czasopodobny, więc licząc jego interwał policzymy jakby czasowy promień horyzontu, a nie zwykły promień przestrzenny. Fakt ten stanowiłby duży problem, gdyby wyniku nie udało się potwierdzić inną metodą opartą na części przestrzennej metryki. Całe szczęście istnieje taka metoda oparta na promieniu światła, który porusza się radialnie od horyzontu do osobliwości. Musimy tylko wiedzieć, że światło porusza się po liniach o zerowym interwale (9):

$$\Delta s^2 = 0 \qquad \Rightarrow \qquad (R_S/r-1)c^2\Delta t^2 = \frac{\Delta r^2}{R_S/r-1} \qquad (15)$$

Równanie to pokazuje, że przestrzenna część długości przebytej przez światło jest równa co do wartości bezwzględnej czasopodobnej części miary trajektorii światła. Innymi słowy spełniony jest wzór na ruch jednostajny światła:

$$c^2\Delta\tau_*^2 = c^2\frac{\Delta\rho_*^2}{c^2} \qquad \Leftrightarrow \qquad \Delta\rho_* = c\Delta\tau_* \qquad (16)$$

Jak widzimy relacja ta uwzględnia zamianę miejscami czasu i przestrzeni (stąd nietypowy zapis lewej równości). Ponadto relacja, która obowiązuje lokalnie w pewnym sensie powinna być spełniana globalnie. Zatem formuła na promień horyzontu czarnej dziury jest sumowaniem (całkowaniem) przyrostów $\Delta\rho_*$ lub równoważnie $c\Delta\tau_*$:

$$R = cT = \int_0^{R_S}\frac{dr}{\sqrt{R_S/r-1}} = \frac{\pi}{2}R_S \approx 1{,}57R_S \qquad (17)$$

Wartość numeryczną całki można sprawdzić na portalu Wolfram Alpha wpisując w okno dialogowe: „integrate(1/(1/x-1)^0.5, x, 0, 1)". Okazało się zatem, że metryczny promień horyzontu czarnej dziury jest większy od promienia Schwarzschilda R_S aż o 57%.

W celu wyznaczenia objętości horyzontu wystarczy zsumować (scałkować) objętości powłok sferycznych o polach $4\pi r^2$ i grubościach $\Delta\rho_*$:

$$V = \int_0^{R_S}\frac{4\pi r^2 dr}{\sqrt{R_S/r-1}} = \frac{5}{4}\pi^2 R_S^3 = \frac{15\pi}{16}\cdot\frac{4}{3}\pi R_S^2 \approx 2{,}95V_E \qquad (18)$$

Współczynnik pierwszej formy zapisu wyniku możemy sprawdzić poleceniem „integrate(4*π*r2/(1/x-1) 0.5, x, 0, 1)". Jak widzimy objętość wnętrza horyzontu jest prawie 3 razy większa od objętości kuli euklidesowej.

Można teraz zapytać czy „biała" dziura ma taki sam promień i objętość rzeczywistą. Dziura bliźniacza (Rys. 3a, Rys. 4a) będzie miała identyczne parametry, ale biała dziura I rodzaju (Rys. 3b) o sygnaturze zanurzenia (+,+) wnętrza horyzontu będzie trochę większa (zgodnie z metryką (22)):

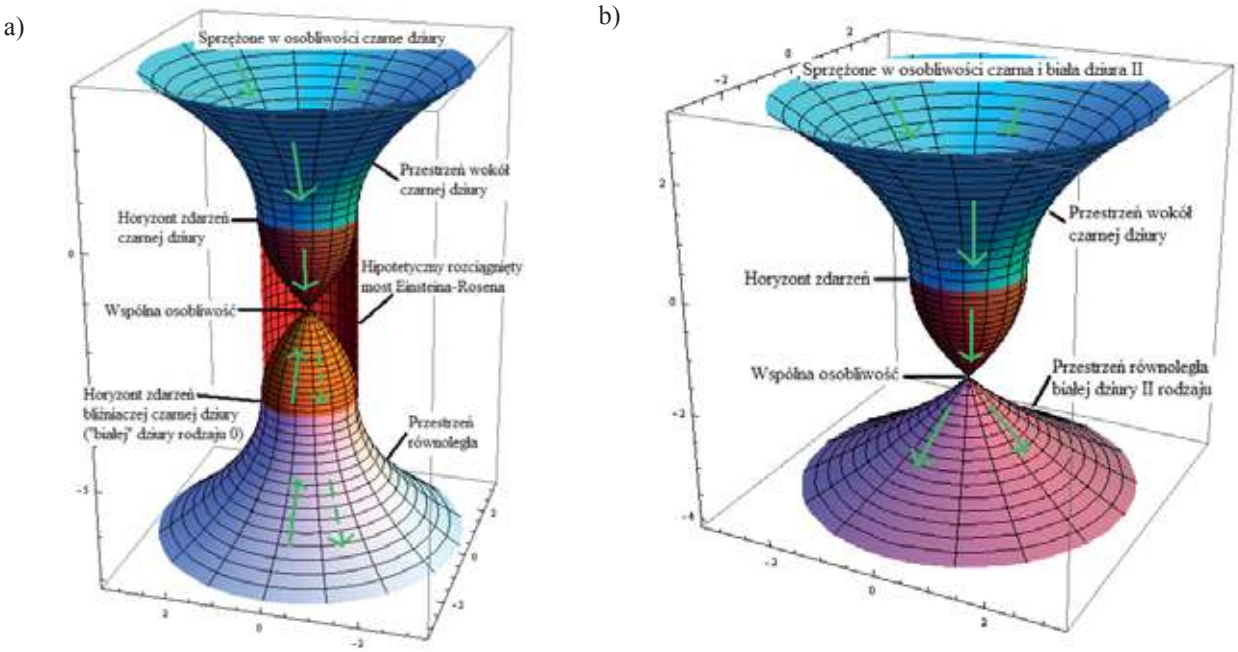
$$R^* \approx 2{,}30R_S \qquad V^* \approx 3{,}41V_E \qquad (19)$$

W zasadzie taka biała dziura I rodzaju, której zewnętrzny paraboloid Flamma zanurzony jest w sygnaturze (+,–) posiada jeszcze dodatkowy osobliwy horyzont dla $r = 2R_S$. Wynika on z nachylenia paraboli w tym punkcie pod kątem 45 stopni, co wywołuje zmianę znaku sygnatury wewnętrznej (patrz Rys. 1, Rys. 3b). Jednak nie będziemy obliczać rzeczywistego (zgodnego z metryką) promienia i objętości tego dużego horyzontu. Natomiast biała dziura II rodzaju i „biała" dziura III rodzaju (rozważane poniżej, Rys. 4b, Rys. 6) mają „nagą" osobliwość lub biegun, bez powierzchni żadnego horyzontu, a więc nie mają rozmiarów i objętości.

Dalej niż osobliwość ($r<0$)

Do tej pory przedmiot naszej geometryczno-matematycznej wycieczki miał wymierną treść fizyczną. W końcu fale grawitacyjne zderzających się czarnych dziur są już obserwowane, a w projektach Even Horizon Telescope oraz BlackHoleCam w zasadzie jest filmowane i fotografowane otoczenie horyzontu czarnej dziury naszej galaktyki. Dość powiedzieć, że ten drugi

eprasa.pl 02d20e786f



Rys. 4. Przedstawienie zanurzeniowe geometrii paraboloidów „zszytych" w osobliwości dla: a) dwóch bliźniaczych czarnych dziur – czyli czarnej dziury i „białej" dziury rodzaju 0; b) czarnej dziury i białej dziury II rodzaju.

podprojekt uzyskał budżet 14 milionów euro. Mimo, iż nasza wycieczka jest ponad 2 miliony razy tańsza (tyle co cena numeru *Fizyki w Szkole z Astronomią*), a autor jest „wolontariuszem nauki", to zabiera nas znacznie głębiej. Najpierw przekraczaliśmy granice horyzontu na różne sposoby, a teraz spróbujemy przekroczyć samą osobliwość. Ta sztuczka nie jest opisywana formalnie nawet współrzędnymi Kruskala-Szekeresa. Jednak te współrzędne zawierają w ramach rozszerzonej czasoprzestrzeni dwie bliźniacze czarne dziury. Trudno jest sobie wyobrazić, gdzie miałaby się znajdować druga czarna dziura.

Na diagramie Kruskala-Szekeresa te dwie czarne dziury oddzielone są horyzontem zdarzeń odpowiadającym „absolutnej przeszłości" (czasowi równemu minus nieskończoność). Takie analogiczne zszycie dwóch kompletów paraboloidów na horyzoncie przedstawione jest na Rys. 3. W pierwszym przypadku blado-pomarańczowa czarna dziura („biała" dziura rodzaju 0) jest całkowicie symetryczna (ewentualnie poza odbiciem czasu) do błękitno-brązowej czarnej dziury (Rys. 3a). Symetria ta jest łamana w drugim przypadku (Rys. 3b) przez sygnaturę minus ujemnej półosi y. W ten sposób żółty paraboloid jest powierzchnią przestrzennopodobną, purpurowy przestrzenno-czasopodobną, a blady ponownie przestrzennopodobną (biała dziura I rodzaju, Rys. 3b).

