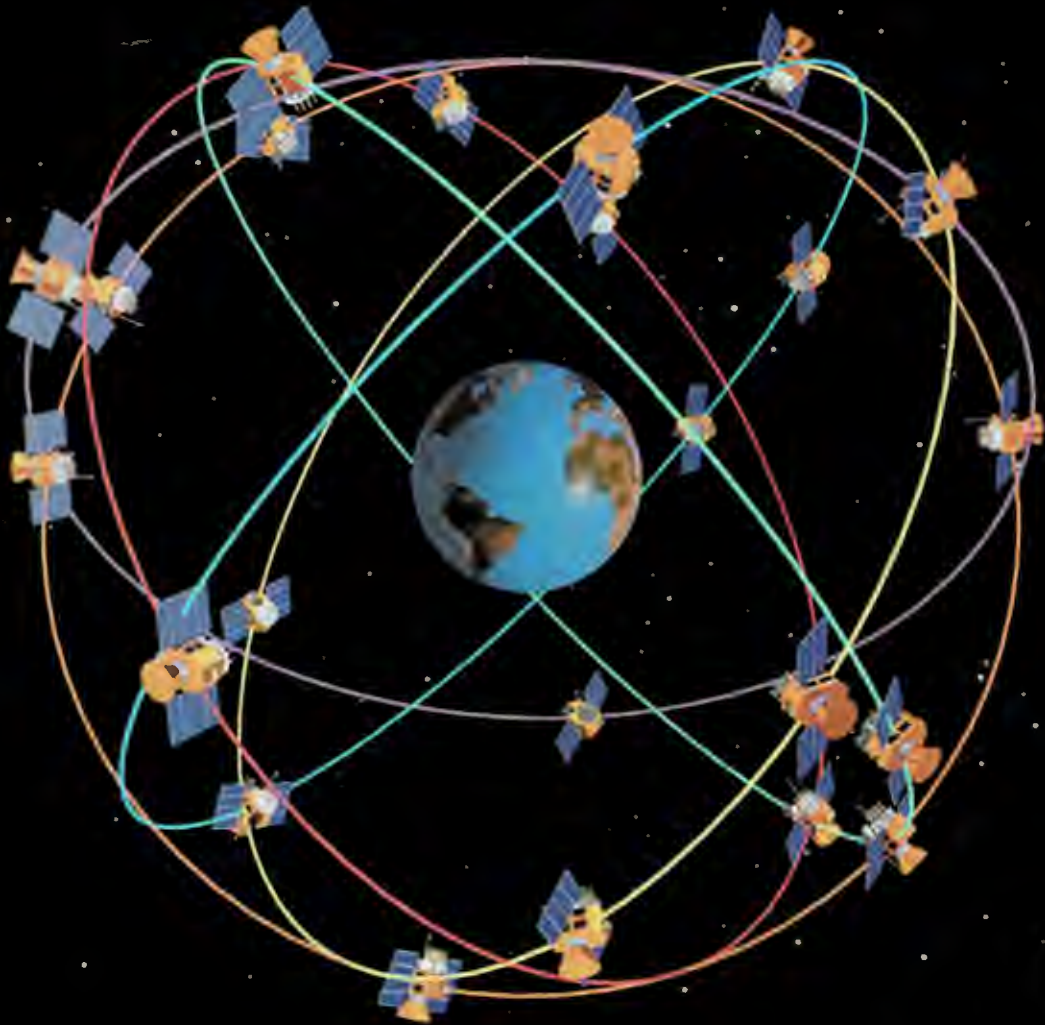


POSTĘPY FIZYKI

Dwumiesięcznik Polskiego Towarzystwa Fizycznego



GPS

Metoda zol-žel

Kwanty kontra STW?



ISSN 0032-5430



NOWE WŁADZE PTF (2010–2013)

Prezes



Wiesław A. Kamiński

Sekretarz Generalny



Bohdan Grządkowski

Skarbnik



Kazimierz Piotrowski

Członkowie Zarządu Głównego



Jacek M. Baranowski



Mariusz P. Dąbrowski



Maria Dobkowska



Henryk Figiel



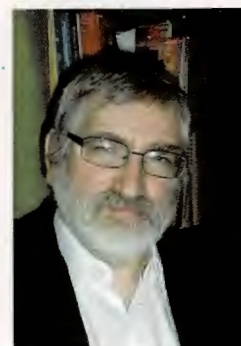
Jacek P. Goc



Zofia Gotąb-Meyer



Bernard Jancewicz



Stefan Kruszewski



Andrzej Ślebarski



Jerzy Warczewski



Andrzej Zięba



Elżbieta Zipper

RADA REDAKCYJNA

Andrzej Kajetan Wróblewski (przewodniczący), Mieczysław Budyński, Andrzej Dobek, Witold Dobrowolski, Zofia Gołąb-Meyer, Adam Kiejna, Józef Szudy

REDAKTOR HONOROWY

Adam Sobiczewski

KOMITET REDAKCYJNY

Jerzy Warczewski (redaktor naczelny), Ewa Lipka (sekretarz redakcji), Mirosław Łukaszewski (redaktor techniczny), Magdalena Staszal

Adres Redakcji:

ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa, e-mail: postepy@fuw.edu.pl, Internet: postepy.fuw.edu.pl

KORESPONDENCI ODDZIAŁÓW PTF

Maciej Piętka (Białystok), Aleksandra Wronkowska (Bydgoszcz), Wojciech Gruhn (Częstochowa), Tomasz Jarosław Wąsowicz (Gdańsk), Roman Bukowski (Gliwice), Beata Kozłowska (Katowice), Aldona Kubala-Kukuś (Kielce), Małgorzata Nowina Konopka (Kraków), Elżbieta Jartych (Lublin), Michał Szanecki (Łódź), Halina Pięta (Opole), Maria Połomska (Poznań), Małgorzata Pociąg (Rzeszów), Małgorzata Kuzio (Stupsk), Janusz Typek (Szczecin), Winicjusz Drozdowski (Toruń), Aleksandra Miłosz (Warszawa), Bernard Jancewicz (Wrocław), Joanna Borgensztajn (Zielona Góra)

POLSKIE TOWARZYSTWO FIZYCZNE

ZARZĄD GŁÓWNY

Reinhard Kulessa (prezes), Jacek M. Baranowski (sekretarz generalny), Roman Puźniak (skarbnik), Przemysław Dereń, Mirosław Trociuk i Jerzy Warczewski (członkowie wykonawczy), Bolesław Augustyniak, Maria Dobkowska, Stanisław Dubiel, Henryk Figiel, Jacek Przemysław Goc, Zofia Gołąb-Meyer, Bernard Jancewicz i Ewa Kurek (członkowie)

Adres Zarządu:

ul. Hoża 69, 00-681 Warszawa, tel./fax: 022-6212668, e-mail: ptf@fuw.edu.pl, Internet: ptf.fuw.edu.pl

PRZEWODNICZĄCY ODDZIAŁÓW PTF

Eugeniusz Żukowski (Białystok), Stefan Kruszewski (Bydgoszcz), Józef Zbrozyczek (Częstochowa), Bolesław Augustyniak (Gdańsk), Bogusława Adamowicz (Gliwice), Wiktor Zipper (Katowice), Małgorzata Wysocka-Kunisz (Kielce), Stanisław Wróbel (Kraków), Jerzy Żuk (Lublin), Tadeusz Wibig (Łódź), Stanisław Waga (Opole), Roman Świetlik (Poznań), Małgorzata Klisowska (Rzeszów), Włodimir Tomlin (Stupsk), Mariusz P. Dąbrowski (Szczecin), Grzegorz Karwasz (Toruń), Mirosław Karpierz (Warszawa), Bernard Jancewicz (Wrocław), Marian Olszowy (Zielona Góra)

REDAKTORZY NACZELNI INNYCH CZASOPISM

WYDAWANYCH POD EGIDĄ PTF

Witold D. Dobrowolski – *Acta Physica Polonica A*, Kacper Zalewski – *Acta Physica Polonica B*, Andrzej Jamiołkowski – *Reports on Mathematical Physics*, Marek Kordos – *Delta*, Zofia Gołąb-Meyer – *Foton*, Zbigniew Wiśniewski (redaktor prowadzący) – *Fizyka w Szkole*

Czasopismo ukazuje się od 1949 r.

Wydawca: Polskie Towarzystwo Fizyczne

Dofinansowanie: Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego

Patronat: Wydział Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego

Skład komputerowy w redakcji

Opracowanie okładki: Studio Graficzne etNova Piotr Zenda i Wspólnicy sp.j., tel.: 022-8735520, e-mail: etnova@etnova.pl

Druk i oprawa: „UNI-DRUK”, Warszawa, ul. Buńczuk 7b

ISSN 0032-5430

SPIS TREŚCI

M. Urbanowska, P. Gusin – GPS a teoria względności	134
PTF	150
L. Lipińska – Nanomateriały zol-żel dla optoelektroniki i fotowoltaiki	151
L.M. Sokołowski – Czy mechanika kwantowa zagraża szczególnej teorii względności?	159
T. Pabjan – Upiorne oddziaływanie na odległość	166
ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI	169
RECENZJE	171
NOWI PROFESOROWIE	174
KRONIKA	175

Drodzy Czytelnicy,

Zeszyt 4 Postępów przynosi cztery artykuły oraz tradycyjne stałe rubryki. Artykuł oparty na wykonanej pod kierunkiem Pawła Gusina pracy magisterskiej Marty Urbanowskiej opisuje zasadę działania i zastosowanie GPS, jednego z najbardziej niezwykłych urządzeń naszych czasów, w którego oprogramowaniu tak fundamentalną rolę odgrywają algorytmy oparte na szczególnej i ogólnej teorii względności, idee zaś mechaniki kwantowej leżą u podstaw działania zegarów atomowych zainstalowanych na 25 satelitach stanowiących integralną część całego układu. Artykuł Ludwika Lipińskiej jest kolejnym z cyklu firmowanego przez Polskie Towarzystwo Wzrostu Kryształów i przedstawia otrzymane metodą zol-żel nanomateriały, które spełniają wymagania dla zastosowań w tak dynamicznie rozwijających się dziedzinach fizyki jak optoelektronika i fotowoltaika. Leszek M. Sokołowski w swoim artykule zwraca uwagę na rozmaite prace, które jakoby miałyby wskazywać na konflikt między fundamentalnymi ideami mechaniki kwantowej i szczególnej teorii względności. Jednakże znakomity ten relatywista wykazuje, że żadna z tych dwóch fundamentalnych dziedzin fizyki nie „zagroza” drugiej, wszelkie bowiem nieporozumienia w tej materii biorą się z naszego, wciąż niepełnego rozumienia mechaniki kwantowej, to ostatnie zaś świadczy o potrzebie jej rozwinięcia jako teorii. Artykuł Tadeusza Pabjana jest kolejnym z cyklu esejów Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych i dotyczy jak gdyby części problemu przedstawianego w artykule Leszka M. Sokołowskiego, omawia bowiem bardziej szczegółowo nielokalność obiektów kwantowych i związane z nią zjawisko splątania. Czyni to głównie w aspekcie historycznym sporu o interpretację mechaniki kwantowej oraz twierdzenia Bella.

Polecam stałe i jak zwykle ciekawe rubryki, takie jak PTF, ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI, RECENZJE, NOWI PROFESOROWIE, KRONIKA.

Jerzy Warczewski

Na okładce:

Konstelacja satelitów nawigacyjnych NAVSTAR (źródło: strona Aerospace Corporation) – patrz artykuł o systemie GPS na następnej stronie.

GPS a teoria względności*

Marta Urbanowska, Paweł Gusin

Zakład Fizyki Kryształów, Instytut Fizyki, Uniwersytet Śląski, Katowice

GPS and the theory of relativity

Abstract: GPS – the Global Positioning System is most amazing and fascinating of recent technologies. It serves the determination of positions of different objects and makes good use in its action of the assumptions of the theory of both special and general relativity as well as of the quantum mechanics. The paper is devoted to the action of GPS and to the discussions on the amendments arising from the theories of both special and general relativity. It is divided into three parts corresponding to the individual chapters. The first part describes GPS. The notion of GPS is defined, the history of this navigation system is presented, as well as the information on its early days, for whom it was created and in which aim, what were its parameters of the measurement accuracy and how did they change nowadays. In this chapter the construction of GPS is described, i.e. the precise description of the individual elements of which the whole system consists: the cosmic component, the earth component and the user's component. The second part of the paper concerns the applications of the theory of relativity in GPS. Some essential definitions and relationships from the theory of both the special and general relativity have been here outlined. The question is here about first of all such notions as: spacetime, spacetime interval and Lorentz's transformations, which are explained in the theory of special relativity, as well as the Einstein equations and the Schwarzschild metric, which are described in the theory of special relativity. The third part is devoted to the relativistic phenomena which essentially influence the determination of the time amendments in GPS, the latter being as follows: the shift of the frequencies of signals (towards violet and red), the Sagnac effect and the time coordinate. Each of these effects introduces the time difference between the satellite clock and the receiver which is essential in the process of synchronization. To make possible to describe the relativistic phenomena mentioned above, several frames of reference have been introduced (ECI, ECEF, ICRF) which are useful to the formulation of the corresponding equations of motion of satellites and the receivers of signals on the Earth's surface. The passing over the errors following from the relativistic phenomena mentioned above could cause big discrepancies in the determination of the position and the GPS would stop function at all.

Globalny System Pozycjonowania (Global Positioning System) jest najbardziej fascynującym urządzeniem naszych czasów, służącym do określania pozycji różnych obiektów i wykorzystującym w swoim działaniu założenia ogólnej i szczególnej teorii względności, a także mechaniki kwantowej. Praca jest poświęcona działaniu GPS oraz rozważaniom nad poprawkami wynikającymi z ogólnej i szczególnej teorii względności. Jest ona podzielona na trzy części, odpowiadające poszczególnym rozdziałom. Pierwsza część opisuje GPS. Zdefiniowano tu pojęcie GPS, przedstawiono historię systemu nawigacji, a także informacje o jego początkach, dla kogo powstał i w jakim celu, jakie były początkowe parametry dokładności pomiaru i jak zmieniły się obecnie. W rozdziale tym opisana jest również budowa GPS (dokładny opis poszczególnych elementów składających się na cały system: składowa kosmiczna, składowa naziemna oraz składowa użytkownika). Druga część pracy dotyczy zastosowania teorii względności w GPS. Przybliżono tutaj kilka istotnych definicji i zależności ze szczególnej i ogólnej teorii względności. Mowa tu przede wszystkim o takich pojęciach jak: czasoprzestrzeń, interwał czasoprzestrzenny i transformacje Lorentza, które wyjaśnia szczególna teoria względności, oraz równania Einsteina i metryka Schwarzschilda, które opisuje ogólna teoria względności. Część trzecia poświęcona jest zjawiskom relatywistycznym, które mają zasadniczy wpływ na wyznaczanie poprawek czasowych w GPS, takich jak: przesunięcie częstotliwości sygnałów (w stronę fioletu i ku czerwieni), zjawisko Sagnaca oraz współrzędna czasowa. Każde z nich wnosi różnicę czasową między zegarem satelity i odbiornika istotną w procesie synchronizacji. Aby móc opisać wymienione wcześniej zjawiska relatywistyczne wprowadzono kilka układów odniesienia (ECI, ECEF, ICRF) przydatnych do sformułowania odpowiednich równań ruchu satelitów i odbiorników sygnałów na powierzchni Ziemi. Pominięcie błędów wynikających z wymienionych zjawisk relatywistycznych powodowałoby duże rozbieżności w określaniu położenia i GPS przestałby funkcjonować.

*Tekst artykułu oparty jest na wykonanej pod kierunkiem dr Pawła Gusina pracy magisterskiej mgr Marty Urbanowskiej.

Wstęp

Wyznaczanie położenia na powierzchni Ziemi było i jest ważnym problemem w życiu cywilizacji opartym na wymianie dóbr materialnych i rozwiązywaniu zagadnień geodezyjnych kuli ziemskiej. Od momentu wprowadzenia systemu globalnego pozycjonowania, który jest reprezentowany przez GPS, problem nawigacji, zarówno na lądach i oceanach, jak i w powietrzu został rozwiązany całkowicie.

Praca ta jest poświęcona działaniu GPS oraz rozważaniom nad poprawkami wynikającymi z ogólnej i szczególnej teorii względności.

W rozdziale pierwszym zdefiniowano pojęcie GPS i przedstawiono jego historię. GPS jest urządzeniem, dzięki któremu możemy określić swoje położenie i monitorować trasę, po której się poruszamy. Tutaj znajdziemy także informacje o początkach systemu nawigacji, dla kogo powstał i w jakim celu, jakie były początkowe parametry dokładności pomiaru i jak zmieniły się obecnie. Rozdział pierwszy jest również poświęcony budowie GPS. Znajduje się w nim dokładny opis poszczególnych elementów składających się na cały system (składowa kosmiczna, składowa naziemna oraz składowa użytkownika). Składową kosmiczną tworzą 32 satelity umieszczone na wysokości 20 162 km na orbitach kołowych nachylonych względem płaszczyzny równika pod kątem 55° lub 63° . Przedstawiono tutaj także schemat budowy satelity oraz krótko opisano jego elementy składowe i ich funkcje. Składową naziemną, inaczej składową kontroli stanowi 5 zlokalizowanych w pobliżu równika stacji kontrolnych: Głównej Stacji Nadzoru w Bazie Sił Powietrznych USA Falcon w Colorado Springs i stacji pomocniczych w Kwajalein, Diego Garcia, Ascension i na Hawajach. Element użytkownika składa się z odbiorników GPS samodzielnie funkcjonujących lub wbudowanych w inne systemy, których zadaniem jest odbieranie, dekodowanie i przetwarzanie sygnałów GPS. Odbiorniki te różnią się funkcjami i konstrukcją pod względem ich zastosowania: w nawigacji (powietrznej, morskiej, lądowej), wyznaczaniu pozycji, transferze czasu, pomiarach geodezyjnych i wielu innych. Po scharakteryzowaniu budowy systemu nawigacji satelitarnej przedstawiona została zasada jego działania. Opiera się ona na pomiarze odległości pomiędzy odbiornikiem a satelitą, poruszającym się po ściśle wyznaczonej orbicie.

Rozdział drugi został podzielony na cztery zasadnicze części. Pierwsza poświęcona jest szczególnej teorii względności (STW). Tutaj zdefiniowano takie pojęcia jak: czasoprzestrzeń oraz interwał czasoprzestrzenny. Opisano także transformację Lorentza i wynikające z tych przekształceń wnioski tj.: dylatacja czasu, równoważność masy i energii, względność jednoczesności, kontrakcja przestrzeni, reguły dodawania prędkości oraz zwiększenie masy przy zwiększaniu prędkości ciała. Druga część dotyczy ogólnej teorii względności (OTW), zwanej również teorią grawitacji Einsteina. OTW jest uogólnieniem STW (obowiązującej dla inercjalnych układów odniesienia) rozszerzonym na dowolne układy odniesienia, wśród któ-

rych występują także układy nieinercjalne. W podrozdziale tym przedstawiony został związek między geometrią czasoprzestrzeni a rozkładem mas. Tutaj znajdziemy również wyprowadzenie równań Einsteina opisujących związek między zakrzywieniem czasoprzestrzeni (tensorem metrycznym $g_{\mu\nu}$) a rozkładem materii opisanej tensorem energii–pędu $T_{\mu\nu}$. Trzeci fragment przedstawia rozwiązania równań Einsteina. Przede wszystkim mowa tutaj o metryce Schwarzschilda, która całkowicie określa pole grawitacyjne w próżni wytworzone przez nieobracający się układ o centralnie symetrycznym rozkładzie materii. Są tam również podane postacie interwałów czasoprzestrzennych grawitacyjnie zapadającego się ciała kulistego bez momentu pędu i z momentem pędu. W części czwartej tego rozdziału znajdują się wyprowadzenia równań ruchu cząstek, wykorzystując dwa założenia dla pola grawitacyjnego, mianowicie że jest ono słabe i statyczne.

W rozdziale trzecim zostały przedstawione zjawiska relatywistyczne, które mają zasadniczy wpływ na wyznaczanie poprawek czasowych w systemie GPS takie jak: przesunięcie częstotliwości sygnałów (w stronę fioletu i ku czerwieni), zjawisko Sagnaca oraz współrzędna czasowa. Jest on podzielony na trzy podrozdziały poświęcone tym zjawiskom. Każde z nich wnosi różnicę czasową między zegarem satelity i odbiornika istotną w procesie synchronizacji (przesunięcie częstotliwości w stronę fioletu: $45\,700\text{ ns} = 45,7\text{ }\mu\text{s}$, przesunięcie częstotliwości w stronę czerwieni: $7\,100\text{ ns} = 7,1\text{ }\mu\text{s}$, zjawisko Sagnaca: $207,4\text{ ns}$ oraz współrzędna czasowa: $38,58\text{ }\mu\text{s}$). Aby móc opisać wymienione wcześniej zjawiska relatywistyczne wprowadzono kilka układów odniesienia (ECI, ECEF, ICRF) przydatnych do sformułowania odpowiednich równań ruchu satelitów i odbiorników sygnałów na powierzchni Ziemi.

I. Definicja GPS i jego historia

I.1. Definicja GPS

Omawiając historię i sposób działania nawigacji satelitarnej GPS należy rozpocząć od zdefiniowania czym ona jest i do czego służy. Zgodnie z wydaniem 2005 *Encyklopedii PWN* GPS definiujemy następująco: „GPS, ang. Global Positioning System, globalny system wyznaczania pozycji (lokalizacji) obiektów wykorzystujący sztuczne satelity Ziemi, przeznaczony do ciągłego, szybkiego i dokładnego wyznaczania trzech współrzędnych, określających pozycję anteny odbiornika osobistego albo zainstalowanego na obiekcie stałym lub ruchomym, znajdującym się na lądzie, wodzie lub w powietrzu”.

Dzięki urządzeniu, jakim jest GPS, możemy zlokalizować swoje położenie oraz monitorować trasę, po której się poruszamy.

I.2. Historia GPS

Badania, jakie zostały przeprowadzone w 1957 roku, są uważane za początek nawigacji satelitarnej. Wtedy to naukowcy z Johns Hopkins University w Baltimore w Stanach Zjednoczonych, używając sygnałów radiowych wysyłanych przez radzieckiego satelitę Sputnik I, przedstawili możliwość wykorzystania do nawigacji sztucznych

satelitów Ziemi. Jednym z pierwszych ogólnie dostępnych, skutecznych systemów nawigacji satelitarnej był opracowany dla amerykańskiej marynarki wojennej system Transit–SATNAV powstały na przełomie lat pięćdziesiątych i sześćdziesiątych dwudziestego wieku. W 1964 r. ogłoszono jego zdolność operacyjną, a w 1967 r. system ten został udostępniony także do celów cywilnych. Podstawę systemu Transit stanowiło sześć okrążających Ziemię satelitów, które nadawały sygnały na częstotliwościach 150 MHz i 400 MHz. Pozycja określana była poprzez wykorzystanie zjawiska Dopplera. Aby był on wyraźny, satelity umieszczone zostały na niskich orbitach w odległości 1100 km od powierzchni Ziemi. System Transit nie zapewniał jednak pokrycia całego obszaru Ziemi ze względu na niewielką liczbę satelitów.

W tym samym okresie zbudowano radziecki odpowiednik systemu Transit, czyli system Cykada. Systemy te wykorzystano do zbierania informacji w zakresie nawigacji satelitarnej. Na podstawie doświadczeń Amerykanów rozpoczęto prace nad różnymi, nowymi układami nawigacji satelitarnej, między innymi były to programy: TIMATION Marynarki Wojennej USA i 621 B Wojsk Powietrznych USA w 1968 roku. W 1973 r. rozpoczęto projekt DNSS (Defense Navigation Satellite System) koordynowany przez Ministerstwo Obrony USA. W 1973 r. powołane zostało Połączone Biuro Programu JPO (Joint Program Office) i rozpoczęto pierwszą fazę projektu, którego wynikiem okazał się system GPS–NAVSTAR (Global Positioning System – NAVigation Signal Timing And Ranging). Od początku lat osiemdziesiątych GPS był stopniowo udostępniany w wersji PPS (Precision Positioning Service) z błędem wyznaczania pozycji poziomej wynoszącym mniej niż 10 m autoryzowanym użytkownikom wojskowym. Gdy wymiary i ceny odbiorników zmalały, także użytkownicy cywilni zaczęli domagać się dostępu do systemu. Uruchomiono więc wersję ogólnodostępną SPS (Standard Positioning Service) z tzw. Ograniczonym Dostępem SA (Selected Availability), w której błąd wyznaczania pozycji wynosił 500 m.

Ze względu na wzrost zainteresowania GPS-em poprawiono dokładność wersji, a mianowicie zmniejszono błąd wyznaczania pozycji do 100 m. Producentom sprzętu udało się poprawić dokładność odbiorników cywilnych, by osiągała poziom dokładności wersji PPS. Opracowano koncepcję wersji różnicowej DGPS (Differential GPS), w której eliminowane były niektóre rodzaje błędów i celowo wprowadzane zakłócenia SA. Po wprowadzeniu na orbity i uruchomieniu wszystkich planowanych satelitów oficjalnie ogłoszono GPS w pełni operacyjnym, czyli spełniającym wymagania podane w oficjalnych specyfikacjach systemu (27 kwietnia 1995 r.) [1].

W latach osiemdziesiątych zrodził się pomysł budowy w Europie systemu nawigacji satelitarnej: Galileo. Aktualnie jest on w trakcie budowy, która planowo ma potrwać do 2012 roku. Galileo ma być równoważną alternatywą do amerykańskiego GPS i rosyjskiego GLONASS, lecz w przeciwieństwie do nich będzie kontrolowany przez instytucje cywilne. Pierwsza faza prac, zwana fazą defini-

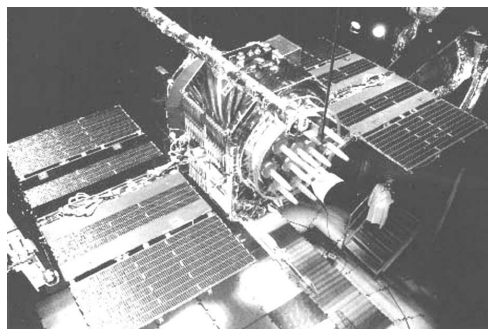
cji, rozpoczęła się 19 lipca 1999 i zakończyła 22 listopada 2000 roku. Wtedy to przeanalizowano potrzeby przyszłych użytkowników systemu i określono techniczne, ekonomiczne i programowe aspekty realizacji projektu. W roku 2002 rozpoczęła się druga faza budowy, tzw. faza wdrażania, która planowo miała zakończyć się w 2006 roku. Obejmowała ona szczegółowe zdefiniowanie parametrów technicznych i opracowanie projektu segmentów: naziemnego, kosmicznego i użytkownika. W pierwszym etapie testów systemu, zakończonym 22 grudnia 2004 roku, dokonano udanych testów segmentu naziemnego. Drugi etap rozpoczął się 28 grudnia 2005 r. wyniesieniem na orbitę pierwszego testowego satelity systemu, GIOVE-A. Trzecia faza budowy ma obejmować umieszczenie wszystkich operacyjnych satelitów na orbitach okołoziemskich oraz pełne uaktywnienie segmentu naziemnego [2].