Można więc zadać pytanie – jaka metryka opisuje te żółto-purpurowo-blade paraboloidy? Czy przypadkiem nie da się po raz kolejny wykorzystać uogólnienia współrzędnych Schwarzschilda? Mimo, że metryka na horyzoncie jest osobliwa, to współrzędne te sprawdziły się już po obu jego stronach. Czy podobna sztuczka zadziała po obu stronach osobliwości lub horyzontu osobliwego? Okazuję się, że w pewnym sensie tak – wystarczy tylko rozważyć ujemne wartości zmiennej radialnej – przy czym otrzymamy najpierw w ten sposób jeszcze inną białą dziurę rodzaju II (różowy paraboloid Rys. 4b). Aby nie komplikować interpretacji geometrycznej rozważmy po prostu zamianę r na $-r$ w metryce (3):

$$\Delta s^2 = \frac{\Delta r^2}{1+R_S/r} - (1+R_S/r)c^2\Delta t^2 \quad \text{dla} \quad r>0 \qquad (20)$$

W takiej metryce białej dziury II rodzaju (Rys. 4b) nie pojawia się horyzont zdarzeń, więc nie potrzeba rozważać jej dwóch przypadków. Dociekliwy czytelnik może sam się przekonać rachunkiem typu (11)-(13), że odbicie paraboli (10) dla ujemnych r, czyli parabola:

$$r = \frac{1}{4R_S}y^2 - R_S \qquad \text{dla} \qquad y > -2R_S \qquad r>0 \quad (21)$$

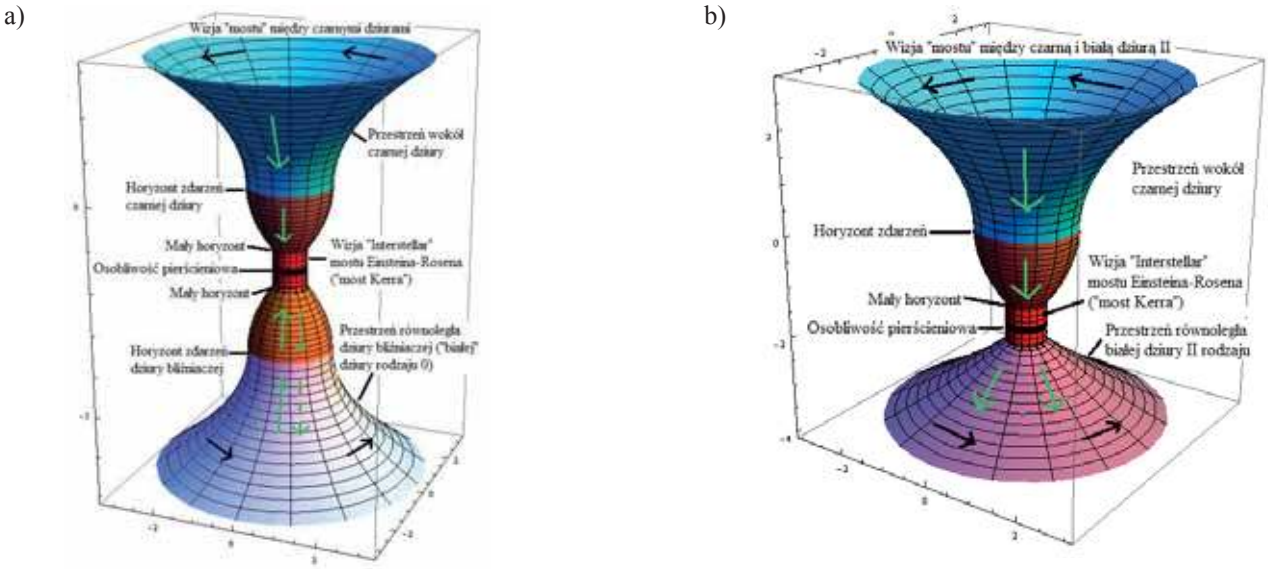
po obrocie wokół osi y realizuje przestrzenną część metryki (20). Zaś czasowa część metryki, jak zwykle do tej pory, ma z pominięciem znaku współczynnik odwrotny do części przestrzennej.

Analogicznie można prosto policzyć pełną metrykę paraboloidów żółto-purpurowo-bladych białej dziury I rodzaju zanurzonych w przestrzeni euklidesowej o sygnaturze (+,+) dla $y > 0$ i w przestrzeni pseudoeuklidesowej o sygnaturze (+,–) dla $y < 0$:

$$\Delta s^2 = \frac{r/R_S-2}{r/R_S-1}\Delta r^2 - \frac{r/R_S-1}{r/R_S-2}c^2\Delta t^2 \qquad (22)$$
$$\text{dla} \quad r \geq 0,\ r \neq R_S,\ r \neq 2R_S$$

Przy czym część czasowa jest tu uzupełniona stosowaną wcześniej metodą. O dziwo, ta metryka nie jest jawnie osobliwa w centrum pola dla $r = 0$. W tym punkcie zdegenerowana do zera jest tylko część kątowa (domyślna) tej metryki. Natomiast nawet nie z tego powodu znajduje się w tym punkcie jednak pewien biegun (słaba osobliwość) –

eprasa.pl 02d20e786f



Rys. 5. Wizja „mostu Kerra" przebiegającego koło łagodnej osobliwości (pierścieniowej) pomiędzy sprzężonymi rotującymi dziurami dla: a) dwóch bliźniaczych czarnych dziur – czyli czarnej dziury i „białej" dziury rodzaju 0; b) czarnej dziury i białej dziury II rodzaju. Wizja jest inspirowana postacią pokładowego astrofizyka Romilly'ego granego przez Davida Gyasi w filmie Interstellar i nawiązuje do rozwiązania Kerra z 1963 r. [12]. W przeciwieństwie do pozostałych rysunków artykułu wizja ta nie ma ścisłego charakteru matematycznego.

patrz (27). Warto wobec tego zapytać czy ta metryka (22) spełnia jakieś równania pola grawitacyjnego? Opisuje ona przedłużenie właściwego paraboloidu Flamma na drugie obracane ramię paraboli Flamma, a nie na ramię odbite wierzchołkowo.

Brak odbicia paraboli nie oznacza tutaj braku zmiany znaków sygnatury (jak w przypadku „białej" dziury rodzaju 0), lecz przeciwnie sygnatura się tu zmienia (jak dla wnętrza czarnej dziury). Nieco podobną, ale bardziej całościową zmianę znaków sygnatury rozważał Osiak [19] w swojej teorii antygrawitacji i częściowo z tej przyczyny jest ona fragmentarycznie podobna do białej dziury I rodzaju. Konsekwencją jest jednak metryka (22), która nie przypomina już rozwiązania Schwarzschilda. Rzeczywiście można sprawdzić (posiłkując się gotowymi równaniami np. z pracy [10]), że nie spełnia ona próżniowych równań Einsteina[5].

Sytuacji tej nie zmienia nawet dalsza manipulacja znakami sygnatury za pomocą zespolonej tożsamości Eulera $e^{i\pi} = -1$. Pozostają zatem równania Einsteina z jakąś materią wypełniającą przestrzeń. Przykładowo w modelu powłokowej antygrawitacji Osiaka było to jądro pod horyzontem czarnej dziury o stałej dodatniej gęstości i implicite o ujemnym ciśnieniu ($p = -\rho c^2$). Implikuje to równania Einsteina w postaci pewnej szczególnej klasy tzw. przestrzeni Einsteina (stałej kosmologicznej), w której tensor Ricciego jest proporcjonalny do tensora metryki. Przy czym stały w jądrze współczynnik tej proporcjonalności na zewnątrz niego będzie zerowy.

Metryka modelu Osiaka bez redefinicji znaków sygnatury najprawdopodobniej spełnia równania z przestrzeni Einsteina. Niestety równania te nie będą spełnione w części kątowej w próżniowym obszarze powłoki antygrawitacyjnej, jeśli zostanie wykonana redefinicja znaków sygnatury z (–+++) na (+++–). Redefinicja ta jest niezbędna, aby w omawianym modelu występowała antygrawitacja.

Haczyk polega na tym, że redefinicja nie jest zmianą znaku całej metryki, ale tylko jej połowy (podprzestrzeni). Mimo to rozłam między równaniami pola i antygrawitacyjnymi równaniami ruchu (równaniami geodezyjnych z redefinicją znaków metryki) można by zażegnać licząc i definiując na nowo rozkład materii (lub stałej kosmologicznej) w powłoce antygrawitacyjnej. Z pewnością nie będzie to próżnia, ale może też niekoniecznie egzotyczna materia o ujemnej gęstości. Przykładowo wnętrze grawastaru Mazura-Motttola [16] pozbawione osobliwości stanowi przestrzeń de Sittera z działającą odpychająco dodatnią stałą kosmologiczną. Taka stała kosmologiczna jest równoważna ciemnej energii, czyli niezwykłej materii o ujemnym ciśnieniu, ale dodatniej gęstości.

Niestety metryka (22) białej dziury I rodzaju nie spełnia równań Einsteina z wartością constans dla „stałej" kosmologicznej (patrz (27)). Oznacza to, że rozważany model białej dziury I rodzaju posiada bardziej egzotyczną materię „próżni", włączając ujemną gęstość masy."

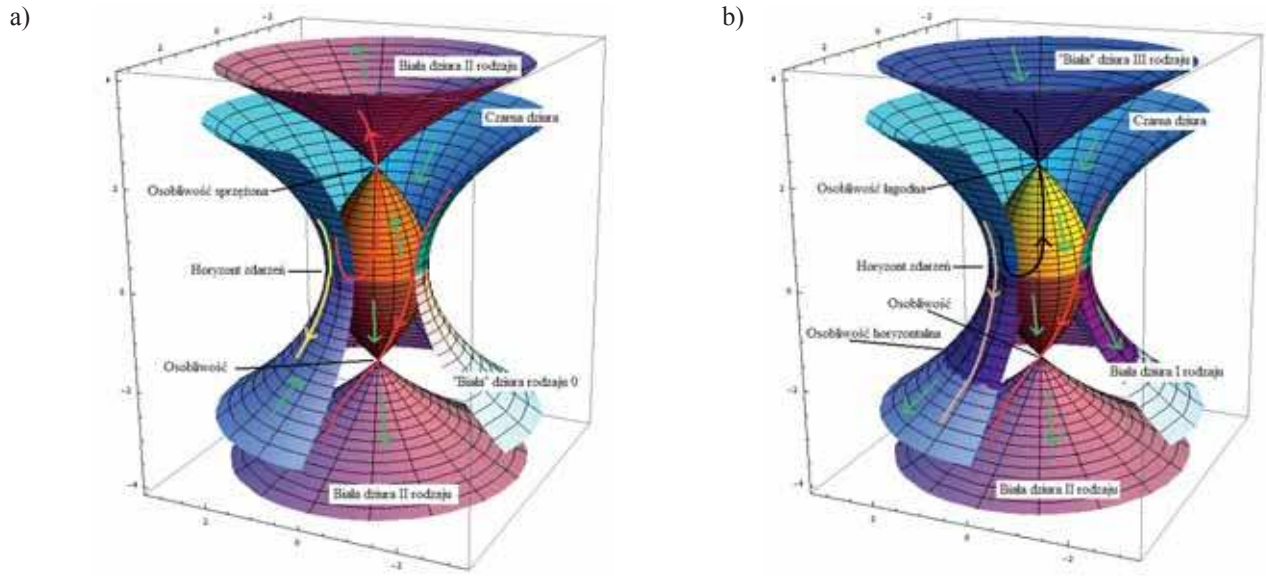
W ten sposób zostały przedstawione już aż trzy typy białych dziur: rodzaju 0, I i II, z których tylko pierwszy okazał się pozorną „białą" dziurą. Ostatni rodzaj II uogólnia metrykę Schwarzschilda na ujemne wartości r albo równoważnie i może jaśniej na ujemną wartość masy M[6]. Ujemna masa może tutaj rzeczywiście oznaczać prawdziwy „białodziurowy" charakter antygrawitacyjny białej dziury rodzaju II. W pewnym sensie jeszcze bardziej egzotyczna okazała się biała dziura I rodzaju. Jedynie „biała" dziura rodzaju 0 jawi się jako niezmodyfikowana względem czarnej dziury.