I.3. Budowa GPS

Strukturę GPS stanowią trzy podstawowe elementy, są to:

- ▶ składowa kosmiczna,
- ▶ składowa kontroli (naziemna),
- ▶ składowa użytkownika.

I.3.1. Składowa kosmiczna



Rys. 1. Satelita GPS

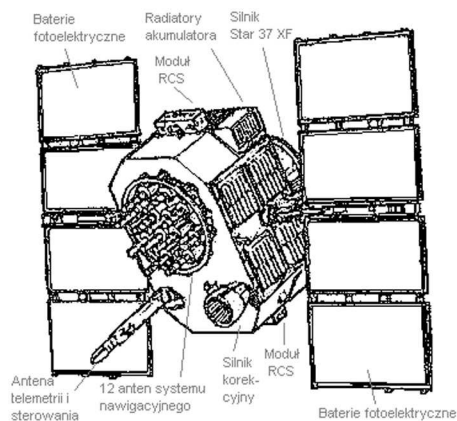
(<http://pl.wikipedia.org/wiki/Grafika:Navstar.jpg>)

Składową kosmiczną tworzą 32 (stan na 28 grudnia 2008 r.) satelity umieszczone na orbitach kołowych na wysokości 20 162 km. Orbitsy te nachylone są względem płaszczyzny równika pod kątem 55° (Block IIA, IIR, IIR-M) lub 63° (Block I). Około 28 satelitów jest stale czynnych, a pozostałe są testowane bądź wyłączane z przyczyn technicznych. Satelita obiega orbitę w czasie równym połowie doby gwiazdowej (11 h 58 min) [1,3,4]. Obserwator, znajdujący się na Ziemi, zaobserwuje tę samą konstelację satelitów codziennie, o prawie tej samej porze. Dzieje się tak, ponieważ każdego dnia taki układ powtarza się o cztery minuty wcześniej z powodu różnicy pomiędzy długościami doby słonecznej i gwiazdowej. Satelity rozmieszczone są tak, że co najmniej 5 z nich powinno być widocznych z każdego punktu Ziemi. Taka konfiguracja umożliwia wyznaczenie współrzędnych dowolnego miejsca na powierzchni Ziemi w dowolnym momencie doby.

Satelita Navstar posiada kilka systemów koniecznych do prawidłowego funkcjonowania na orbicie:

- ▶ system wprowadzania na orbitę (służy do wprowadzania satelity z orbity parkingowej, na której został umieszczony przez raketę nośną, na kołową orbitę roboczą),
- ▶ system kontroli wysokości i prędkości (utrzymuje korpus satelity w odpowiednim położeniu względem Ziemi i Słońca; składa się z bezwładnościowego układu sterowania oraz podsystemu optycznego do sterowania ustawieniem ogniw słonecznych i czujników promieniowania ziemskiego),
- ▶ system kontroli orientacji (steruje zespołem hydryzynowych silników korekcyjnych i za ich pomocą dokonuje zmiany położenia lub orientacji całego satelity),
- ▶ system śledzenia, telemetrii i sterowania (obejmuje wszystkie układy służące do telemetrii, aktywnej lokalizacji, zdalnego sterowania i kontroli systemów satelity),
- ▶ system nawigacyjny (to zespół urządzeń realizujących zasadnicze zadania satelity Navstar, czyli utrzymywanie czasu oraz generowanie i emitowanie sygnałów),
- ▶ system wykrywania wybuchów jądrowych (NUDET – Nuclear Detonation Detection System – dysponuje czujnikami promieniowania X, detektorem impulsu elektromagnetycznego i radiometrem optycznym),
- ▶ system kontroli termicznej (zapewnia izolację cieplną systemów satelity od ekstremalnych warunków panujących na wysokich orbitach),
- ▶ blok zasilania konstrukcji nośnej (zasilanie systemów zapewniają dwie baterie słoneczne o wspólnej powierzchni 7,25 m² i mocy 700 W) [5].

Na rysunku 2 jest przedstawiony model satelity.



Rys. 2. Budowa satelity GPS
(<http://gps-navstar.webpark.pl/satelity.html>)

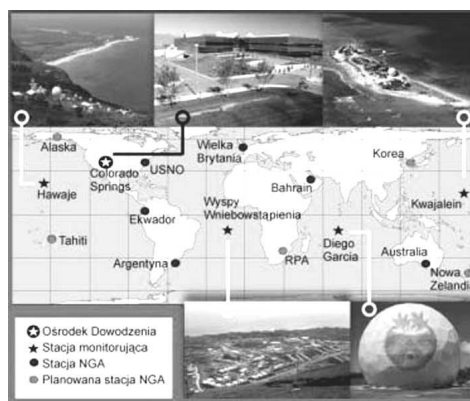
Sercem satelity są cztery atomowe wzorce czasu: dwa rubidowe i dwa cezowe, wzajemnie się uzgadniające. Wybór zegara zasadniczego odbywa się zdalnie, na sygnał głównej stacji kontrolnej. Zegar cezowy wymaga konserwacji („pompowania”) około dwa razy do roku, co powoduje wyłączenie satelity na średnio 18 godzin. Zespół anten składa się z dwunastu elementów promieniujących o długości 62 cm (51 cm w satelitach blok I) i średnicy

7 cm. Elementy anteny są wykonane z laminatu grubości 0,5 cm i metalizowane. Dla otrzymania właściwego kształtu charakterystyki promieniowania, anteny są ustawione w dwa koncentryczne okręgi: wewnętrzny (4 elementy) o średnicy 15 cm i zewnętrzny (8 elementów) o średnicy 44 cm. Wewnętrzne anteny mają nieco wyższe podstawy. Anteny okręgu wewnętrznego i zewnętrznego są zasilane w przeciwfazie, z tym, że 90% mocy dostaje okrąg zewnętrzny [5].

Satelity emitują sygnały na 2 częstotliwościach: sygnał L1 = 1575,42 MHz mający falę nośną o długości 19 cm i sygnał L2 = 1227,6 MHz o fali nośnej 24 cm. Sygnały te są modulowane odpowiednimi kodami binarnymi (0,1) i odbierane przez anteny odbiorników naziemnych. Sygnał L1 modulowany jest kodem C/A, tzn., że jest to sygnał dla użytku cywilnego, drugi L2 kodem P przeznaczonym dla wojska. Obydwie częstotliwości są ponadto modulowane kodem, zawierającym pakiet informacji dotyczących parametrów orbity satelity i poprawki zegara satelity, efemeryd pozostałych aktywnych satelitów oraz innych informacji umożliwiających pracę odbiornika i urządzeń satelity. Kody P i C/A służą do identyfikacji satelitów [5].

I.3.2. Składowa naziemna

Naziemna składowa kontroli to 5 zlokalizowanych w pobliżu równika stacji kontrolnych: Głównej Stacji Nadzoru (MCS – Master Control Station) w Bazie Sił Powietrznych USA Falcon w Colorado Springs i stacji pomocniczych w Kwajalein, Diego Garcia, Ascension i na Hawajach.



Rys. 3. Lokalizacja stacji kontrolnych
(http://www.geoforum.pl/pictures/116_3.jpg)

Stacje kontroli gromadzą dane na temat współrzędnych satelitarnych i ich orbit. Wszystkie stacje monitorujące (pomocnicze) posiadają anteny do dwustronnej łączności z satelitami i biernie śledzą wszystkie widoczne satelity. Dane ze stacji monitorujących przesyłane są do Głównej Stacji Nadzoru, gdzie wyznaczane są efemerydy satelitów i parametry ich zegarów. MCS okresowo przesyła satelitom efemerydy i poprawki zegara, aby je retransmitować w depeszy nawigacyjnej [1,3,4].

Cała struktura składowej naziemnej (kontroli) tworzona jest przez:

- ▶ 5 bezzałogowych stacji śledzących, których zadaniem jest ciągły pomiar pseudoodległości (odległość pomiędzy satelitą a odbiornikiem w momentach transmisji i odbioru sygnału) i faz nośnych oraz gromadzenie depesz satelitów nawigacyjnych,
- ▶ stację główną, która analizuje stan techniczny satelitów i decyduje o koniecznych korektach,
- ▶ 3 stacje korygujące, które dokonują transmisji danych do satelitów (efemerydy pokładowe, współczynniki równania zegara itp.) [6].

1.3.3. Składowa użytkownika

Element użytkownika składa się z różnorodnych, wojskowych i cywilnych odbiorników GPS samodzielnie funkcjonujących lub wbudowanych w inne systemy. Ich zadaniem jest odbieranie, dekodowanie i przetwarzanie sygnałów GPS. Ze względu na wielorakie zastosowania: nawigację (powietrzną, morską, lądową), wyznaczanie pozycji, transfer czasu, pomiary geodezyjne i wiele innych, odbiorniki różnią się funkcjami i konstrukcją. Technika GPS rozwija się dzięki rozwojowi mikroelektroniki i elektronicznej techniki obliczeniowej. Na początku lat osiemdziesiątych urządzenia odbiorcze Globalnego Systemu Pozycjonowania zajmowały objętość rzędu kilkuset litrów i ważyły kilkanaście kilogramów. We współczesnych odbiornikach wykorzystuje się układy scalone i cyfrowe techniki przetwarzania sygnału, natomiast układy analogowe wykorzystywane są jedynie w celu wzmocnienia sygnału. Współczesne najmniejsze i najprostsze odbiorniki, przeznaczone dla potrzeb nawigacyjnych mają masę nie większą niż kilkaset gramów i mogą być trzymane w dłoni.

W GPS składową użytkownika tworzą odbiorniki, które przetwarzają sygnały z satelity na trójwymiarowe współrzędne położenia, prędkość, czas itp. Ilość, dokładność oraz postać prezentowanych danych zależą od przeznaczenia i rodzaju odbiornika. Istnieje wiele typów odbiorników GPS: odbiorniki ręczne wielkości telefonu komórkowego, profesjonalne zestawy do nawigacji i geodezji czy wysokiej klasy moduły GPS sprzężone z systemami nawigacyjnymi samolotów komunikacyjnych i wojskowych.

Odbiorniki GPS charakteryzują się między innymi:

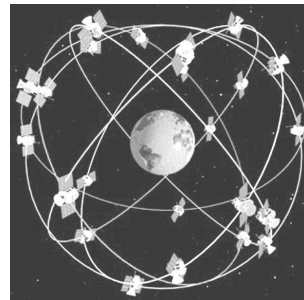
- ▶ dokładnością wyznaczania pozycji, prędkości i czasu,
- ▶ liczbą śledzonych satelitów (minimum to cztery, jednak wtedy utrata sygnału jednego z nich powoduje przerwanie ciągłości nawigacji trójwymiarowej, dlatego najlepsze jest śledzenie minimum 5 satelitów, a najbezpieczniejsze wszystkich widocznych),
- ▶ czasem akwizycji (czas od włączenia do pierwszego wyznaczenia pozycji),
- ▶ czasem reakwizycji potrzebnym do wznowienia pomiarów po chwilowym zaniku sygnału satelitarnego,
- ▶ czułością odbiornika – im niższa wartość minimalnego sygnału, tym lepszy odbiornik,
- ▶ stosunkiem sygnał/szum (minimalny stosunek sygnału

do szumu, przy którym odbiornik może jeszcze prawidłowo śledzić sygnał satelitarny),

- ▶ odpornością na sygnały zakłócające (konstrukcja anteny powinna zmniejszać wpływ sygnałów odbitych),
- ▶ odpornością na warunki środowiskowe [1].

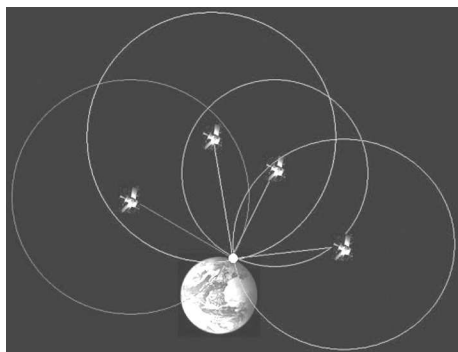
1.4. Zasada działania

GPS, czyli Globalny System Pozycjonowania (Global Positioning System) jest systemem satelitarnym zapewniającym precyzyjne wyznaczanie pozycji, prędkości i czasu. Satelity NAVSTAR, obiegające Ziemię, umożliwiają nieprzerwaną dostawę sygnału radiowego, który, odebrany przez specjalny odbiornik, pozwala na wyliczenie aktualnej pozycji. Sygnał ten jest dostępny na całym globie, a korzystanie z niego jest bezpłatne. Dokładność pomiaru waha się od centymetra (odbiorniki geodezyjne, pomiar różnicowy – Differential GPS) do stu metrów (proste odbiorniki nawigacyjne bez korekcji różnicowej). Satelity rozmieszczone są na sześciu orbitach na wysokości 20 162 km nad Ziemią i obiegają ją dwa razy dziennie (rys. 4).