Na diagramie Kruskala-Szekeresa te dwie bliźniacze czarne dziury (czarna dziura i „biała" dziura rodzaju 0)

[5] Oczywiście uwzględniając wszystkie 3+1 wymiary wraz z kątowymi. Nie są też spełniane próżniowe równania Einsteina w dwóch (1+1) i w trzech wymiarach (2+1).

[6] Można także mówić ekwiwalentnie o zmianie znaku stałej grawitacji czy też ujemnym promieniu Schwarzschilda. W pierwszej połowie artykułu używane są jednak parametry i zmienne nieujemne (oprócz y), a znaki są zapisywane explicite w postaci + lub – albo dodana jest dziedzina.

eprasa.pl 02d20e786f



Rys. 6. Pełne rozszerzone zestawy paraboloidów opisujące przestrzeń czarnej dziury, jej podwójne wnętrze oraz trzy czasoprzestrzenie równoległe: a) „białej" dziury rodzaju 0 i dwóch białych dziur II rodzaju, b) białych dziur I, II rodzaju oraz „białej" dziury III rodzaju. Naszkicowane są również potencjalne trajektorie prowadzące do czasoprzestrzeni równoległych. Linie czerwone prowadzą przez silną osobliwość, a kremowa i czarna przez osobliwości łagodniejsze, zaś linia żółta omija osobliwości, ale wiedzie też przez horyzont.

oddzielone są horyzontem zdarzeń odpowiadającym „absolutnej przeszłości" (czasowi równemu minus nieskończoność). W ujęciu popularno-naukowym, a także naukowym (na diagramach Kruskala-Szekeresa oraz Penrose'a) przyjęło się interpretować drugą bliźniaczą (sprzężoną) czarną dziurę jako przeciwieństwo pierwszej, czyli jako białą dziurę. Taka biała dziura zamiast zasysać materię miałaby ją wyrzucać.

Zdaniem autora niniejszego artykułu ta interpretacja nie jest w pełni uzasadniona diagramem Kruskala-Szekeresa, który zawiera dwie zupełnie symetryczne czarne dziury. Dlatego taki obiekt jest nazywany w tym artykule „białą" dziurą rodzaju 0 z użyciem cudzysłowu. Powszechnie uważa się, że kierunek czasu „białej" dziury rodzaju 0 określony jest przez czasową współrzędną Kruskala-Szekeresa, co oznacza odbicie czasu (bardziej pasowałoby to do białej dziury II rodzaju). Jednak zdaniem autora w rzekomej „białej" dziurze rodzaju 0 czas, jak w zwykłej czarnej dziurze, jest zorientowany od horyzontu ku osobliwości. Chodzi tutaj o orientacje czasu wziętą z brzegu, tzn. z horyzontu o czasie Schwarzschilda dążącym do minus nieskończoności, a nie o formalne współrzędne Kruskala-Szekeresa. Po prostu jak to było wyjaśniane w przypisie trzecim „[3]" nie można zmienić zwrotu strzałki czasu w czasoprzestrzeni pod horyzontem zdarzeń w zgodzie z równaniami ruchu (równaniami geodezyjnych).

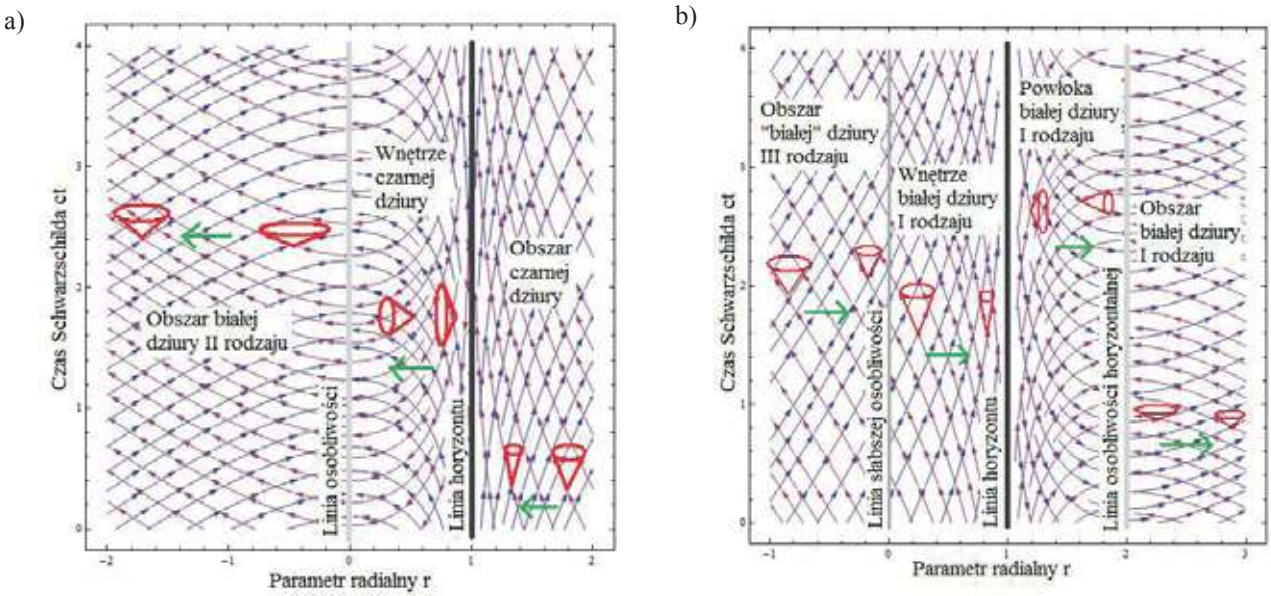
Co więcej – nawet odbicie czasu nie zamienia grawitacji na antygrawitacje i czarnej dziury na prawdziwą białą dziurę. Można to łatwo udowodnić wykorzystując trick filmowy „rewers" polegający na puszczaniu filmu wstecz czasu (nie mylić z nieco podobnym „replay"). Otóż wyobraźmy sobie nagranie meczu piłki nożnej, w którym bramkarz wybił piłkę pionowo w górę, która osiągnęła w danej chwili maksymalną wysokość. Zauważmy, że niezależnie czy film puścimy dalej normalnie do przodu, czy zrobimy „rewers", to i tak piłka opadnie, co wskazuje słuszny zwrot siły ciążenia. Do tej obserwacji nawet nie jest potrzebna maksymalna wysokość. Nagranie piłki wznoszącej się również ujawni większą prędkość na dole pola grawitacyjnego zarówno w oryginale i w „rewersie". W kontekście czarnej dziury argument „rewersu" może uchodzić za paradoksalny, ale jest poprawny.

Inną dziwną własnością omawianego diagramu Kruskala-Szekeresa jest występowanie dwóch oddzielonych osobliwości, gdy tymczasem horyzonty są w połowie wspólne dla obu czarnych dziur. Mimo to ujęcia popularno-naukowe przedstawiają często łączenie się sprzężonych dziur w pewnym dystansie, który umożliwia na uwspólnienie osobliwości (Rys. 4). Taki osobliwy punkt styku dziur miałby się rozszerzać do pętli w przypadku rotujących czarnych dziur. Ta sytuacja byłaby już opisywana rozwiązaniem Kerra (a nie Schwarzschilda), w którym osobliwość przyjmuje kształt pętli (a nie punktu). W tych warunkach można by opisywać tunel czasoprzestrzenny łączący sprzężone dziury, który został tu roboczo nazwany „mostem Kerra" (Rys. 5).

Okazuje się, że stykanie bliźniaczych czarnych dziur można przedstawić bardziej plastycznie metodą paraboloidów, aniżeli na diagramie Kruskala-Szekeresa (który nie jest tutaj prezentowany explicite). Co więcej metoda ta pozwala zrozumieć dwa istotnie różne sposoby takiego stykania: poprzez horyzont będący krótkim mostem (bramą) Einsteina-Rosena (Rys. 3) albo poprzez osobliwość z długim mostem (Rys. 4a) lub bez mostu (Rys. 4b). Jest też narysowana wspomniana już trzecia wizja sposobu takiego połączenia („most Kerra"), ale bez ścisłych równań powierzchni paraboloidów – ze względu na złożoność metryki Kerra (Rys. 5). W terminologii angielskiej wszystkie bramy, mosty i tunele określane są jako „wormhole" czyli „dziurka robaka".

[7] Pomysł takiego przekształcenia bez zmiany znaku *r* pochodzi od konsultanta artykułu. Przy braku minusa (odbicia) nie występuje problem indukowania agrawitacyjnej orientacji linii zerowych w powłoce pomiędzy horyzontem zwykłym i osobliwym, ale pojawiłby się formalny problem ujemnych „promieni" tych horyzontów (czy też ujemnej masy według interpretacji konsultanta). Przekształcenie z minusem odnajdujemy w pracy [3] w podanej w niej metryce „(5)", która różni się od metryki (22) lub (24) modyfikacją części kątowej.

eprasa.pl 02d20e786f



Rys. 7. Wykresy zorientowanych radialnych linii zerowych światła we współrzędnych Schwarzschilda dla: a) czarnej dziury i białej dziury II rodzaju, b) białej dziury I rodzaju i „białej" dziury III rodzaju. Zamykające się stożki świetlne przyszłości w tych współrzędnych wskazują zwrot ciążenia grawitacyjnego. Kryterium to potwierdzone we współrzędnych typu Schwarzschilda równaniami geodezyjnych jest inspirowane podręcznikami [17, 26].