Rys. 4. Rozmieszczenie satelitów GPS na orbitach (<http://www.kt.agh.edu.pl/~brus/satelite/navi.html>)

Zasada działania systemu opiera się na pomiarze odległości pomiędzy odbiornikiem a poruszającym się po ściśle wyznaczonej orbicie satelitą. Aby obliczyć odległość od satelity, odbiornik GPS mierzy czas, który upłynął pomiędzy wysłaniem a odbiorem sygnału. Różnicę między tymi dwiema wartościami mnoży się przez prędkość światła, czyli prędkość rozchodzenia się fal radiowych. Wyznaczenie odległości od pierwszego satelity umiejscawia odbiornik GPS na powierzchni sfery o środku w satelicie i promieniu równym odległości od niego. Znając odległość od drugiego satelity, można zawęzić ten obszar do okręgu, który powstaje z przecięcia obydwu sfer. Dystans, który dzieli trzeciego satelity od odbiornika, pozwala ograniczyć obszar poszukiwań do dwóch punktów. Jeden z tych punktów można wykluczyć jako znajdujący się zbyt wysoko lub poruszający się zbyt szybko i w ten sposób wyznaczyć swoją pozycję. Teoretycznie dane te wystarczałyby do dokładnego wyznaczenia odległości, ale odbiornik GPS wyposażony jest jedynie w zegar kwarcowy, który nie umożliwia wystarczająco dokładnego pomiaru czasu. Dlatego właśnie potrzebny jest czwarty satelita, dzięki któremu możliwa staje się synchronizacja zegara kwarcowego odbiornika z atomowym satelity (rys. 5) [1].

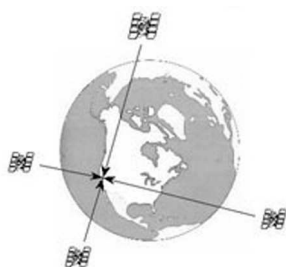


Rys. 5. Odbiór sygnałów od satelitów
(<http://www.tomtom.com/howdoesitwork/category.php?ID=1&Language=9>)

Każdy z satelitów posiada cztery zegary atomowe, którymi synchronizuje wysyłany sygnał. Zadaniem odbiornika jest zmierzenie opóźnienia sygnału odebranego z poszczególnych satelitów. Jednak odbiornik GPS nie posiada własnego zegara atomowego, a tylko dokładny zegar kwarcowy, więc ma na pozór trudne, nierozwiązywalne zadanie: stwierdzić, która jest godzina (z dokładnością do nanosekundy) dysponując tylko sygnałem otrzymanym z satelitów, z których każdy podaje inny czas. Dokonuje tego odbierając sygnał nie od trzech, lecz od czterech satelitów (rys. 6). Można wówczas wyliczyć zarówno rzeczywisty czas, jak i położenie (klasyczny układ czterech równań z czterema niewiadomymi). Odbiornik znajdując się w określonej pozycji r i czasie t otrzymuje sygnały od czterech zegarów atomowych zawierające współrzędne położenia r_j w czasie t_j , gdzie $j = 1, 2, 3, 4$. Wiedząc, że prędkość światła jest stała, związek między czasami i położeniami jest następujący [7]:

$$c^2(t - t_j)^2 = |r - r_j|^2,$$

gdzie $j = 1, 2, 3, 4$, a prędkość światła c jest równa: $c = 299\,792\,458$ m/s.



Rys. 6. Sygnał pochodzący od czterech satelitów
(http://www.wolinpn.pl/gora/sip/www_gps/gps/tresc.htm)

Odbiorniki GPS mierzą odległości, od co najmniej 4 satelitów, wykorzystując sygnały L1 i L2. Są one odbiornikami wielokanałowymi, więc możliwa jest jednoczesna rejestracja sygnałów pochodzących nawet od 12 satelitów. Każdy odbiornik ma antenę ustawioną nad ustalonym

punktem, którego współrzędne chcemy określić. Odbiornik GPS posiada antenę z opcjonalnym wzmacniaczem wstępnym, która odbiera sygnały wysłane od wszystkich dostępnych satelitów i wzmacnia je. Następnie sygnał jest przesyłany do sekcji częstotliwości radiowej i częstotliwości średniej (RF/IF), później sekcji śledzenia – korelacji sygnału. Na koniec trafia do mikroprocesora, który kontroluje wszystkie podzespoły odbiornika, a jednocześnie przetwarza sygnały. Poprzez dekodowanie informacji nałożonej na fale, identyfikuje on satelity, oblicza współrzędne obserwatora, jego prędkość i kurs. Zgromadzone informacje trafiają do komputera w odbiorniku GPS, który dokonuje obliczeń. Aby wyeliminować zakłócenia przy dokładnych pomiarach geodezyjnych, wysokość horyzontalna satelitów powinna wynosić: dla pomiarów kinematycznych (objaśnione niżej) ponad 15° , a dla pomiarów statycznych (objaśnione niżej) ponad 10° . Taka metoda pomiaru daje błąd poniżej 10 metrów.

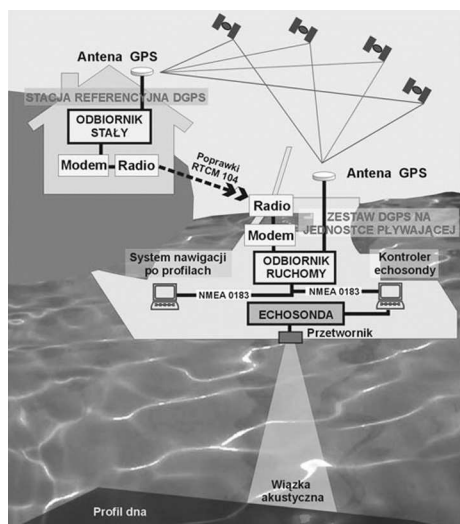
Technologia pomiarów statycznych GPS polega na tym, że uczestniczy w niej więcej niż jeden odbiornik GPS i pozostają one stałe względem siebie w ciągu całej sesji (kampanii) pomiarowej. Możliwe jest zbieranie obserwacji z wielu sesji pomiarowych (np. po kilka godzin dziennie), zaś zebrany materiał jest poddawany opracowaniu po zakończeniu całej kampanii pomiarowej (obserwacyjnej). Natomiast w przypadku technologii pomiarów kinematycznych, w pomiarze bierze udział jeden odbiornik stacjonarny, względem którego wyznaczana jest pozycja drugiego, ruchomego odbiornika umieszczonego na obiekcie poruszającym się.

Do niedawna dokładność poniżej 10 m mogły uzyskać tylko amerykańskie odbiorniki wojskowe. Odbiorniki cywilne musiały zadowolić się dokładnością do ok. 50–100 metrów. Sztucznie wprowadzone do systemu zakłócenia sprawiały, że każdy samodzielny odbiornik GPS, pozostawiony w bezruchu, stopniowo wykazywał zmiany pozycji. Dokładność taka nie była wystarczająca zarówno w nawigacji, jak i w pomiarach geodezyjnych. Niepewności określenia pozycji rzędu 50–100 metrów były niedopuszczalne, dlatego wymyślono metodę obejścia problemu zakłócenia sygnału [6].

Metodą tą jest pomiar względny (DGPS – Differential GPS). Polega on na tym, że jeżeli odbiornik GPS ustawi się w określonym punkcie, to na skutek zakłócenia sygnału pozycja, która jest wyznaczana, będzie się ciągle zmieniać. Jeżeli obliczymy różnicę zmierzoną przez odbiornik pozycją a pozycją rzeczywistą odbiornika, to otrzymamy tzw. wektor błędu (rys. 7).

Zastosowanie korekcji różnicowej (DGPS) pozwala wyeliminować także inne błędy systemu, takie jak: błędy zegarów i orbit satelitów, błędy spowodowane opóźnieniem jonosferycznym i troposferycznym, szumem odbiornika i odbiciem. Zatem metoda ta ulepsza dokładność pomiaru.

Zagłuszanie sygnału z satelitów GPS zwane ograniczonym dostępem (Selective Availability – SA) celowo zmniejszało dokładności systemu GPS, by nie był on wykorzystywany przez wroga armie. Wyłączenie SA przez



Rys. 7. Pomiar względny DGPS

(<http://www.batymetria.pl/img/pomiary-batymetryczne/zintegrowany-system.jpg>)

USA 1 maja 2000 roku okazało się bardzo korzystne, ponieważ spowodowało polepszenie dokładności wyznaczania pozycji ze 100 do 10–20 metrów, czyli prawie dziesięciokrotnie. Zauważalna była również poprawa dokładności określania prędkości [1].

Wyróżnia się dwie metody pomiaru odległości od satelitów:

1) Metoda kodowa wykorzystuje fakt, że satelita emituje i odbiornik wytwarza ten sam kod (C/A lub P) w tych samych określonych momentach czasu. Kod, który z sygnałem satelitarnym dociera do odbiornika, jest przesunięty w czasie względem kodu wytwarzanego w odbiorniku. Przesunięcie to jest miarą czasu przebiegu sygnału satelita–odbiornik (Δt) i jest proporcjonalne do odległości satelita–odbiornik (d). W odbiorniku następuje przesunięcie kodów do uzyskania korelacji i pomiaru czasu Δt . W ten sposób zmierzony czas Δt przebiegu sygnału z satelity do odbiornika, pomnożony przez prędkość rozchodzenia się fal elektromagnetycznych c jest równy mierzonej odległości Ziemia–satelita ($d = c\Delta t$) [8].

2) Metoda fazowa polega na pomiarze różnicowym faz na jednej lub dwóch częstotliwościach L1 i L2. Jest to pomiar fazy sygnału przychodzącego φ .

Pseudoodległość d jest określona następującym związkiem:

$$d = \lambda N + \lambda \varphi,$$

gdzie: N – całkowita liczba pełnych długości fal mieszczących się w odległości satelita–Ziemia, λ – długość fali nośnej, φ – mierzona faza sygnału przychodzącego [3].

II. Zastosowanie teorii względności w systemie nawigacji

II.1. Szczególna teoria względności

Szczególna teoria względności (STW) to teoria fizyczna stworzona w 1905 roku przez Alberta Einsteina.

Zmieniła ona podstawy postrzegania czasu i przestrzeni opisane wcześniej w mechanice klasycznej Newtona, w taki sposób, aby można było usunąć sprzeczności pomiędzy mechaniką klasyczną a teorią elektromagnetyzmu Maxwella.

Już starożytni greccy filozofowie zajmowali się zjawiskiem ruchu ciał. Arystoteles uznał, że wszystkie przedmioty dążą do osiągnięcia stanu spoczynku względem jednego absolutnego układu odniesienia, co było zgodne z codziennym doświadczeniem.

Do innych wniosków doszedł Galileusz, który badając ruch różnych przedmiotów stwierdził względność prędkości i pozycji ciała. Z każdym przedmiotem, który porusza się ruchem jednostajnym, można powiązać inercjalny układ odniesienia. Obserwator „siedzący” na takim obiekcie odnosi wrażenie, że on „stoi”, podczas kiedy całe otoczenie porusza się ruchem jednostajnym, a jednocześnie osoba stojąca twardo na Ziemi dojdzie do zupełnie przeciwnych wniosków. Matematycznym zapisem względności położenia i prędkości jest transformacja Galileusza, która stała się fundamentem fizyki Newtona.

Pod koniec XIX wieku okazało się, że transformacja Galileusza nie dotyczy wszystkich praw i zjawisk. Równania Maxwella, opisujące fale elektromagnetyczne, nie „poddawały się” transformacji Galileusza. Co więcej zgodnie z obliczeniami opartymi na mechanice Newtona, prędkość światła powinna zależeć od ruchu obserwatora względem hipotetycznego eteru, w którym miały rozchodzić się fale elektromagnetyczne. Lorentz zaproponował, że elementy przyrządów pomiarowych na skutek ruchu „kurczą się” w kierunku przemieszczania się Ziemi, co prowadzi do uzyskania zawsze tej samej wartości prędkości światła. Matematycznym tego opisem stała się transformacja Lorentza.

W 1905 roku Albert Einstein sformułował teorię na podstawie prostego założenia, że prędkość światła mierzona przez różnych obserwatorów jest zawsze taka sama, niezależnie od ich względnego ruchu [9,10].

II.1.1. Czasoprzestrzeń

Szczególna teoria względności zakłada, że nasz wszechświat jest czterowymiarową czasoprzestrzenią. Czterem wymiarom tej przestrzeni odpowiadają czas i miejsce (trzy współrzędne przestrzenne). Punktom w czasoprzestrzeni odpowiadają zdarzenia. Ruch każdej cząstki w tej przestrzeni reprezentuje pewna krzywa zwana linią świata. Poszczególne punkty tej krzywej opisują współrzędne cząstki w danej chwili czasu. Linia świata cząstki materialnej, poruszającej się ruchem jednostajnym i prostoliniowym, jest linią prostą [9–11].

II.1.2. Interwał czasoprzestrzenny

Interwał czasoprzestrzennym, inaczej odległością czasoprzestrzenną, nazywamy wielkość:

$$ds^2 = (dx^0)^2 - (dx^1)^2 - (dx^2)^2 - (dx^3)^2. \quad (\text{II.1.2.1})$$

Interwał ds^2 (odległość między dwoma punktami w czasoprzestrzeni) jest odpowiednikiem odległości między dwoma punktami w trójwymiarowej przestrzeni $d^2 =$

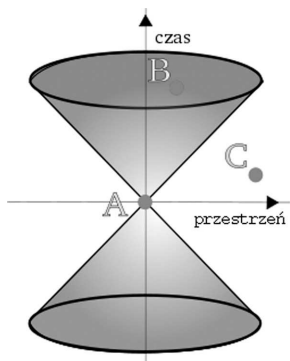
$(dx^1)^2+(dx^2)^2+(dx^3)^2$ uwzględniającym dodatkowo współrzędną czasową.

W czasoprzestrzeni interwał może być dowolną liczbą (ujemną, dodatnią lub zero).

Jeżeli interwał jest większy od zera, to mówi się, że punkty (zdarzenia) są położone czasowo. Każdy punkt w stożku świetlnym (pojęcie stożka świetlnego objaśnione poniżej) danego punktu jest położony względem niego czasowo. Na rysunku stożków świetlnych (rys. 8) punkt B jest położony czasowo względem punktu A. Przy czym obszar „górnego” stożka to absolutna przyszłość, a „dolnego” to absolutna przeszłość. Zdarzenia położone czasowo można osiągnąć przez wysłanie lub odebranie cząstki obdarzonej masą.

Jeżeli interwał jest mniejszy od zera, oznacza to, że zdarzenia są położone przestrzennie. Na rysunku (rys. 8) punkt C jest położony przestrzennie względem punktu A. Każdy punkt (zdarzenie) czasoprzestrzeni położony poza stożkami świetlnymi ma położenie przestrzenne. W dowolnym układzie odniesienia zdarzenia te zachodzą w różnych miejscach przestrzeni. Zdarzenia położone przestrzennie można nazwać „bezwzględnie odległymi” od zdarzenia A, a stwierdzenia: „wcześniej”, „później”, „jednocześnie” są w ich przypadku względne. Dla każdego punktu położonego przestrzennie można znaleźć takie układy współrzędnych, w których dane zdarzenie zachodzi przed lub po zdarzeniu A oraz układ, w którym oba zdarzenia występują jednocześnie. Zdarzenia położone przestrzennie nie mają na siebie wpływu.

Jeżeli interwał jest równy zero, wtedy zdarzenia są położone zerowo. Każdy punkt leżący na powierzchni stożka świetlnego ma położenie zerowe. Zdarzenia o interwale zerowym można osiągnąć wysyłając lub odbierając sygnał świetlny [9,10,12].



Rys. 8. Sygnał pochodzący od czterech satelitów

(http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/55/Szczegolna_teoria_wzglesdnosci_stozek_swiatla.svg/250px-Szczegolna_teoria_wzglesdnosci_stozek_swiatla.svg.png)

Stożkiem świetlnym nazywa się zbiór punktów czasoprzestrzeni, które można połączyć promieniem świetlnym, $x^0 = ct$, gdzie c jest prędkością światła w próżni.

Zdarzenia położone czasowo lub zerowo na „dolnym” stożku świetlnym mogą wpływać na rozpatrywane zdarze-

nie (być przyczyną), położone zaś na stożku „górnym” mogą wynikać z rozpatrywanego zdarzenia (być skutkiem), a położone przestrzennie nie mogą mieć związku.

Bardzo ważne jest, że żadne zjawisko swoimi skutkami nie może wybiegać poza stożek świetlny, bo złamałoby to zasadę przyczynowości i potrafilibyśmy przesłać sygnał do zdarzeń, które już były (w innym układzie odniesienia). Na przykład jeżeli w punkcie A wybuchnie supernowa, to obserwator w punkcie B ją dostrzeże, ale ten w punkcie C już nie będzie widział eksplozji [9,10].

II.1.3. Transformacje Lorentza

Transformacje Lorentza są liniowym przekształceniem przestrzeni Minkowskiego, które zachowuje interwał (odległość zdarzeń w czasoprzestrzeni). Opisują one zależności między współrzędnymi i czasem tego samego zdarzenia w dwóch układach odniesienia [13].

Własnością łączącą spostrzeżenia poszczególnych obserwatorów jest to, że interwał czasoprzestrzenny między dwoma zdarzeniami $A \rightarrow x_A^\mu = (x_A^0, x_A)$ oraz $B \rightarrow x_B^\mu = (x_B^0, x_B)$ jest zawsze, dla każdego obserwatora, taki sam. Interwał jest zdefiniowany jako:

$$ds_{BA}^2 := (x_B^0 - x_A^0)^2 - (x_B - x_A)^2 = \sum_{\mu\nu} \eta_{\mu\nu} (x_B - x_A)^\mu (x_B - x_A)^\nu, \quad (II.1.3.1)$$

gdzie

$$(\eta_{\mu\nu}) = (g_{\mu\nu}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (II.1.3.2)$$

Współczynniki $g_{\mu\nu}$ zwane tensorem metrycznym zawierają podstawową informację o własnościach geometrycznych czasoprzestrzeni, które na mocy zasady równoważności zależą od rozkładu masy (energii) [12–14].

Niech A będzie zdarzeniem mającym w obu układach współrzędnych (U i U') współrzędne $(0, \vec{0})$, natomiast zdarzenie B ma współrzędne x^μ w układzie U oraz x'^μ w układzie U'. Współrzędne x^μ oraz x'^μ są związane liniowymi transformacjami Λ :

$$x'^\mu = \Lambda^\mu_\nu x^\nu. \quad (II.1.3.3)$$

Ponieważ interwał czasoprzestrzenny w układach U i U' jest niezmienniczy:

$$ds'^2 = \eta_{\mu\nu} \Lambda^\mu_\rho \Lambda^\nu_\sigma dx^\rho dx^\sigma = ds^2, \quad (II.1.3.4)$$

więc otrzymuje się następujący związek:

$$\eta_{\mu\nu} \Lambda^\mu_\rho \Lambda^\nu_\sigma = \eta_{\rho\sigma}. \quad (II.1.3.5)$$

W zapisie macierzowym ostatnie równanie ma postać:

$$\eta = \Lambda^T \eta \Lambda. \quad (II.1.3.6)$$

Transformacje liniowe Λ , które spełniają równ. (II.1.3.6), nazywają się transformacjami Lorentza. Gdy układ U' porusza się z prędkością $v = (v^1, v^2, v^3)$ względem układu U, to macierz transformacji Lorentza wygląda w następujący sposób:

$$A_v^\mu = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta \frac{v^1}{c} & -\beta \frac{v^2}{c} & -\beta \frac{v^3}{c} \\ -\beta \frac{v^1}{c} & 1 + (\gamma - 1) \frac{(v^1)^2}{(v)^2} & (\gamma - 1) \frac{v^1 v^2}{(v)^2} & (\gamma - 1) \frac{v^1 v^3}{(v)^2} \\ -\beta \frac{v^2}{c} & (\gamma - 1) \frac{v^1 v^2}{(v)^2} & 1 + (\gamma - 1) \frac{(v^2)^2}{(v)^2} & (\gamma - 1) \frac{v^2 v^3}{(v)^2} \\ -\beta \frac{v^3}{c} & (\gamma - 1) \frac{v^1 v^3}{(v)^2} & (\gamma - 1) \frac{v^2 v^3}{(v)^2} & 1 + (\gamma - 1) \frac{(v^3)^2}{(v)^2} \end{pmatrix}. \quad (\text{II.1.3.7})$$

Transformację współrzędnych z układu nieruchomego U do poruszającego się względem niego układu U' przedstawia wyrażenie $x^\mu \rightarrow x'^\mu = \Lambda_v^\mu x^\nu$:

$$\begin{pmatrix} x'^0 \\ x'^1 \\ x'^2 \\ x'^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta \frac{v^1}{c} & -\beta \frac{v^2}{c} & -\beta \frac{v^3}{c} \\ -\beta \frac{v^1}{c} & 1 + (\gamma - 1) \frac{(v^1)^2}{(v)^2} & (\gamma - 1) \frac{v^1 v^2}{(v)^2} & (\gamma - 1) \frac{v^1 v^3}{(v)^2} \\ -\beta \frac{v^2}{c} & (\gamma - 1) \frac{v^1 v^2}{(v)^2} & 1 + (\gamma - 1) \frac{(v^2)^2}{(v)^2} & (\gamma - 1) \frac{v^2 v^3}{(v)^2} \\ -\beta \frac{v^3}{c} & (\gamma - 1) \frac{v^1 v^3}{(v)^2} & (\gamma - 1) \frac{v^2 v^3}{(v)^2} & 1 + (\gamma - 1) \frac{(v^3)^2}{(v)^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^0 \\ x^1 \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix}, \quad (\text{II.1.3.8})$$

gdzie $\gamma = 1/\sqrt{1 - v^2/c^2}$, $\beta = v/c$, czyli $\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}$.

Transformacje Lorentza mają najprostszą postać wówczas, gdy odpowiadające sobie osie współrzędnych kartezjańskich inercjalnych układów odniesienia, nieruchomego P i poruszającego się P', są do siebie wzajemnie równoległe, przy czym układ P' porusza się ze stałą prędkością v wzdłuż osi OX. Jeśli ponadto jako początek odliczania czasu w obu układach ($t = 0$) i ($t' = 0$) wybrany został moment, w którym początki osi współrzędnych O i O' w obu układach pokrywają się, to transformacje Lorentza są w postaci:

$$\begin{pmatrix} x'^0 \\ x'^1 \\ x'^2 \\ x'^3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\gamma\beta & 0 & 0 \\ -\gamma\beta & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^0 \\ x^1 \\ x^2 \\ x^3 \end{pmatrix}, \quad (\text{II.1.3.9})$$

$$\begin{cases} t' = \gamma(t - vx/c^2) \\ x' = \gamma(x - vt) \\ y' = y \\ z' = z \end{cases} \quad \text{lub} \quad \begin{cases} t = \gamma(t' + vx'/c^2) \\ x = \gamma(x' + vt') \\ y = y' \\ z = z' \end{cases}. \quad (\text{II.1.3.10})$$

Dla prędkości znacznie mniejszych od prędkości światła $\gamma \rightarrow 1$ i $v/c \rightarrow 0$, transformacja Lorentza staje się równoważna transformacji Galileusza. Oznacza to, że ta druga jest przybliżeniem transformacji Lorentza dla małych prędkości.

Przekształcenia wynikające z transformacji Lorentza, a więc i szczególnej teorii względności, prowadzą do różnych wniosków fizycznych (w porównaniu do mechaniki Newtona) przy względnych prędkościach porównywalnych do prędkości światła [13–16]. Niektóre wnioski szczególnej teorii względności:

- Dylatacja czasu – czas, jaki mija pomiędzy dwoma zdarzeniami, nie jest jednoznacznie określony, lecz zależy od obserwatora. Czas trwania zjawiska, zachodzącego w punkcie przestrzeni, obserwowany z punktów

poruszających się względem tego punktu, jest dłuższy niż czas trwania tego zjawiska w układzie odniesienia, w którym ten punkt spoczywa.

W układzie U' spoczywa zegar. W tym samym miejscu x' , y' , z' zachodzą dwa zdarzenia, między którymi w układzie U' upłynął czas $\Delta t' = t'_2 - t'_1$. Szukamy czasu $\Delta t = t_2 - t_1$, jaki upłynął między tymi zdarzeniami w układzie U. Znając wzory na przekształcenie Lorentza (II.1.3.10), mamy:

$$t_1 = \frac{t'_1 - vx'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{oraz} \quad t_2 = \frac{t'_2 - vx'/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (\text{II.1.3.11})$$

Odejmując t_1 od t_2 otrzymujemy:

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (\text{II.1.3.12})$$

Zwolnienie tempa upływu czasu, w układzie poruszającym się względem drugiego układu poruszającego się z mniejszą prędkością, opisuje zależność:

$$\Delta t' = \Delta t \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad (\text{II.1.3.13})$$

gdzie: t – czas w układzie U, t' – czas w układzie U', v – prędkość układu U' względem U [15,17,18].

- Masa jest równoważna energii, a związek między tymi wielkościami opisuje wzór $E = mc^2$. Zwiększenie energii układu zwiększa jego masę, zmniejszenie energii powoduje zmniejszenie masy. I odwrotnie, ubytek masy oznacza ubytek energii układu (tzw. deficyt masy).

Ruch dowolnego układu opisuje się za pomocą zasady najmniejszego działania, która mówi, że istnieje całka S zwana całką działania przyjmująca dla ruchów rzeczywistych najmniejszą wartość. Wyraża się to przez warunek, że jej wariacja jest równa zero: $\delta S = 0$. Całka ta

powinna być niezmiennicza względem transformacji Lorentza, zatem wyrażenie podcałkowe powinno być skalarem. W przypadku jednej swobodnej cząstki jedynym skalarzem, który ją charakteryzuje, jest jej interwał ds lub αds , gdzie α jest pewną stałą. Więc działanie jest dane wzorem:

$$S = -\alpha \int_a^b ds. \quad (\text{II.1.3.14})$$

Wprowadzając funkcję Lagrange'a L w następującej postaci:

$$L = -\alpha \sqrt{-\eta_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu} = -\alpha c \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad (\text{II.1.3.15})$$

całka działania (II.1.3.14) przyjmuje formę:

$$S = \int_{t_a}^{t_b} L dt. \quad (\text{II.1.3.16})$$

Rozwijając w szereg potęgowy względem v/c wyrażenie $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ i odrzucając wyrazy wyższych rzędów, otrzymamy równanie (II.1.3.15) w postaci:

$$L = -\alpha c \sqrt{1 - v^2/c^2} \approx -\alpha c + \frac{\alpha v^2}{2c}. \quad (\text{II.1.3.17})$$

Odrzucając stałą αc i porównując z wyrażeniem klasycznym otrzymamy, że $\alpha = mc$, zatem całka działania przyjmuje postać:

$$C = -mc \int_a^b ds, \quad (\text{II.1.3.18})$$

a funkcja Lagrange'a ma formę:

$$L = -mc^2 \sqrt{1 - v^2/c^2}. \quad (\text{II.1.3.19})$$

Wektor pędu $\mathbf{p} = (p_i)$ jest otrzymany z funkcji Lagrange'a: $p_i = -\partial L / \partial v^i$. Dla L danego wzorem (II.1.3.19) wektor pędu jest równy:

$$\mathbf{p} = \frac{mv}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (\text{II.1.3.20})$$

Wprowadzając pojęcie czteropędu p_μ , który składa się z energii układu E i wektora pędu \mathbf{p} , oraz przyjmując że składowe kowariantne są dane wyrażeniem: $p_\mu = (E/c, -\mathbf{p})$, można wyznaczyć energię układu E korzystając z zależności: $E = \mathbf{p} \cdot \mathbf{v} - L$. Zatem energia dla cząstki swobodnej wyraża się w następujący sposób:

$$E = \mathbf{p} \cdot \mathbf{v} - L = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (\text{II.1.3.21})$$

skąd wynika, że energia cząstki w swoim układzie spoczynkowym jest wielkością stałą [17,18]:

$$E = mc^2. \quad (\text{II.1.3.22})$$

- Względność jednoczesności – dwa zdarzenia określone jako jednoczesne przez jednego obserwatora, nie są jednoczesne dla innego obserwatora [15].
- Kontrakcja przestrzeni – odległości między punktami zależą od układu. Wszystkie poruszające się przedmioty obserwujemy jako krótsze w kierunku ruchu [15].