Na końcu naszej wycieczki spojrzymy na wszystko z jeszcze szerszej perspektywy jakby rozszerzając rys. 3 dla ujemnych r (Rys. 6). Na dole przy osobliwości ten zabieg już nas doprowadził do białej dziury II rodzaju (Rys. 4b). Natomiast teraz przy górnym słaboosobliwym biegunie białej dziury I rodzaju powstanie „biała" dziura III rodzaju (Rys. 6b). Mimo, że wygląda ona tak samo jak biała dziura II rodzaju to jest ona inna, bo jest zanurzona zanurzona w geometrii czysto euklidesowej, a nie w pseudoeuklidesowej.

Po raz kolejny stosując tę samą metodę można wyprowadzić następującą metrykę dla „białej" dziury III rodzaju:

$$\Delta s^2 = \frac{r/R_S+2}{r/R_S+1}\Delta r^2 - \frac{r/R_S+1}{r/R_S+2}c^2\Delta t^2 \quad \text{dla} \quad r \geq 0 \qquad (23)$$

Niestety bezpośredni rachunek pokazuje, że ta metryka podobnie jak (22) nie spełnia próżniowych równań Einsteina. Patrząc jednak na rys. 6b oraz formuły (22) i (23) łatwo zauważyć, że paraboloid blado-purpurowo-żółto-niebieski tworzący biało-„białą" dziurę I i III rodzaju może być opisany jedną formułą metryki dla dodatnich i ujemnych wartości zmiennej radialnej:

$$\Delta s^2 = \frac{r/R_S-2}{r/R_S-1}\Delta r^2 - \frac{r/R_S-1}{r/R_S-2}c^2\Delta t^2$$
$$\text{dla} \quad r \in (-\infty,+\infty)\setminus\{R_S, 2R_S\} \qquad (24)$$

Podobnie można by postąpić dla czarnej dziury i białej dziury II rodzaju opisanych paraboloidem błękitno-brązowo-różowym i zapisać metryki (3), (9) i (20) wspólnym wzorem o szerszej dziedzinie:

$$\Delta s^2 = \frac{\Delta r^2}{1-R_S/r} - (1-R_S/r)c^2\Delta t^2$$
$$\text{dla} \quad r \in (-\infty,+\infty)\setminus\{0, R_S\} \qquad (25)$$

Zatem złożone konfiguracje czasoprzestrzeni z rys. 6 opisane są praktycznie dwoma formułami, z czego jedna jest uogólnieniem (24) metryki Schwarzschilda, a druga (25) stanowi metrykę Schwarzschilda z rozszerzeniem na białą dziurę II rodzaju. Okazuję się, że pomijając domyślną część kątową, formułę (24) można by uzyskać z metryki Schwarzschilda (25) za pomocą odbicia zmiennej radialnej względem wierzchołka paraboli Flamma (patrz Rys. 1)[7]:

$$r \to -r + 2R_S \qquad (26)$$

Przy takim przekształceniu horyzont czarnej dziury przechodzi w horyzont białej dziury I rodzaju (lub innymi słowy horyzont zostaje w tym samym miejscu), zaś osobliwość przechodzi w duży horyzont białej dziury I rodzaju. Pokazuje to, że rozpoznanie co jest horyzontem, a co osobliwością nie musi być kwestią trywialną. W myśl przekształcenia (26) można by sądzić, że w sensie współrzędnej radialnej i czasu formuły (24), (25) są metrycznie równoważne. Jednakże ze względu na implicite występującą tutaj część kątową (patrz przypis nr dwa „[2]") formuły te nie są równoważne do tego stopnia, że (25) spełnia próżniowe równania Einsteina, a (24) już nie. Efektem tego jest niezerowa czasoprzestrzenna krzywizna (skalar krzywizny Ricciego) białej dziury I oraz „białej" dziury III:

$$K_R := R^{\mu}_{\mu} = -r^{-2}\left(\frac{r}{2R_S}-1\right)^{-3}$$
$$\text{gdzie} \quad r \in (-\infty,+\infty)\setminus\{0,\ 2R_S\} \qquad (27)$$

Krzywizna ta została obliczona przez autora na podstawie ogólnie znanych równań dostępnych i zwięźle spisanych w pracy [10]. Problem zmieniających się znaków sygnatury został rozwiązany za pomocą wspominanej już wcześniej tożsamości Eulera. Jak widać krzywizna jest osobliwa na dużym „horyzoncie" $r = 2R_S$, który jest w istocie „horyzontalną osobliwością". Zaś zwykły horyzont $r = R_S$ niczym się tutaj nie wyróżnia. Natomiast dla $r = 0$ pojawia się osobliwy biegun niższego rzędu. Wartość krzywizny (27) można interpretować jako proporcjonalną do gęstości materii wypełniającej przestrzeń. Przy czym po jednej stronie „horyzontalnej osobliwości" byłaby to egzotyczna materia o gęstości ujemnej.

eprasa.pl 02d20e786f

Inną próżniową interpretacją (27) mogłaby być częściowo tzw. „stała” kosmologiczna Einsteina Λ zależna tutaj od *r*.

Niezależnie od interpretacji można powiedzieć, że niezerowa krzywizna białej dziury I i „białej” dziury III pozwala na prostsze niż dla rozwiązania Schwarzschilda wyjaśnienie czym jest osobliwość. Po prostu dla zwykłej czarnej dziury (oraz „białej” dziury rodzaju 0 i białej dziury II) skalar krzywizny jest zerowy wszędzie oprócz osobliwości, która ma charakter delty Diraca [11]. Można powiedzieć, że zerowanie krzywizny jest efektem braku zakrzywienia w wymiarze czasu podczas gdy przestrzeń jest zakrzywiona, co jest czytelne na diagramach zanurzeniowych (Rys. 2–6). Inną oznaką zakrzywienia czasoprzestrzeni Schwarzschilda poza osobliwością jest niezerowy skalar Kretschmanna, stanowiący jakby kwadratową wersję krzywizny.

Dodatkowo w świetle (20) wobec (3) lub (22) wobec (23) czy też (27) można interpretować antygrawitację białych dziur w kategoriach ujemnej masy ($M < 0$). O ujemnej masie wspominali Einstein i Rosen w pracy [4] oraz pisał Bondi [2]. Jednak dopiero prace z tego wieku [6] bardziej poważnie podchodzą do tego tematu. Prawdopodobnie do tego stanu rzeczy przyczyniła się silna i słaba hipoteza kosmicznej cenzury Penrose'a, którą można próbować jeszcze bardziej osłabiać.

W pewnym sensie całość uogólnień (24) i (25) jest nawet większa (a przynajmniej nietożsama) od tzw. najszerszego uogólnienia regularnego opisanego współrzędnymi Kruskala-Szekeresa. Taka sytuacja jest w ogóle możliwa dzięki rozszerzaniu poza osobliwość w kierunku białej dziury II rodzaju, czego rozszerzenie Kruskala-Szekeresa nie obejmuje z definicji regularności. Warto przypomnieć i podkreślić, że biała dziura II rodzaju spełnia próżniowe równania Einsteina, czego nie można powiedzieć o biało-„białych” dziurach oznaczonych nieparzystymi liczebnikami rzymskimi (I, III).

Dzięki rys. 6 można rozpatrywać potencjalnie podróże do Wszechświatów równoległych biało- „białych” dziur bez konieczności przechodzenia przez niestabilny wydłużony most Einsteina-Rosena (Rys. 4), ale przez bramę horyzontu lub łagodniejsze bieguny osobliwości. Potencjalnemu istnieniu niektórych trajektorii sprzyja zjawisko antygrawitacji białych dziur. Tylko trajektorie czerwone wiodą przez silną i destrukcyjną osobliwość. Trajektoria kremowa i czarna przebiega przez łagodniejsze bieguny osobliwości. Natomiast tylko trajektoria żółta według Rys. 6 wymagają jedynie przekraczania horyzontu zdarzeń.

Podsumowanie

Przedstawione w niniejszym artykule rozmaite paraboloidy i ich złożenia wynikły z postawionego przez autora zadania zanurzeniowego przedstawienia metryki Schwarzschilda. Ponadto autor dążył do ogólności i wyczerpania wszystkich przypadków możliwych naturalnych rozszerzeń w ramach 3D. Oczywiście nie dziwi, że takie przedstawienia były już wprowadzane zarówno w czasach pionierów (Flamm [1]) oraz w bardziej współczesnych pracach naukowych (Morris-Thorne [18], Petit-D'Agostini [21], Paston-Sheykin [20]) i opracowań przeglądowych (Hamilton [9], Usidus [27]). Po prostu te same zadania mają te same rozwiązania niezależnie od czasów ich rozwiązania. Mimo wszystko nie są to rozwiązania dostatecznie spopularyzowane w ujęciu ścisłym i ogólnym. Dość powiedzieć, że łatwiej było je wyprowadzić niż je odszukać przed wyprowadzeniem.

Najważniejsze, że odnajdywane w źródłach zgodności dowodzą poprawności ujęcia przedstawionego w tym artykule. Prawdopodobnie do tej pory omawiane zagadnienie nie było prezentowane aż tak prosto i plastycznie na poziomie szkolnym przy zachowaniu ścisłości i ogólności.

Dokładniejszego zbadania wymagały jednak paraboloidy pod horyzontem oraz paraboloidy opisujące biało-„białe” dziury. W kontekście biało-„białych” dziur pojawiły się tutaj koncepcje różnicujące. Autor w oparciu o cztery argumenty (czasu brzegowego Schwarzschilda, „rewersu” oraz równań geodezyjnych i zamykania stożków świetlnych) polemizuje z właściwością antygrawitację czy też orientacją strzałki czasu w bliźniaczej czarnej dziurze nazwanej tutaj „białą” dziurą rodzaju 0. W zamian za to przedstawione są antygrawitacyjne białe dziury I i II rodzaju oraz „biała” dziura III rodzaju bez własności antygrawitacji, które rzeczywiście nie są bliźniaczo podobne do czarnej dziury.

Biała dziura I rodzaju okazała się fragmentarycznie podobna do pewnej teorii antygrawitacji powłokowej. Zaś biała dziura II rodzaju okazała się częściowo znanym rozwiązaniem Schwarzschilda dla ujemnej masy, które posiada nagą osobliwość bez horyzontu (Gleiser-Dotti [6]) i nie jest objęte rozszerzeniem Kruskala-Szekeresa. Natomiast „biała” dziura III rodzaju mimo podobieństwa do II rodzaju, podobnie jak biała dziura I rodzaju, okazała się nie spełniać próżniowych równań Einsteina, ale równania z egzotyczną materią wypełniającą przestrzeń. Jednakże klasyfikacja i rozpoznanie rodzajów I i III wydają się być zasadne z punktu widzenia ujęcia zanurzeniowego obejmującego naturalne przedłużenia paraboloidów typu Flamma.

LITERATURA

[1] Abramowicz M. A., Kuźniak W., Lasota J. P. (2014), „Mass of a Black Hole Firewall”, arXiv:1311.0239v3.
[2] Bondi H. (1957): „Negative Mass in General Relativity”, Reviews of Modern Physics vol. 29, no. 3, 423–428.
[3] Crothers S. J. (2010): „The Kruskal-Szekeres “Extension”: Counter-Examples”, Progress in Physics 1, 3–7.
[4] Einstein A., Rosen N. (1935): „The Particle Problem in the Theory of Relativity”, Physical Review 48, 73–77.
[5] Flamm L. (1916/2015): „Comments on Einstein's Theory of Gravity”, republikacja anglojęzyczna artykułu niemieckojęzycznego z 1916, General Relativity and Gravitation (2015) 47:72, str. 1–12.
[6] Gleiser R. J., Dotti G. (2006): „Instability of the negative mass Schwarzschild naked singularity”, arXiv:gr-qc/0604021v2.
[7] Gładyszewski L. (1990): „Fizyka z astronomią IV, Roz. III. Astrofizyka i kosmologia”, WSiP, Warszawa.
[8] Haggard H. M., Rovelli C. (2014): „Black hole fireworks: quantum-gravity effects outside the horizon spark black to white hole tunneling”, arXiv:1407.0989v2.
[9] Hamilton A. J. S. (15.04.2001/03.02.2018): „White Holes and Wormholes”, Homepage: https://jila.colorado.edu/~ajsh/bh/schww.html.
[10] Iftikhar A., Maqsoom F., Najam B. (2014): „Static Solutions of Einstein's Equations with Spherical Symmetry”, arXiv:1308.1233v2.
[11] Katanaev M. O. (2014): „Point massive particle in General Relativity”, arXiv:1207.3481v4 [gr-qc].
[12] Kerr R. P. (1963): „Gravitational field of a spinning mass as an example of algebraically special metrics”, Physical Review Letters 11 (5), 237–238.
[13] Koczan G. (2018): „Wyprowadzanie promieniowania Hawkinga, Część I. Grawitacja i termodynamika czarnych dziur” , Foton 140 Wiosna, str. 4–26.
[14] Koczan G. (2018): „Wyprowadzanie promieniowania Hawkinga, Część II. Mechanika kwantowa oraz statystyczna stanów fotonowych”, Foton 141 Lato, str. 4–32.
[15] Kruskal M. (1960): „Maximal extension of Schwarzschild manifold”, Physical Review 119 (5), 1743–1745.
[16] Mazur P. O., Mottola E. (2002): „Gravitational Condensate Stars: An Alternative to Black Holes”, arXiv:gr-qc/0109035v5.
[17] Misner C. W., Thorne K. S., Wheeler J. A. (1973, 1977 ros.), „Gravitation”, Freeman, San Francisco.
[18] Morris M. S., Thorne K. S. (1988): „Wormholes in spacetime and their use for interstellar travel: A tool for teaching general relativity”, American Journal of Physics, 56, 395–412.
[19] Osiak Z. (2005/2018): „Antygrawitacja”, viXra 1804.0495v3.
[20] Paston S. A., Sheykin A. A. (2012): „Embeddings for Schwarzschild metric: classification and new results”, arXiv:1202.1204v1.
[21] Petit J. P., D'Agostini G. (2015): „Cancellation of the central singularity of the Schwarzschild solution with natural mass inversion process”, Modern Physics Letters A, Vol. 30, No. 9, 1550051-1–1550051-13.
[22] Rovelli C., Vidotto F. (2014), „Planck stars”, International Journal of Modern Physics D. 23 (12): 1442026, arXiv:1401.6562.
[23] Salach J. (1988): „Fizyka z astronomią II, Roz. II. Elementy fizyki relatywistycznej”, WSiP, Warszawa.
[24] Stephani H., Kramer D., Maccallum M., Hoenselaers C., Herlt E. (2003): „Exact Solutions to Einstein's Field Equations, Second Edition”, Cambridge University Press.
[25] Szekeres G. (1960): „On the singularities of a Riemannian manifold”, Publicationes Mathematicae Debrecen 7, 285–301.
[26] Schutz B.F. (2002): „Wstęp do ogólnej teorii względności”,PWN.
[27] Usidus M. (2018): „Białe dziury – osobliwość w osobliwości”, Młody Technik nr 2, str. 21–22.
[28] Wikipedia (06.04.2019): „Linie geodezyjne w metryce Schwarzschilda”, https://pl.wikipedia.org/wiki/Linie_geodezyjne_w_metryce_Schwarzschilda.
[29] Wikipedia (31.01.2019): „Schwarzschild geodesics”, https://en.wikipedia.org/wiki/Schwarzschild_geodesics.
[30] Wikipedia (17.03.2019): „3-sphere” ,https://en.wikipedia.org/wiki/3-sphere.

eprasa.pl 02d20e786f

Załogowe loty kosmiczne – za czy przeciw?

Waldemar **Reńda**

„Kiedy kończy się dzieciństwo i bajkowa wyobraźnia ustępuje miejsca rzeczywistości, jest ważne, by młodzi ludzie uczyli się odróżniać fakty od fikcji i sens od bezsensu.”[1]

Hy Ruchlis

Co pewien czas środki masowego przekazu donoszą o planach, a nawet przygotowaniach do załogowej wyprawy na Marsa. Istnieje też powszechne przekonanie o nieuchronności ekspansji[2] człowieka w Kosmos. Pragnienie realizacji tych zamierzeń zapewne wynika z podobnych pobudek, jakie kierowały Kolumbem, Magellanem, R. F. Scottem czy Amundsenem, a także tymi, którzy pragnęli zdobywać szczyty Himalajów. Zastanówmy się jednak nad sensownością tego typu przedsięwzięć.

Nie mam zamiaru dezawuowania korzyści związanych z rozwojem techniki kosmicznej. To nie tylko łączność satelitarna czy badania przyrodnicze, ale i wiele innych zastosowań – choćby GPS. W jednej z audycji telewizyjnej padło pytanie: Co by się stało, gdyby nagle zamilkły wszystkie urządzenia znajdujące się w satelitach okrążających Ziemię?

Może nie zauważyłyby tego plemiona Indian amazońskich, ale dla nas byłaby to najprawdopodobniej katastrofa technologiczna. Sparaliżowana byłaby komunikacja lotnicza, morska a nawet lądowa. Zamilkłyby łącza telefoniczne, radiowe i telewizyjne. Pojawiłyby się poważne problemy w sieciach energetycznych oraz wiele, wiele innych kłopotów. Trudno ocenić, jak wielkie straty poniosłyby gospodarki krajów wysoko uprzemysłowionych. Przykład ten niech świadczy o tym, jak wiele korzyści płynie z eksploatacji wspomnianych wyżej urządzeń. Wprawdzie umieszczanie satelitów na orbicie Ziemi jest kosztowne, ale – jak widać – nie są to pieniądze wydane na darmo.

Laboratorium w kosmosie

Zapewne nadal będziemy intensywnie badać Kosmos. Jest on bowiem ogromnym laboratorium fizycznym, w którym zachodzą zjawiska niemożliwe do wywołania na Ziemi. Staramy się też poznać strukturę Kosmosu i jego historię. Ale czy do tego konieczne są loty załogowe?

Zanim odniosę się do tego pytania, pozwolę sobie skomentować loty załogowe na Księżyc.[3] Odbyły się

Start Sondy Soyuz MS-06 z kosmodromu Bajkonur z członkami załogi Expedition 50 Joe Acaba z NASA, Aleksandrem Misurkin z Roscosmos i Markiem Vande Hei z NASA z kosmodromu Bajkonur w Kazachstanie, 13 września 2017

one w latach od 1967 do 1973. Użyto wówczas potężnej rakiety typu Saturn, W szczytowym okresie przygotowań (rok 1966) pracowało nad tym projektem 380 tys. ludzi. Całkowity koszt wszystkich 17 starów wyniósł ponad 25 mld. ówczesnych dolarów. Pierwszy załogowy Apollo 11 wystartował 16 VII 1969 r. Załogę stanowili: N. Armstrong – dowódca, E. Aldrin i M. Collins – piloci. Po 4 dniach statek kosmiczny wszedł na orbitę okołoksiężycową. Wówczas oddzielił się od niego lądownik, w którym znaleźli się N. Armstrong i E. Aldrin. Lądowanie nastąpiło 20 lipca. Po 2,5 godzinach pobytu na Księżycu lądownik wystartował z jego powierzchni i kosmonauci powrócili na statek macierzysty. Następnie zostały uruchomione silniki, umożliwiające powrót kosmonautów na Ziemię. 24 lipca lądowali oni w specjalnej kapsule na oceanie.