W nieruchomym układzie U znajduje się pręt, którego długość w tym układzie wynosi $\Delta x = x_2 - x_1$ (x_1 i x_2 są

współrzędnymi końców pręta w U). W układzie U' długość tego pręta wynosi $\Delta x' = x'_2 - x'_1$ (x'_1 i x'_2 są współrzędnymi końców pręta w U'). Znajdąc wzory na przekształcenie Lorentza (II.1.3.10), znajdujemy:

$$x_1 = \frac{x'_1 + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \quad \text{oraz} \quad x_2 = \frac{x'_2 + vt'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (\text{II.1.3.23})$$

Odejmując x_1 od x_2 , otrzymujemy:

$$\Delta x = \frac{\Delta x'}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}. \quad (\text{II.1.3.24})$$

Długość pręta w układzie, w którym on spoczywa (U) nazywa się długością własną oznaczaną przez $l_0 = \Delta x$, natomiast długość tego samego pręta w układzie poruszającym się U' jest oznaczona przez l . Wtedy:

$$l = l_0 \sqrt{1 - v^2/c^2}, \quad (\text{II.1.3.25})$$

gdzie: l_0 – długość w układzie U , l – długość w układzie U' , v – prędkość względna układów U i U' [15,17,18].

- Reguła dodawania prędkości

Definiując prędkość v_U w układzie U i prędkość $v_{U'}$ w układzie U' jako $v_U = dx^1/dt$ oraz $v_{U'} = dx'^1/dt'$, otrzymujemy względną prędkość $v_{UU'}$ pomiędzy dwoma układami U i U' [9,10,15,17,18]:

$$v_{UU'} = \frac{v_U + v_{U'}}{1 + v_U v_{U'} / c^2}. \quad (\text{II.1.3.26})$$

- Zwiększanie się masy przy zwiększaniu prędkości ciała – wartość masy ciała znajdującego się w poruszającym się układzie U' , mierzona przez obserwatora z układu U poruszającego się z mniejszą prędkością, jest większa niż, gdyby to ciało znajdowało się w układzie U zgodnie z równaniem:

$$m' = \frac{m}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}, \quad (\text{II.1.3.27})$$

gdzie: m – masa w układzie U , m' – masa w układzie U' , v – prędkość względna układów U i U' [15,17,18].

II.2. Ogólna teoria względności

Ogólna teoria względności (OTW) została opublikowana w 1916 roku i nazywana jest teorią grawitacji Alberta Einsteina. Według niej siła grawitacji wynika z lokalnej geometrii czasoprzestrzeni.

Nieeuklidesowa geometria czasoprzestrzeni została rozwinięta przez George'a Bernarda Riemanna, ale stała się szerzej znana dopiero wówczas, gdy do szczególnej teorii względności Einsteina Hermann Minkowski wprowadził pojęcie czasoprzestrzeni (tzw. czasoprzestrzeń Minkowskiego).

Teoria grawitacji Einsteina jest uogólnieniem szczególnej teorii względności, która obowiązuje dla inercjalnych układów odniesienia, rozszerzonym na dowolne układy odniesienia, wśród których występują także układy nieinercjalne.

W teorii względności nie możemy mówić o wielkościach fizycznych, takich jak prędkość czy przyspieszenie,

nie określając wcześniej układu odniesienia. Układ odniesienia definiuje się poprzez wybór pewnego punktu w czasoprzestrzeni, z którym jest on związany. Oznacza to, że każdy ruch określa się i mierzy względem pewnych określonych układów odniesienia.

OTW stwierdza, że z daną dokładnością można definiować jedynie lokalne układy odniesienia, dla skończonych okresów czasu i ograniczonych obszarów w przestrzeni. Częstki, na które nie działa żadna siła, poruszają się po liniach prostych w lokalnych inercjalnych układach odniesienia. Jednak, jeżeli przedłużymy te linie, to nie otrzymujemy linii prostych, lecz krzywe zwane geodezyjnymi. Inercjalne układy odniesienia charakteryzują się tym, że ciała fizyczne nie zmieniają swojego stanu ruchu, jeżeli nie oddziałują z żadnym innym ciałem fizycznym, natomiast w przypadku układów nieinercjalnych poruszające się ciała mają przyspieszenie pochodzące od układu odniesienia. Pojawia się tutaj pozorna siła wynikająca z przyspieszenia samego układu odniesienia, a nie z oddziaływania z innym ciałem fizycznym.

Matematycznie biorąc, Einstein przedstawia czasoprzestrzeń za pomocą czterowymiarowej pseudo-riemannowskiej rozmaitości¹, a jego równania pola mówią, że krzywizna rozmaitości w punkcie jest bezpośrednio związana z tensorem energii–pędu w tym punkcie (tensor ten jest miarą gęstości materii i energii). Krzywizna określa sposób, w jaki materia się porusza, a materia określa sposób, w jaki przestrzeń się zakrzywia [19,20].

W 1916 roku astronomowie cały Wszechświat utożsamiali z Drogą Mleczną – ogromnym dyskopodobnym skupiskiem gwiazd, które powoli krążą wokół jej centrum. Nie byli pewni, czy gwiazdy wypełniają całą przestrzeń, czy też są skupione w obszarze Drogi Mlecznej, a poza nią istnieje tylko pusta przestrzeń. Uważano, że rozkład gwiazd jest stacjonarny, a przestrzeń jest statyczna. Einstein przekonał się, że równania ogólnej teorii względności nie mogą opisać takiego statycznego Wszechświata. Zatem zmodyfikował swoje równania dodając do nich dodatkowy parametr zwany stałą kosmologiczną Λ . Opisywała ona stałą siłę równoważącą siłę przyciągania grawitacyjnego między gwiazdami i została wprowadzona, aby Wszechświat pozostał statyczny (tzn. nierozszerzający i niezapadający się). Zakładając, że Wszechświat jest statyczny i ma stałą dodatnią krzywiznę, a więc ma skończoną objętość, Einstein wyprowadził zależność między promieniem krzywizny a średnią gęstością materii we Wszechświecie. W 1923 roku Edwin Hubble odkrył, że tak zwane mgławice spiralne są ogromnymi skupiskami gwiazd (galaktykami) położonymi daleko poza granicami Drogi Mlecznej. Sześć lat

później wykazał, że galaktyki oddalają się od nas z prędkością proporcjonalną do ich odległości. Statyczny model Wszechświata upadł, a wraz z nim koncepcja stałej kosmologicznej. Wiele lat później Einstein przyznał, że wprowadzenie stałej kosmologicznej było największą pomyłką w jego życiu. Choć statyczny model Wszechświata odszedł w zapomnienie, nie zapomniano o stałej kosmologicznej. Zaczęto ją ponownie wprowadzać podczas prób kwantowania pola grawitacyjnego. W ogólnej teorii względności każda postać energii zakrzywia przestrzeń. Energia próżni, zakrzywiająca przestrzeń, zachowuje się analogicznie do stałej kosmologicznej, choć przekracza o ponad sto rzędów wielkości jej akceptowalną wartość [21,22]. Różnicę taką powodują rozbieżności pomiędzy wartościami energii próżni (stałej kosmologicznej) wynikającymi z obserwacji opartych na ogólnej teorii względności a wartościami obliczonymi w modelach kwantowej teorii pola.

Z obserwacji dalekich supernowych wynika, że obecnie Wszechświat rozszerza się coraz szybciej zamiast coraz wolniej, tak jak powinien gdyby zawierał jedynie zwykłą materię. Ten wynik obserwacyjny można wyjaśnić zakładając, że obecnie gęstość energii–materii we Wszechświecie jest zdominowana przez „ciemną energię”² lub stałą kosmologiczną. Zostało to potwierdzone przez satelitę WMAP, który mierzy anizotropię rozkładu temperatury promieniowania relikowego³. Okazało się, że obecnie Wszechświat składa się w 73% z ciemnej energii, w 23% z ciemnej egzotycznej materii, natomiast zwykła materia stanowi zaledwie 4% średniej gęstości materii (energii) [21,22].

II.2.1. Geometria czasoprzestrzeni a rozkład mas

Ogólna teoria względności wiąże geometrię czasoprzestrzeni z rozkładem materii. Czasoprzestrzeń jest rozmaitością różniczkową, której punktom przyporządkowuje się cztery współrzędne:

$$x^\mu = (x^0 = ct, x^1, x^2, x^3). \quad (\text{II.2.1.1})$$

Odległość między dwoma punktami o współrzędnych x^μ i $x^\mu + dx^\mu$ opisana jest wzorem:

$$ds^2 = g(x)_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu. \quad (\text{II.2.1.2})$$

Lokalna płaskość zakrzywionej czasoprzestrzeni oznacza możliwość przejścia do takiego układu współrzędnych, aby $g_{\mu\nu} = e_\mu^a e_\nu^b \eta_{ab}$. Pola $e_\mu^a(x)$ nazywamy polami reperów. Zawierają one całą informację o zakrzywieniu czasoprzestrzeni. Z matematycznego punktu widzenia pola reperów są formami różniczkowymi $e^a = e_\mu^a dx^\mu$ [19,23,24].

¹Rozmaitość pseudo-riemannowska – uogólnienie rozmaitości riemannowskiej (rozmaitość różniczkowa (M, g) , dla której zdefiniowany jest tensor metryczny g oraz istnieje funkcja $d(x, y)$ określająca najkrótszą możliwą krzywą łączącą punkty x i y jako rzeczywistą nieujemną wartość); tutaj tensor metryczny nie musi być dodatnio określony, lecz tylko niezdegenerowany.

²Ciemna energia – w kosmologii hipotetyczna forma energii wypełniająca całą przestrzeń i wywierająca na nią ujemne ciśnienie, powodując tym samym rozszerzanie się Wszechświata.

³Promieniowanie relikowe (mikrofalowe promieniowanie tła) to rodzaj promieniowania o rozkładzie termicznym energii, czyli widmie ciała doskonale czarnego o temperaturze 2,7 K. Maksimum gęstości energii przypada na długość fali 1,1 mm. Promieniowanie to jest pozostałością po wczesnych etapach ewolucji Wszechświata, wypełnia Wszechświat i niemal nie oddziałuje z cząstkami materii.

II.2.2. Równania Einsteina

Równania Einsteina opisują związek między zakrzywieniem czasoprzestrzeni (tensorem metrycznym $g_{\mu\nu}$) a rozkładem materii opisanej tensorem energii–pędu $T_{\mu\nu}$. Są równaniami ruchu dla pola grawitacyjnego i dla pól materii i mają następującą postać:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = \frac{8\pi k}{c^4}T_{\mu\nu}. \quad (\text{II.2.2.1})$$

Ogólniejsza postać tych równań została zaproponowana przez Einsteina poprzez dodanie stałej kosmologicznej Λ :

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = -\frac{8\pi}{c^4}GT_{\mu\nu}, \quad (\text{II.2.2.2})$$

gdzie: $R_{\mu\nu}$ jest tensorem krzywizny Ricciego, R jest skalarem krzywizny Ricciego, $g_{\mu\nu}$ to tensor metryczny, Λ to stała kosmologiczna, $T_{\mu\nu}$ jest tensorem energii–pędu, c prędkością światła w próżni, a G to stała grawitacji [18,19,23,24].

Równania Einsteina (II.2.2.2) opisują tensor metryczny $g_{\mu\nu}$, który jest określony poprzez rozkład materii i energii zawarty w tensorze energii–pędu pól materii. Równania te są bardzo skomplikowane ze względu na złożoną i nieliniową zależnością tensora i skalarą krzywizny Ricciego od tensora metrycznego. W konsekwencji równania Einsteina zostały rozwiązane jedynie w nielicznych przypadkach – np. dla układów o sferycznie symetrycznym rozkładzie masy (metryka Schwarzschilda).

II.3. Rozwiązania równań Einsteina

II.3.1. Metryka Schwarzschilda

Jedno z rozwiązań równań Einsteina zostało odkryte przez K. Schwarzschilda w 1916 roku. Rozwiązanie to całkowicie określa pole grawitacyjne w próżni wytworzone przez dowolny nieobrcający się układ o centralnie symetrycznym rozkładzie materii pozostającym w spoczynku. Symetria centralna oznacza, że metryka czasoprzestrzeni (interwał ds) powinna być niezmiennicza względem trójwymiarowej grupy obrotów. Metryka ta wyrażona jest wzorem:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{r_g}{r}\right)c^2 dt^2 - r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\varphi^2) - \frac{dr^2}{1 - r_g/r}. \quad (\text{II.3.1.1})$$

Metryka ta posiada pozorną osobliwość na tzw. horyzoncie zdarzeń, który jest zadany powierzchnią sfery o promieniu r_g ($r_g = 2km/c^2$ – promień grawitacyjny ciała). Cząstki i promienie świetlne mogą przechodzić przez tę powierzchnię tylko w jednym kierunku – do jej wnętrza [18,23].

III. Zjawiska relatywistyczne w GPS

III.1. Zjawiska relatywistyczne

GPS wykorzystuje dokładne, stabilne zegary atomowe na satelitach i na Ziemi, aby dostarczać określonych współrzędnych położenia i czasu. W konstelacji GPS zegary na satelitach utrzymują czas z dokładnością ok. 4 ns na dzień. Zegary te mają grawitacyjne i kinematyczne przesunięcia częstotliwości, identyfikowane jako

zjawiska relatywistyczne. Mimo że prędkości zegarów są małe i pola grawitacyjne są słabe, to jak się okazuje należy uwzględnić między innymi następujące zjawiska relatywistyczne:

1) Pole grawitacyjne wpływa na tempo upływu czasu (przesunięcie częstotliwości) – zegary spóźniają lub spieszają się, w zależności od ich ruchu względnego oraz od ich odległości od źródła pola grawitacyjnego, którym jest Ziemia.

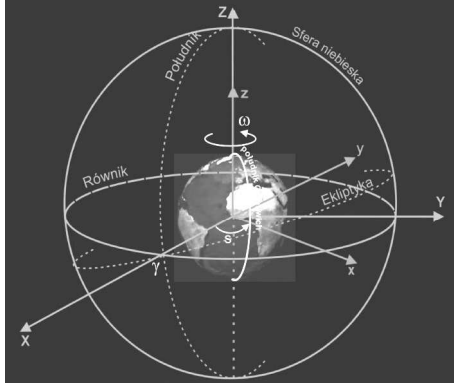
2) Zjawisko Sagnaca jest związane z dobowym ruchem obrotowym Ziemi oraz ruchem orbitalnym satelitów wokół Ziemi (wnosi błędy pomiaru czasu rzędu 200 nanosekund na dobę).

3) Zjawisko grawitomagnetyczne – dobowy obrót pola magnetycznego Ziemi wpływa na tempo upływu czasu; poprawki są rzędu pikosekund na dobę, są do zaniechania [25].

Aby móc opisać te zjawiska, należy wprowadzić kilka układów odniesienia, które są przydatne do sformułowania odpowiednich równań ruchu, dotyczących satelitów i odbiorników sygnałów na powierzchni Ziemi. W celu zdefiniowania układu odniesienia (reference frame) mówi się o systemie odniesienia (reference system), który jest zbiorem układów odniesienia. Stanowi on zbiór ustaleń i zaleceń, koniecznych do wyznaczenia parametrów, potrzebnych do określenia w sposób jednoznaczny układu. Parametry te to: początek układu, jednostki skali na odpowiednich osiach i orientacja osi. Następnie należy znaleźć zależności tych parametrów od czasu. Układ odniesienia stanowi praktyczną realizację systemu odniesienia. Na układ odniesienia składają się wyznaczone z obserwacji wartości powyższych parametrów [26]. Wyróżnia się kilka układów odniesienia:

ECI (Earth-Centered Inertial) jest inercyjnym, geocentrycznym układem odniesienia. Środek układu odniesienia jest w środku masy Ziemi. W tym układzie płaszczyzna równikowa Ziemi jest nachylona pod kątem $23,5^\circ$ do płaszczyzny ekliptyki. To wyznacza orientację układu ECI. Ziemia obraca się względem ustalonych osi ze zdefiniowaną prędkością $\omega_E = 7,292\,115\,1467 \cdot 10^{-5}$ rad/s. Rysunek 9 przedstawia lokalizację Ziemi w tym układzie. Układ x, y, z jest układem współrzędnych związanych na stałe z Ziemią, natomiast osie X, Y, Z wyznaczają układ ECI, w którym określona jest pozycja satelity [27].

ECEF (Earth-Centered, Earth-Fixed) jest kartezjańskim układem współrzędnych na stałe związanym z Ziemią i wykorzystywanym w systemie GPS. Początek układu odniesienia $(0, 0, 0)$ jest w środku masy Ziemi. Oś z pokrywa się z osią obrotu Ziemi, oś x przecina powierzchnię Ziemi w punkcie o współrzędnych geograficznych: 0° szerokości geograficznej i 0° długości geograficznej. Natomiast oś y jest prostopadła do płaszczyzny wyznaczonej przez osie x i z i przecina równik w punkcie o długości geograficznej 90° E. Oznacza to, że układ ECEF obraca się razem z Ziemią wokół osi z , zatem współrzędne nieporuszającego się po powierzchni Ziemi punktu są stałe. Układ ten opisany jest symbolem WGS-84(G873). Na rysunku 9 jest on reprezentowany przez osie x, y, z [28].



Rys. 9. Położenie Ziemi w układach ECI i ECEF (<http://uczelnia.warszawska.pl/upl/1233741384.pdf>)

ICRF (International Celestial Reference Frame) – Międzynarodowy Niebieski (Niebiański) Układ Odniesienia jest quasi-inercjalnym układem odniesienia, według którego geometryczny środek znajduje się w środku masy Układu Słonecznego. ICRF jest obecnie standardowym układem odniesienia używanym do określenia pozycji planet (w tym Ziemi) i innych obiektów astronomicznych z dokładnością do około 30 μ s (as – sekunda łuku) poprzez podanie 212 pozycji radioźródeł [29].

W następnych podrozdziałach przedstawiono opis zjawisk relatywistycznych, które mają zasadniczy wpływ na wyznaczanie poprawek czasowych. Zjawisko grawitomagnetyczne daje zaburzenie o wiele mniejsze niż pozostałe wyżej wymienione.

III.2. Przesunięcia częstotliwości

Aby wyznaczyć przesunięcie częstotliwości sygnałów radiowych (fal elektromagnetycznych) w polu grawitacyjnym Ziemi będziemy korzystać z metryki Schwarzschilda:

$$ds^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} dr^2 - r^2 d\Omega^2, \quad (III.2.1)$$

gdzie $d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2$.

Równanie (III.2.1) dzielimy obustronnie przez $c^2 dt^2$ i równocześnie przyjmujemy, że $\theta = 0$ (tzn. że wybieramy płaszczyznę równikową obiektu sferycznie symetrycznego o masie M). W wyniku tej operacji otrzymamy zależność:

$$\left(\frac{ds}{cdt}\right)^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) - \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1} \left(\frac{dr}{cdt}\right)^2. \quad (III.2.2)$$

Rozwijając w szereg wyrażenie $\left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right)^{-1}$ zgodnie ze wzorem $(1 - x)^{-1} \approx 1 + x$, otrzymujemy:

$$\left(\frac{ds}{cdt}\right)^2 = \left(1 - \frac{2GM}{rc^2}\right) - \left(1 + \frac{2GM}{rc^2}\right) \left(\frac{dr}{cdt}\right)^2. \quad (III.2.3)$$

Wprowadzając prędkość dr/dt i potencjał Newtona $V = -GM/r$ oraz zaniedbując pierwszy człon w równaniu (III.2.3), dostaniemy:

$$\left(\frac{ds}{cdt}\right)^2 = \left(1 + \frac{2V}{c^2}\right) - \frac{v^2}{c^2}, \quad (III.2.4)$$

gdzie t jest czasem mierzonym w inercjalnym układzie odniesienia umieszczonym w nieskończoności, a v prędkością liniową obiektu na równikowej orbicie kołowej o promieniu r . Interwał czasoprzestrzenny ds ma interpretację czasu własnego $d\tau$ obiektu znajdującego się w położeniu r oraz poruszającego się z prędkością v .

Związek (III.2.4) jest kluczowym równaniem w procedurze wyznaczania przesunięcia częstotliwości sygnałów. Zastosujemy go do wyznaczenia ilorazów czasów własnych dwóch różnych obiektów (zegarów), tj. do zegara na powierzchni Ziemi i zegara na orbicie. Czas t jest w obu przypadkach ten sam, więc iloraz czasów własnych ma postać:

$$\left(\frac{d\tau_Z}{d\tau_s}\right)^2 = \frac{1 - 2GM_Z/R_Z c^2 - v_Z^2/c^2}{1 - 2GM_Z/R_s c^2 - v_s^2/c^2}, \quad (III.2.5)$$

gdzie $d\tau_Z$ ($d\tau_s$) to czas własny zegara na Ziemi (na satelicie), M_Z to masa Ziemi, R_Z – promień Ziemi na równiku, R_s – promień orbity satelity, v_Z – prędkość liniowa zegara na równiku Ziemi, v_s – prędkość liniowa zegara na satelicie. Równanie (III.2.5) będzie stosowane w dwóch przypadkach: gdy prędkości zegarów są do pominięcia w porównaniu z potencjałem V oraz gdy potencjał V jest do pominięcia w porównaniu z prędkościami [7].

1. Przesunięcie grawitacyjne częstości w stronę fioletu

Gdy zaniedbujemy ruch zegarów ziemskich i satelitarnych tzn. $v_Z = v_s = 0$, wówczas równanie (III.2.5) ma formę:

$$\frac{d\tau_Z}{d\tau_s} = \sqrt{\frac{1 - 2GM_Z/R_Z c^2}{1 - 2GM_Z/R_s c^2}}. \quad (III.2.6)$$

Biorąc pod uwagę rozwinięcie pierwiastka $(1 - x)^{1/2} \approx 1 - x/2$, równanie (III.2.6) można zapisać:

$$\frac{d\tau_Z}{d\tau_s} = \frac{GM_Z}{R_Z c^2} + \frac{GM_Z}{R_s c^2} = 1 - (d_Z - d_s) = 1 - D, \quad (III.2.7)$$

gdzie $D = d_Z - d_s > 0$. Wartości d_Z oraz d_s są następujące:

$$d_Z = \frac{GM_Z}{R_Z c^2} = 6,95 \cdot 10^{-10}, \quad d_s = \frac{GM_Z}{R_s c^2} = 1,67 \cdot 10^{-10}.$$

Ponieważ $f = 1/\tau$, to stosunek częstości zegara na orbicie i na Ziemi wynosi $f_s/f_Z = 1 - D < 1$. Oznacza to, że wysłany z satelity sygnał o częstości f_s odbierany na powierzchni Ziemi na częstości $f_Z = f_s/(1 - D) > f_s$. Częstość sygnału rośnie i mamy przesunięcie ku fioletowi.

Przesunięcie ku fioletowi oznacza, że zegar na orbicie spieszy się względem ziemskiego, gdyż $f_s/f_Z = 1 - D < 1$.

W ciągu doby różnica we wskazaniach zegarów osiąga wartość: $\Delta t = 45\,700 \text{ ns} = 45,7 \mu\text{s}$. W tym czasie światło przebywa odległość: $\Delta l = 13\,710 \text{ m} \approx 14 \text{ km}$ [7,26].

2. Przesunięcie kinematyczne częstości w stronę czerwieni

Zakładamy, że pole grawitacyjne na powierzchni Ziemi oraz pole w punkcie, gdzie jest satelita, spełniają następujące warunki:

$$2GM_Z/R_Z c^2 \ll v_Z^2/c^2, \quad 2GM_Z/R_s c^2 \ll v_s^2/c^2.$$

Wówczas równanie (III.2.5) ma formę:

$$\frac{d\tau_Z}{d\tau_s} = \sqrt{\frac{1 - v_Z^2/c^2}{1 - v_s^2/c^2}}. \quad (\text{III.2.8})$$

Wiedząc, że prędkość satelity na orbicie kołowej wynosi $v_s = 3874$ m/s, prędkość zaś odbiornika na równiku ziemskim wynosi $v_Z = 465$ m/s, rozwijamy w szereg wyrażenia podpierwiastkowe zgodnie ze wzorem $(1-x)^{1/2} \approx 1-x/2$. Wówczas otrzymujemy:

$$\frac{d\tau_Z}{d\tau_s} = 1 - \frac{v_Z^2}{2c^2} + \frac{v_s^2}{2c^2} = 1 + \frac{1}{2c^2}(v_s^2 - v_Z^2) = 1 + B, \quad (\text{III.2.9})$$

gdzie $B = (v_s^2 - v_Z^2)/2c^2 > 0$.

Oznacza to, że stosunek częstości zegara na orbicie i na Ziemi wynosi: $f_s/f_Z = 1 + B > 1$. Ponieważ częstotliwość sygnału maleje ($f_Z = f_s/(1+B) < f_s$), więc mamy przesunięcie ku czerwieni. Przesunięcie ku czerwieni powoduje, że zegar na orbicie spóźnia się względem ziemskiego, ponieważ $f_s/f_Z = 1 + B > 1$. W ciągu doby różnica we wskazaniach zegarów osiąga wartość: $\Delta t = 7100$ ns = 7,1 μ s. W tym czasie światło przebywa odległość: $\Delta l = 2130$ m \approx 2 km [7,26].

Kiedy uwzględnimy efekty związane z polem grawitacyjnym oraz z względnym ruchem zegarów, to wyrażenie (III.2.5) będzie miało postać:

$$\frac{d\tau_Z}{d\tau_s} = 1 - \frac{2GM_Z}{R_Z c^2} - \frac{v_Z^2}{2c^2} + \frac{2GM_Z}{R_s c^2} + \frac{v_s^2}{2c^2} = 1 - D + B > 1. \quad (\text{III.2.10})$$

Wypadkowa różnica czasu na zegarze ziemskim i satelitarnym (przesunięcie częstości ku fioletowi i czerwieni) jest rzędu $\Delta t = 39\,000$ ns = 39 μ s. W rezultacie zegar atomowy na orbicie spieszy się względem ziemskiego (idzie szybciej) o 39 mikrosekund na dobę. W tym czasie światło przebywa odległość: $\Delta l = 11\,700$ m \approx 12 km [7,26].

III.3. Zjawisko Sagnaca

Metryka płaskiej czasoprzestrzeni Minkowskiego we współrzędnych cylindrycznych dana jest wzorem:

$$-ds^2 = -(cdt)^2 + dr^2 + r^2 d\phi^2 + dz^2. \quad (\text{III.3.1})$$

Dokonajmy transformacji tego inercjalnego układu do układu obracającego się. Wówczas współrzędne $\{t', r', \phi', z'\}$ układu, który obraca się z prędkością ω_E są związane ze współrzędnymi układu $\{t, r, \phi, z\}$ w następujący sposób :

$$t = t', \quad r = r', \quad \phi = \phi' + \omega_E t', \quad z = z'. \quad (\text{III.3.2})$$

Metryka (III.3.1) we współrzędnych (III.3.2) ma postać:

$$-ds^2 = -(1 - \omega_E^2 r'^2/c^2)(cdt')^2 + 2\omega_E r'^2 d\phi' dt' + (d\sigma')^2, \quad (\text{III.3.3})$$

gdzie $(d\sigma')^2 = (dr')^2 + (r'd\phi')^2 + (dz')^2$.