Wyniki badań nie były imponujące. Ustawiono sejsmometry do badań drgań powierzchni Księżyca oraz odbłyśnik laserowy, który miał pozwolić na dokładny pomiar odległości pomiędzy owym punktem na Księżycu a ziemskim laboratorium. Pobrano też próbki gruntu oraz

1 Hy Ruchlis, *Skąd wiesz, że to prawda,* Prószyński i S-ka, Warszawa, 1998.
2 Używa się też tu źle kojarzonej nazwy – podbój.
3 Projekt APOLLO.

eprasa.pl 02d20e786f

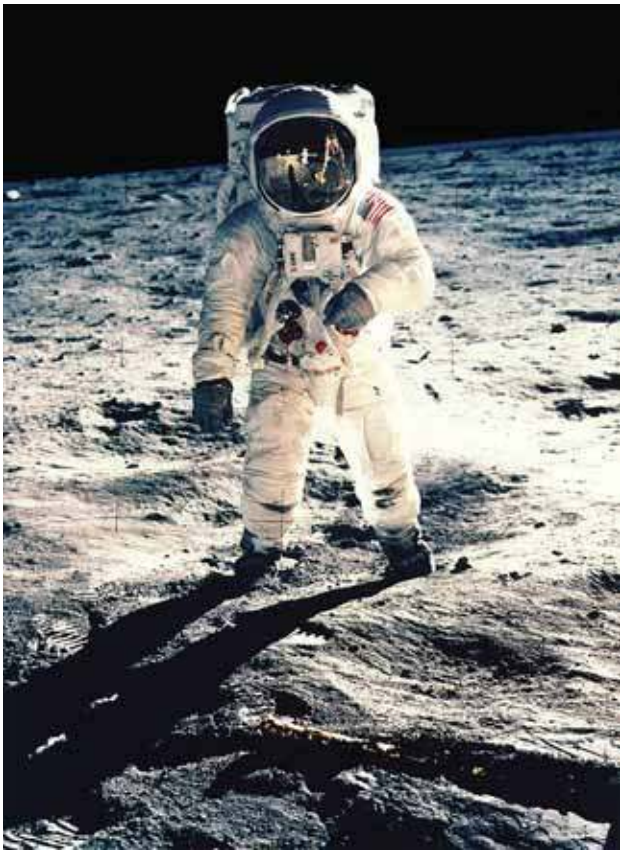
folię aluminiową ze śladami cząstek wiatru słonecznego. Dziś wiemy, że wszystkie tego typu badania mogą wykonywać lądowniki bezzałogowe. Natomiast ów projekt był przede wszystkim wynikiem rywalizacji politycznej i technologicznej pomiędzy dwoma liczącymi się wówczas światowymi mocarstwami USA oraz ZSRR, i miał charakter prestiżowy.

I tu pozwolę sobie na pewną dygresję ekologiczną: Wystrzelenie jednej rakiety wymaga spalenia ogromnej ilości paliwa, a jest to zwykle paliwo węglowodorowe.[4] I tak na przykład masa startowa rakiety Saturn V to ponad 3 tysiące ton. W tym ponad 95% to paliwo! Aby go spalić, należałoby zużyć 5 760 000 m^3 tlenu. Przy okazji powstanie 3 840 000 m^3 CO_2. Na analogicznym paliwie 10 tysięcy samochodów osobowych przejechałoby 6000 km! To tylko rakieta startująca na Księżyc, a lot na Marsa wymagałby potężniejszych rakiet i większej ilości paliwa.

Wrócę jeszcze do tamtych wydarzeń. Wówczas to futurolodzy oceniali, że wyczyn ów będzie początkiem licznych startów na Księżyc, w wyniku których ok. roku 2000 powstaną tam stałe bazy, będące swoistymi stacjami przesiadkowymi do lotów na inne planety. Przede wszystkim na Marsa. I co? I nic. Mija już 50 lat od tamtych wydarzeń i nie zrealizowano żadnej wyprawy załogowej na Księżyc. Bo i po co? To bardzo droga „impreza", a w dodatku wszystkie tego typu badania mogą wykonywać statki bezzałogowe i to kilkaset razy taniej.

We wrześniu 2005 r. prasa doniosła, że USA chce zorganizować kolejną wyprawę na Księżyc za 104 mld dolarów. Dlaczego? Przecież Księżyc znamy lepiej niż własną Ziemię! Problem polega jednak na tym, że w przemysł kosmiczny „wpompowano" miliardy dolarów i ludzie tam pracujący domagają się następnych miliardów na nowe programy. Jak dotąd nie zrealizowano owego zamierzenia. Widocznie nie zdecydowano się na tak wielki wydatek. W tym samym czasie Kongres Stanów Zjednoczonych wstrzymał budowę potężnego akceleratora. Widocznie amerykańscy podatnicy niechętnie zgadzają się na realizacji tak kosztownych zamierzeń. Rozumiem to stanowisko, bo rządy krajów powinny przede wszystkim rozwiązywać codzienne problemy swoich obywateli, a nie zachcianki fantastów. Cóż bowiem powiedzielibyśmy o rodzicach, którzy zamiast zapewnić swoim dzieciom byt, wydawaliby pensje na realizację swojego hobby?

Nie mam tu zamiaru dezawuować ewidentnych korzyści, jakie społeczeństwa odnoszą dzięki rozwojowi techniki kosmicznej. Musimy jednak liczyć koszty. Od wielu lat działa stacja kosmiczna z międzynarodową załogą. Budowa i eksploatacja owej stacji pochłonęła kilkaset miliardów dolarów. Jest to kwota nieproporcjonalnie duża w stosunku do uzyskanych efektów naukowych, które wycenia się na ok. 2% poniesionych kosztów! A zatem, czy to się opłaca? Obecnie mówi się – chyba słusznie – o sprywatyzowaniu owej stacji. Tylko kto ją kupi i po co?



Buzz Aldrin, amerykański inżynier i astronauta, uczestnik misji Apollo 11 w czasie pierwszej wyprawy na Księżyc w 1969 roku

Podobnie z lotami na Marsa. Jakoś do tego nie kwapią się żadne rządy. Dlaczego? Czyż bowiem słuszne jest wydawanie ogromnych kwot dla wątpliwych efektów, gdy na Ziemi miliard ludzi żyje w nędzy, gdy niektórym społeczeństwom brak pieniędzy na oświatę, służbę zdrowia czy pomoc ludziom, którzy ucierpieli w wyniku tsunami, trzęsień Ziemi, huraganów, susz i innych klęsk żywiołowych?

Po co lecieć na Marsa?

Obecnie dużo mówi się o załogowym locie na Marsa. Koszt takiej wyprawy szacuje się na 400 do 600 mld dolarów.[5] Ponieważ rządy nie kwapią się do realizacji tego pomysłu, włączyły się więc w to osoby prywatne. Ale czy roztropnym jest wydanie takiej kwoty na realizację turystycznej podróży, gdy grozi nam katastrofa ekologiczno-klimatyczna? Wszak zaledwie połowa tej kwoty wystarczyłaby na pokryciem światowych kosztów związanych z koniecznym ograniczeniem emisji CO_2.

Pozwolę sobie tu na kilka uwag: Rakieta Saturn V, która wyniosła trzech kosmonautów oraz mogący wystartować z Księżyca lądownik, miała masę ponad 3000 ton i udźwig ok. 110 ton. Start powrotny z Marsa będzie o wiele trudniejszy, bo przyspieszenie grawitacyjne na Marsie jest 2,3 razy większe niż na Księżycu.

[4] Paliwem w silniku głównym jest np. nafta.

[5] 27 listopada 2018 r. amerykański bezzałogowy próbnik osiadł na powierzchni Marsa i rozpoczął dwuletnie badania (jednym z urządzeń był polskiej konstrukcji „kret"). Całkowity koszt przedsięwzięcia to prawie miliard dolarów, czyli kilkaset razy mniejszy niż lot załogowy.

eprasa.pl 02d20e786f

Atlantis – czwarty wahadłowiec NASA, który odbył lot kosmiczny. Był on jednym z pięciu zbudowanych w USA orbiterów wielorazowego użytku przeznaczonych do transportu ludzi oraz sprzętu na orbitę oraz z powrotem.

Stacja orbitalna Mir, budowana przez ZSRR od 1986 r. Przy końcu rozbudowy Mira, stacja miała masę ponad 135 ton i miała 31 m szerokości oraz 33 m długości.

Chyba, że nie przewiduje się takiego powrotu. Pewnie osoby żądne sławy na taką eskapadę by się znalazły, ale czy powinniśmy na to pozwolić? Zapytam na koniec: Czy taka wyprawa ma jakikolwiek sens poza pobiciem swoistego rekordu? Odpowiem, że nie! Już dziś lądują na Marsie próbniki, które dostarczają mnóstwa danych o tej planecie, a ich koszt to nie więcej niż jeden procent tego, co wymagałby lot załogowy. Powtórzę więc: czy na Ziemi nie ma problemów, które wymagają rozwiązania? Czy koniecznie musimy wydawać setki miliardów dolarów na tego typu zachcianki, zamiast na przykład przeciwdziałać rysującej się katastrofie klimatycznej.

Mówi się, że lot na Marsa to początkowy etap ekspansji człowieka w Kosmos i że owa ekspansja jest naturalną konsekwencją rozwoju cywilizacyjnego. Odpowiem: To wielka bzdura, którą można między bajki włożyć.

I znów zapytam – czy owa ekspansja ma sens?

Rozumiem, że osoby karmione bzdurną literaturą *science-fiction,*[6] chciałyby zrealizować pojawiające się tam pomysły. Ale roztropni ludzie powinni realistycznie oceniać tego typu zamierzenia. Jest to niezwykle ważne w pracy z młodzieżą, która z natury jest romantyczna. Uczmy ją myślenia roztropnego i racjonalnego. Powtórzę więc za Hy Ruchlisem: „Kiedy kończy się dzieciństwo i bajkowa wyobraźnia ustępuje miejsca rzeczywistości, jest ważne, by młodzi ludzie uczyli się odróżniać fakty od fikcji i sens od bezsensu."

Wiem, że badań kosmicznych nie da się powstrzymać. Taternicy na pytanie, po co zdobywają szczyty, odpowiadają – bo są! Tak też będą odpowiadać kosmonauci. Jest Kosmos, więc go badamy. Ale czy podatnicy muszą z własnej kieszeni realizować wszystkie ich zachcianki? Zamiast szukać śladów życia na Marsie, spróbujmy ulżyć życiu Ziemian! Jak dotąd nie usłyszałem żadnych przekonujących przesłanek za koniecznością i racjonalnością kolonizowania Kosmosu. Przypomina ono kolonizowanie himalajskich szczytów czy wnętrza Antarktydy. Jakoś nikt przy zdrowych zmysłach tego nie proponuje!

Futurolodzy wciąż mówią o konieczności ekspansji w kosmos, twierdząc, że Ziemian wcześniej czy później czeka zagłada, która może być spowodowana pandemią, upadkiem ogromnego meteorytu, wyczerpaniem zasobów naturalnych, zanieczyszczeniem środowiska i wreszcie wojną nuklearną. Dostrzega się również zagrożenie wynikające z nieograniczonego i niekontrolowanego działania uczonych.

Czy obawy te są słuszne?

Upadek meteorytu prawdopodobnie zapoczątkował wymieranie dinozaurów, ale życie biologiczne przetrwało, a nawet stało się bogatsze. Pandemie były, ale ludzkość je przetrwała. Dziś potrafimy im skutecznie zapobiegać. Co do wyczerpywania się zasobów naturalnych, to coraz racjonalniej je wykorzystujemy.[7] Mam nadzieję, że poradzimy sobie również z zanieczyszczeniem środowiska. Liczę też na mądrość polityków, że nie wywołają konfliktu, w którym użyto by broni jądrowej. Liczę również na mądrość uczonych, którzy nie dopuszczą do tego, by ich badania zagroziły naszemu bezpieczeństwu. Nie widzę zatem potrzeby emigrowania z Ziemi. A czy gdzieś tam byłoby lepiej i bezpieczniej?

Czy kolonizacja kosmosu jest możliwa?

Zastanawiający jest fakt, iż nie zauważono owej kolonizacji dokonanej przez inne wysoko rozwinięte

[6] Nazwa ta jest myląca. Twórczość ta powinna być raczej nazywana *pseudonaukową fikcją,* gdyż pełna jest fizycznych nonsensów.

[7] Łatwo dowieść, że ekspansja w Kosmos spowodowałaby szczególnie szybkie ich wyczerpanie.

eprasa.pl 02d20e786f

Astronauta NASA Nick Hague w module Destiny Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) uczy uczniów gimnazjów i szkół średnich unikalnych badań inżynieryjnych i operacji programu kosmicznego.

cywilizacje.[8] Przecież Kosmos istnieje już blisko 14 miliardów lat i owa cywilizacja mogła mieć dostatecznie dużo czasu, by tego dokonać. Astrofizyk rosyjski, prof. Józef Szkłowski twierdził, że prawdopodobieństwo występowania życia w Kosmosie nie jest duże,[9] gdyż do tego, by powstało, potrzebna jest koincydencja bardzo wielu czynników. Uważał też, że jeżeli taka cywilizacja istnieje, to mogła dojść do przekonania, że owa ekspansja nie jest racjonalna, gdyż wymaga olbrzymich zasobów energetycznych i surowcowych, co mogłoby zagrozić jej istnieniu. Zdecydowała się więc na trwanie w swoistym stanie „constans".[10]

Wydaje mi się, że jest to ze wszech miar słuszne. Podejmowane są i u nas działania w tym kierunku. Mam tu na myśli tzw. „ideę zrównoważonego rozwoju", wg której należy odpowiednio dobierać priorytety

[8] A. Einstein mawiał żartobliwie, że jedynym dowodem na istnienie owej cywilizacji jest to, że nie chce się z nami komunikować.

[9] Por. *O unikatowości ziemskiej cywilizacji we Wszechświecie* – wywiad z prof. J. S. Szkłowskim, „URANIA" 1977, nr 2, ss. 47-52. Prof. Szkłowski przez wiele lat poszukiwał śladów astroinżynierskiej działalności pozaziemskich cywilizacji i ich nie znalazł.

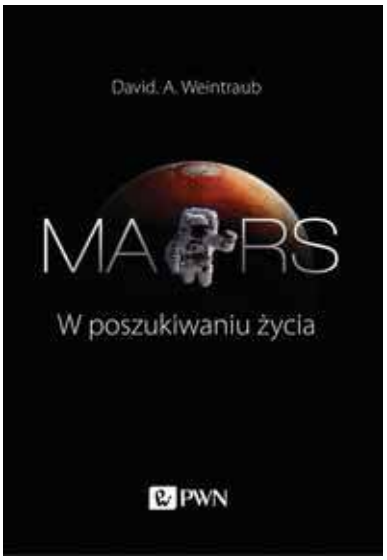
[10] Nie oznacza to zahamowanie postępu naukowo-technicznego, ale powinien to być postęp jakościowy, a nie ilościowy. Więcej na temat wywiadu prof. Szkłowskiego pisałem w artykule *Sceptyk w sprawie futurologicznych poglądów S. Hawkinga*, Fizyka w Szkole, 4/2008.

Nowości Wydawnictwa Naukowego PWN

Książka autorstwa Davida A. Weintrauba to pozycja unikatowa na polskim rynku wydawniczym obszernie i przekrojowo przedstawiająca historię badań Marsa i poszukiwania na nim śladów i dowodów istnienia życia. W trakcie tej podróży przez niemal dwa stulecia poznajemy badaczy Czerwonej Planety, ich motywacje, osiągnięcia oraz popełniane przez nich błędy. Czytelnik znajdzie tu uzasadnienie dla pojawiających się na przestrzeni niemal dwóch wieków twierdzeń o odkryciu inteligentnego życia na Marsie, kanałów, roślinności, porostów czy też metanu, który w przekonaniu wielu dowodzi istnienia procesów biologicznych na Marsie. Jednocześnie dowiadujemy się jak te twierdzenia były weryfikowane i rewidowane na przestrzeni lat, doprowadzając nas w końcu o obecnego poziomu wiedzy.

„Mars" przypadnie do gustu zarówno miłośnikom astronomii na co dzień niezwiązanym ze światem nauki, jak i specjalistom pragnącym dowiedzieć się w jaki sposób doszliśmy do obecnego stanu wiedzy o Czerwonej Planecie. Chronologiczne przedstawienie kolejnych tez, badań i wniosków może być szczególnie wartościowe dla studentów, astronomii, geologii, planetologii, chcących dobrze zgłębić tajniki procesu badań naukowych.

Radosław Kosarzycki „Puls Kosmosu"



Książka mimo że pisana w formie narracji, bardzo rzetelnie oddaje stan najnowszych badań astronomicznych, odwołując się do oryginalnych prac naukowych. Zawiera mnóstwo szczegółów, które składają się na pasjonującą opowieść o badaniach astronomicznych.

Prof. dr hab. inż. Grzegorz Karwasz
Zakład Dydaktyki Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

Czytając książkę, można wraz z autorem prześledzić chronologię powstawania i upadania teorii, dotyczących istnienia życia na Marsie, zwłaszcza od momentu, gdy okazało się, że ma on prawie takie samo nachylenie swojej osi obrotu do płaszczyzny orbity, jak Ziemia i że długość marsjańskiej doby niewiele różni się od naszej. Rozpaliło to wyobraźnię ówczesnych astronomów, a także ich następców. Z książki można dowiedzieć się, że astronomowie to też ludzie ze swoimi pragnieniami i słabościami, gdzie często szansa na zapisanie się w historii brała górę nad rzeczywistością i realnymi możliwościami badacza.

Ariel Majcher
Klub Astronomiczny Almukantarat Polskie Towarzystwo Miłośników Astronomii

Zwrócenie uwagi na niebagatelną kulturotwórczą rolę Marsa, o której zapomina się często, to nieoczywista, a znacząca zaleta książki Weintrauba. Poza tym jest ona oczywiście bardzo cenna z tradycyjnego puntu widzenia miłośników astronomii. Zaawansowanym przyniesie sporą ilość trudnych do zdobycia w inny sposób informacji źródłowych i bibliograficznych. Dla niezaawansowanych będzie przedstawieniem tego, co o Marsie wiedzą naukowcy dziś i jak do tego dochodzili przez wieki. Jednym i drugim książka Weintrauba, być może, wskaże drogę i stanowić będzie inspirację dla dalszych studiów, kto wie.

Prof. Tadeusz Wibig
Zakład Astrofizyki Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej UŁ

eprasa.pl 02d20e786f

badawcze i techniczne, mając na uwadze ograniczoność zasobów naturalnych i możliwości regeneracyjnych środowiska oraz możliwość zapewnienia należytych warunków życia przyszłych pokoleń. Takimi priorytetami jest środowisko przyrodnicze człowieka oraz nasze zdrowie i bezpieczeństwo – zarówno w wymiarze indywidualnym jak i zbiorowym.[11] Natomiast sprawą drugorzędną są coraz to nowsze gadżety oraz kosztowne loty w kosmos. Zrównoważony rozwój to taki rozwój, w którym wzrost gospodarczy prowadzi do podnoszenia jakości środowiska naturalnego poprzez ograniczanie szkodliwego wpływu produkcji i konsumpcji na jego stan oraz aktywną ochronę zasobów przyrodniczych.[12]

Wracając do problemu ewentualnej ekspansji w Kosmos, warto dokładniej przeanalizować związane z nią problemy. Oto kilka obliczeń:

Aby w rozsądnym czasie dotrzeć do najbliższych układów planetarnych, odległych powiedzmy o 100 lat świetlnych, powinniśmy poruszać się z prędkością bliską prędkości światła. Załóżmy, że osiągnęliśmy prędkość 0,98c.[13]

Oto kilka liczb związanych z tym lotem:

1⁰ Przyjmując, że kosmonauci mogą funkcjonować przez dłuższy czas przy przeciążeniu rzędu 1,5 g, to czas uzyskiwania przez rakietę tej prędkości wyniesie 231,5 doby, czyli prawie 8 miesięcy.[14] Potem należałoby tyle samo czasu poświęcić na hamowanie.

2⁰ W tym czasie statek pokonałby odległość ok. 3 biliony km, czyli prawie $^1/_3$ roku świetlnego!

3⁰ Uwzględniając efekt relatywistyczny, ów statek np. o masie np. 100 ton posiadałby 14 razy większą energię kinetyczną niż gdybyśmy nie uwzględnili wspomnianych efektów. Wymagałoby to również 14 razy większej energii do rozpędzenie tego statku do w/w prędkości. Należy zauważyć, że tyle też energii będzie potrzeba do jego zatrzymania, co powiększy masę startową statku.

4⁰ Czy moglibyśmy wówczas dotrzeć do układu planetarnego odległego po-wiedzmy o 100 lat świetlnych?

Teoretycznie – tak, bo zgodnie z STW, gdyby statek poruszał się z prędkością 0,98c, to kosmonauci tę odległość – wg ich zegara – pokonaliby w 20 lat. Jednak na Ziemi minęłoby wówczas lat 100. Poruszanie się więc z tak dużą prędkością sprawi, że praktycznie stracą oni możliwość kontaktu z bazą.

5⁰ Czy przy obecnym stanie techniki taka podróż jest możliwa?

Zgodnie ze wzorem Ciołkowskiego rakieta uzyska prędkość $v = v_o + u \cdot \ln(m_o/m)$, gdzie v – prędkość końcowa rakiety, v_o – jej prędkość początkowa, u – prędkość wyrzucanych spalin względem rakiety, m_o – masa startowa rakiety, m – jej masa końcowa.

Obecnie dysponujemy paliwem, które w najlepszym przypadku daje prędkość wypływu spalin rzędu 4 km/s (mieszanina wodoru i tlenu). Łatwo zauważyć, że wraz ze wzrostem v/v_o stosunek m_o/m szybko rośnie do nieskończoności. I tak np. przy stosunku v/u = 7, stosunek m_o/m przekracza już liczbę 1000. Obecnie, chcąc uzyskać prędkość 11 km/s, ów stosunek powinien wynieść co najmniej 14,5. W rzeczywistości musi być większy ze względu na ograniczoną sprawność silników rakietowych. W rakiecie Saturn wynosił on ok. 20. W przypadku prędkości relatywistycznych należałoby odpowiedni zmodyfikować wzór Ciołkowskiego, co jeszcze zmniejszyłoby możliwość uzyskiwania przez rakietę tych prędkości. Paliwa, które obecnie są stosowane nie pozwalają na rozwijanie dostatecznych prędkości rakiet. Potrzebne byłoby paliwo, które charakteryzowałoby się znacznie większymi prędkościami wypływu. Takiego paliwa może dostarczyć jedynie reakcja termojądrowa, która – jak dotąd – jeszcze nie została opanowana. A ponadto nie wyobrażam sobie rakiety i jej napędu wykorzystującego ten typ reakcji. A co do techniki rakietowej, to w zasadzie nie uległa zmianie od 60 lat, czyli od wystrzelenia Sputnika (4 X 1957). Nie należy wiec oczekiwać na tym polu jakiegoś spektakularnego postępu.

Jest jeszcze jeden niedostrzegany problem związany z ruchem statku kosmicznego z tak dużą prędkością, a mianowicie: oddziaływanie materii międzygwiezdnej (śr. 1 atom na cm^3) z powierzchnią statku. Obawiam się, że ów efekt może uniemożliwić poruszanie się statków z bardzo dużymi prędkościami.

Wszystko, co wyżej napisałem dowodzi, że ruch statków kosmicznych z prędkościami relatywistycznymi nie jest możliwy, a więc i idea penetracji Kosmosu jest jedynie mrzonką futurologów.

I na koniec konkluzja:

Pomysły na podróże międzygwiezdne zostawmy autorom książek i filmów *science-fiction.* Podróże owe uniemożliwiają bowiem ogromne odległości. One też sprawiają, że jeżeli nawet nie jesteśmy w Kosmosie sami, to na pewno jesteśmy w nim osamotnieni. A jeżeli tak, to doceńmy ten fakt, że może jesteśmy w tej chwili jedynymi istotami obdarzonymi świadomością istnienia NAS i KOSMOSU, co – jak pisał prof. Szkłowski – skłonić powinno nas do szacunku dla życia, do lepszych i bardziej godnych zachowań, do wzajemnego zrozumienia, a w efekcie do zachowania tej naszej pięknej oazy życia i rozumu w bezdennych otchłaniach Kosmosu. Przyroda dała nam szansę zaistnienia, ale dalsze nasze losy zależą w dużej mierze od nas samych! Zamiast myśleć o emigracji z Ziemi, postarajmy się, by żyło się nam na niej dobrze, bezpiecznie i mądrze!

Waldermar Reńda

---

[11] Mam tu na myśli choćby ochronę zdrowia oraz fakt ogromnej liczby wypadków drogowych a takżeprzestępstwa przeciwko zdrowiu i życiu poszczególnych osób. Dotyczy to również wojen i innych konfliktów zbrojnych.

[12] Szerzej omówiłem ten problem w art. *Fizyka a ekologia*, Fizyka w Szkole, nr 1/2015, a także w art. *Przyszłość – nadzieja czy katastrofa*, Geografia w Szkole, nr 1/2015.

[13] Nie sądzę, by taką prędkość można było kiedykolwiek osiągnąć!

[14] Będzie on dla kosmonautów nieco krótszy, gdyż pod koniec przyspieszania statek osiągnie prędkość relatywistyczną. Nie uwzględniłem też efektów wynikających z OTW.

eprasa.pl 02d20e786f

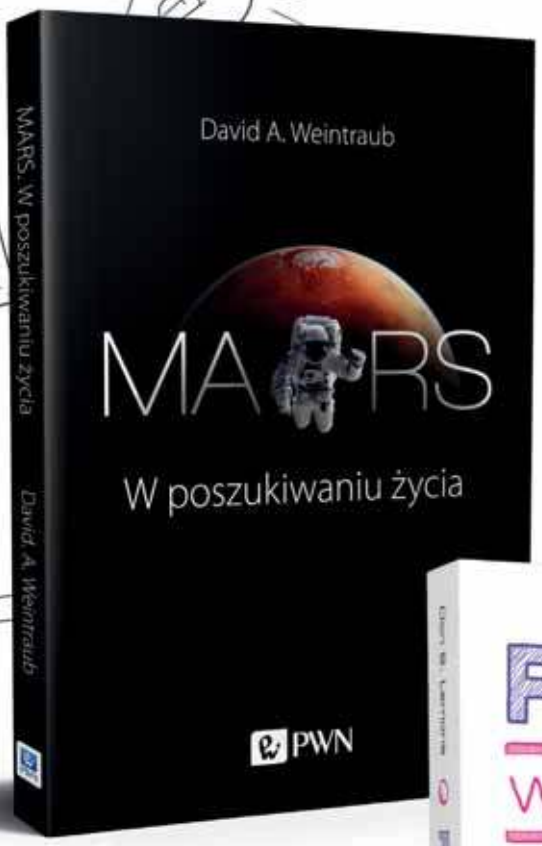
Wiemy jak poruszyć wyobraźnię

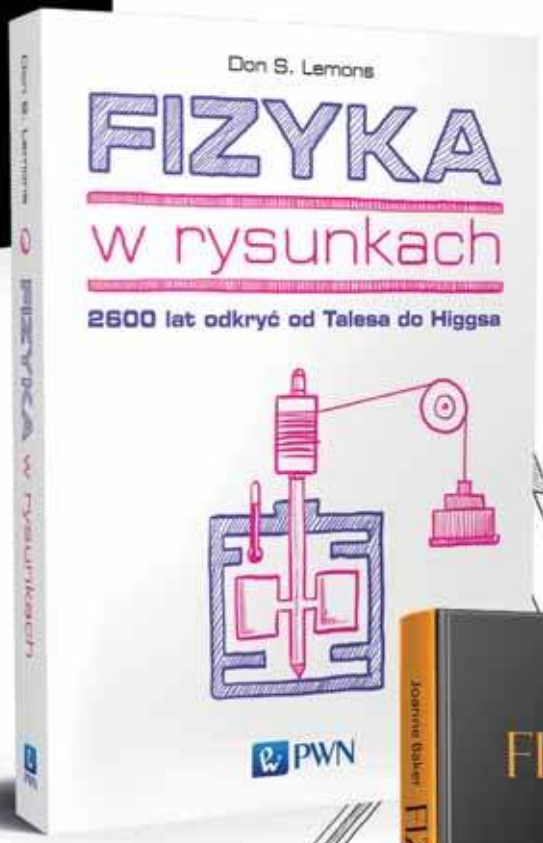
Prenumerata 2020

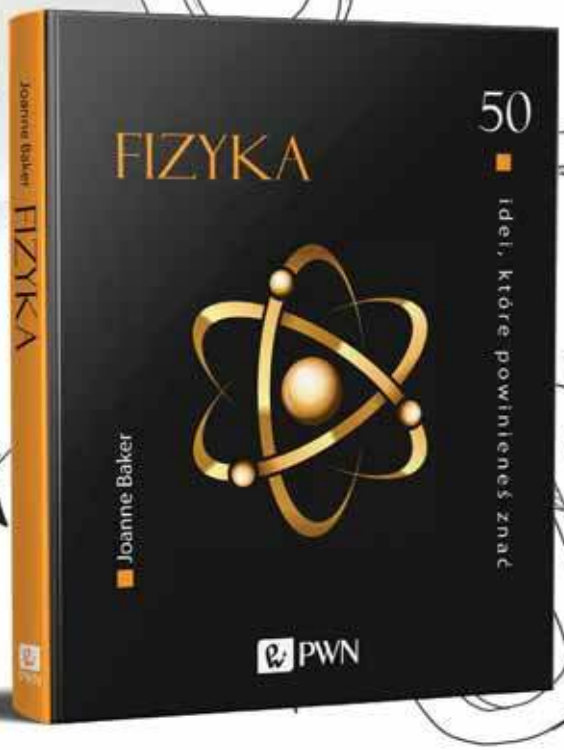
Formularz zamówienia na: www.aspress.com.pl/prenumerata-2020/

eprasa.pl 02d20e786i

Książki, dzięki którym POKOCHASZ FIZYKĘ







PWN
Moc wiedzy

Sprawdź rabaty na
ksiegarnia.pwn.pl

eprasa.pl 02d20e786f