Każdy punkt w czasoprzestrzeni jest teoretycznie wyposażony w wirtualny zegar. Aby dokonać synchronizacji zegarów, znajdujących się w dwóch punktach czasoprzestrzeni, wysyłamy sygnał świetlny do punktu zaopatrzonego w zegar. W momencie powrotu sygnału (również w postaci impulsu świetlnego) znamy opóźnienie zegara,

który synchronizowaliśmy. Należy podkreślić, że synchronizujemy zegary tylko w obrębie tego samego układu inercjalnego, uwzględniając zasadę stałości prędkości światła. Wtedy światło porusza się po zerowej linii świata, więc $ds^2 = 0$. Przyjmując parametr $\omega_E r'/c$ w równaniu (III.3.2) za bardzo mały, otrzymamy:

$$(cdt')^2 - \frac{2\omega_E r'^2 d\phi' (cdt')}{c} - (d\sigma')^2 = 0, \quad (\text{III.3.4})$$

a zatem:

$$cdt' = d\sigma' + \frac{\omega_E r'^2 d\phi'}{c}. \quad (\text{III.3.5})$$

Człon $r'^2 d\phi'/2$ jest infinitezymalnym polem powierzchni dA'_Z zakreślonym przez promień r' , wychodzący od osi obrotu do miejsca rozchodzenia się światła w obracającym się układzie współrzędnych. Czas, w którym światło pokonuje drogę γ we współrzędnych biegunowych jest otrzymany przez scałkowanie równania (III.3.5):

$$\int_\gamma dt' = \int_\gamma \frac{d\sigma'}{c} + \frac{2\omega_E}{c^2} \int_\gamma dA'_Z. \quad (\text{III.3.6})$$

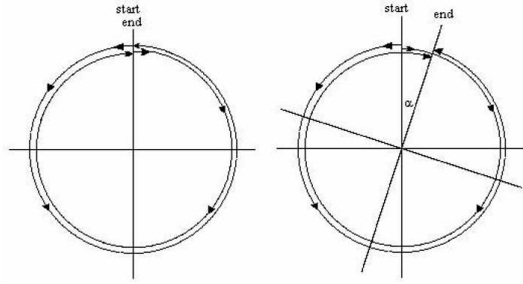
Naiwne użycie Einsteinowskiej procedury synchronizacji zegarów w obracającym się układzie odniesienia daje tylko pierwszy wyraz po prawej stronie równania (III.3.6), co prowadzi do poważnego błędu.

Dla procesu synchronizacji, przeprowadzanego na ziemskim równiku w kierunku wschodnim, wyrażenie $2\omega_E/c^2$ ma wartość $2\omega_E/c^2 = 1,6227 \cdot 10^{-21}$ s/m², natomiast promień równika $r_E = 6\,378\,137$ m, więc pole powierzchni wielkiego koła równikowego jest równe: $\pi r_E^2 = 1,278\,02 \cdot 10^{14}$ m². Zgodnie z tym ostatni człon w równaniu (III.3.6) jest:

$$\frac{2\omega_E}{c^2} \int_{\text{droga}} dA'_Z = 207,4 \text{ ns}. \quad (\text{III.3.7})$$

W inercjalnym układzie odniesienia czas otrzymany z równania (III.3.7) jest interpretowany jako dodatkowy czas potrzebny, aby światło dotarło do poruszającego się punktu. Poruszając się wzdłuż równika na wschód w procesie synchronizacji, ostatni zegar w sieci zegarów będzie się opóźniał o 207,4 ns względem pierwszego. Wybierając kierunek poruszania się na zachód otrzymuje się, że ostatni zegar będzie się spieszył o 207,4 ns względem pierwszego [30].

Jeśli dwa impulsy światła są wysłane w przeciwnych kierunkach wokół utworzonej ze światłowodu nieruchomej kołowej pętli o promieniu R , to będą one poruszały się po tej samej drodze, którą przebędą w tym samym czasie (patrz rys. 10 po lewej stronie). Prawa strona rys. 10 ilustruje sytuację, gdy pętla wiruje; symbol α oznacza drogę kątową pętli w czasie ruchu impulsów światła. Dla dodatnich wartości α impuls biegnący zgodnie z kierunkiem obrotu przebywa nieco dłuższą drogę, w wyniku czego osiąga koniec pętli nieco później.



Rys. 10. Droga przebyta przez impulsy światła
(http://www.if.pwr.wroc.pl/~wsalejda/pop/gps_final.pdf)

Jeśli przez ω oznaczymy prędkość kątową, wówczas prędkość styczna końców pętli jest równa $v = \omega R$, a wypadkowe prędkości impulsów są $c - v$ i $c + v$. Oba impulsy rozpoczynają bieg po drodze $2\pi R$ (w układzie związanym z osią obrotu). Tak więc różnica czasów przebiegu obu impulsów wynosi:

$$\Delta t = 2\pi R \left(\frac{1}{c - v} - \frac{1}{c + v} \right) = \frac{4\pi R v}{c^2 - v^2} = \frac{4A\omega}{c^2 - v^2}, \quad (\text{III.3.8})$$

gdzie $A = \pi R^2$ jest powierzchnią pętli [25].

III.4. Współrzędna czasowa w systemie GPS

Metrykę Schwarzschilda opisana wzorem (II.2.1) można zapisać w postaci:

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2V}{c^2} \right) c^2 dt^2 - \left(1 - \frac{2V}{c^2} \right) dr^2 - r^2 d\Omega^2, \quad (\text{III.4.1})$$

gdzie V jest newtonowskim potencjałem oraz metryka na sferze jednostkowej ma postać: $d\Omega^2 = d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2$.

Transformacja z układu ECI do układu ECEF (zdefiniowanych w podrozdziale III.1) polega na następującej zamianie współrzędnych:

$$t = t', \quad r = r', \quad \theta = \theta', \quad \varphi = \varphi' + \omega_E t,$$

więc równanie (III.4.1) przyjmie postać:

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2\phi_{\text{ef}}}{c^2} \right) c^2 dt^2 - 2\omega_E r^2 \sin^2 \theta d\varphi' dt - \left(1 - \frac{2V}{c^2} \right) dr^2 - r^2 d\Omega^2, \quad (\text{III.4.2})$$

gdzie ϕ_{ef} jest efektywnym potencjałem, w obracającym się układzie ECEF, zdefiniowanym w następujący sposób:

$$\phi_{\text{ef}} = V - \frac{\omega_E^2 r^2 \sin^2 \theta}{2}. \quad (\text{III.4.3})$$

Na równiku ($r = r_E$, $\theta = \pi/2$) wartość potencjału efektywnego $\phi_{\text{ef}} = \phi_0$ podzielonego przez kwadrat prędkości światła jest równa:

$$\frac{\phi_0}{c^2} = -\frac{GM}{r_E c^2} - \frac{J_2 GM}{2r_E^3 c^2} - \frac{\omega_E^2 r_E^2}{2c^2} = -6,9693 \cdot 10^{-10}. \quad (\text{III.4.4})$$

Pierwszy wyraz po prawej stronie równania (III.4.4) związany jest z polem grawitacyjnym, drugi wyraz dotyczy kwadrupolowego potencjału ziemskiego. J_2 jest ziemskim momentem kwadrupolowym i ma wartość $J_2 = 1,08 \cdot 10^{-3}$,

natomiast trzeci człon jest potencjałem związanym z obrotem Ziemi. Zatem metryka w układzie ECEF przyjmuje postać:

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2\phi_0}{c^2} \right) c^2 dt^2 - 2\omega_E r^2 \sin^2 \theta d\varphi' dt - \left(1 - \frac{2V}{c^2} \right) dr^2 - r^2 d\Omega^2. \quad (\text{III.4.5})$$

Współrzędna czasowa t w powyższej metryce i współrzędna czasowa oznaczona jako t_{GPS} dla nieruchomych zegarów na geoidzie jest związana jak następuje:

$$dt_{\text{GPS}} = \sqrt{1 + \frac{2\phi_0}{c^2}} dt \quad (\text{III.4.6})$$

lub w pierwszym przybliżeniu

$$dt_{\text{GPS}} = \left(1 + \frac{\phi_0}{c^2} \right) dt. \quad (\text{III.4.7})$$

W systemie GPS współrzędna czasowa t_{GPS} opóźnia się względem współrzędnej czasowej t , mierzonej przez inercyjnego obserwatora w nieskończoności.

Aby otrzymać metrykę w układzie ECI, należy podstawić równanie (III.4.6) do równania (III.4.1), co daje następujący związek:

$$ds^2 = \left(1 + \frac{2(V - \phi_0)}{c^2} \right) c^2 dt_{\text{GPS}}^2 - \left(1 - \frac{2V}{c^2} \right) dr^2 - r^2 d\Omega^2. \quad (\text{III.4.8})$$

Z prawej strony równania (III.4.8) przed nawias wyciągamy $c^2 dt_{\text{GPS}}^2$ i otrzymujemy:

$$ds^2 = \left[\left(1 + \frac{2(V - \phi_0)}{c^2} \right) - \left(1 - \frac{2V}{c^2} \right) \frac{1}{c^2} \left(\frac{dr}{dt_{\text{GPS}}} \right)^2 - \frac{r^2}{c^2} \left(\frac{d\Omega}{dt_{\text{GPS}}} \right)^2 \right] c^2 dt_{\text{GPS}}^2. \quad (\text{III.4.9})$$

Prędkość liniowa satelity, znajdującego się na orbicie kołowej o stałym promieniu r w układzie odniesienia ECI, dana jest wzorem:

$$v_s = r \frac{d\Omega}{dt_{\text{GPS}}}. \quad (\text{III.4.10})$$

Zatem czas własny zegara na satelicie jest równy:

$$d\tau_s = \frac{ds}{c} = \left(1 + \frac{V - \phi_0}{c^2} - \frac{v_s^2}{2c^2} \right) dt_{\text{GPS}}. \quad (\text{III.4.11})$$

Współrzędną czasową w systemie GPS wyznaczamy całkując równanie (III.4.11) wzdłuż pewnej drogi C i otrzymujemy związek:

$$\int_C dt_{\text{GPS}} = \int_C d\tau_s \left(1 - \frac{V - \phi_0}{c^2} + \frac{v_s^2}{2c^2} \right). \quad (\text{III.4.12})$$

Przy założeniu, że orbita, po której porusza się satelita, jest kołowa i ma promień r , kwadrat jego prędkości jest równy: $v_s^2 = GM/r$, natomiast potencjał w punkcie, gdzie

znajduje się satelita, jest równy: $V = -GM/r$. Wtedy równanie (III.4.12) przyjmuje postać:

$$\int_C dt_{\text{GPS}} = \int_C d\tau_s \left(1 + \frac{3GM}{2rc^2} + \frac{\phi_0}{c^2} \right). \quad (\text{III.4.13})$$

Dla promienia orbity $r = 20\,162$ km wartość w nawiasie równania (III.4.13) jest następująca:

$$\frac{3GM}{2rc^2} + \frac{\phi_0}{c^2} = -4,4647 \cdot 10^{-10} = -38,58 \text{ } \mu\text{s/d}. \quad (\text{III.4.14})$$

Wypadkowa różnica czasu na zegarze ziemskim i satelitarnym jest rzędu $\Delta t = 38,58 \text{ } \mu\text{s}$. Oznacza to, że zegar atomowy satelity spieszy się względem ziemskiego (idzie szybciej) o 38,58 mikrosekund na dobę. W tym czasie światło przebywa odległość: $\Delta l = 11\,578$ m [7,30].

Podsumowanie

Praca miała na celu przedstawienie sposobu działania systemu GPS oraz istotę uwzględniania poprawek wynikających z ogólnej i szczególnej teorii względności. Bez tych poprawek nie byłoby możliwe wyznaczenie położenia. Dopiero wprowadzanie odpowiednich równań i warunków wykluczało kolejne pomyłki systemu. Istotną rolę w systemie GPS odgrywają równania Einsteina, które opisują związek między zakrzywieniem czasoprzestrzeni a rozkładem materii. W pracy przedstawiono kilka możliwych rozwiązań tych równań, lecz szczególną uwagę poświęcono metryce Schwarzschilda (równanie (II.3.1.6)), gdyż ją wykorzystuje system GPS. Za pomocą metryki Schwarzschilda przedstawić można zjawiska relatywistyczne (wyprowadzając odpowiednie zależności) ważne w prawidłowym działaniu GPS, m.in.: grawitacyjne i kinematyczne przesunięcia częstotliwości sygnału, zjawisko Sagnaca oraz współzrędną czasową. Każde z tych zjawisk wnosi pewne poprawki czasowe, które należy uwzględnić w procesie synchronizacji zegarów na satelicie i na powierzchni Ziemi. Aby dokonać synchronizacji zegarów, znajdujących się w dwóch punktach czasoprzestrzeni, wysyłamy sygnał świetlny do punktu zaopatrzonego w zegar. W momencie powrotu sygnału znamy opóźnienie zegara, który synchronizowaliśmy. Należy podkreślić, że synchronizujemy zegary tylko w obrębie tego samego układu odniesienia.

Grawitacyjne przesunięcie częstotliwości w stronę fioletu zachodzi wówczas, gdy ruch zegarów ziemskich i satelitarnych jest zaniedbywalnie mały ($v_z = v_s = 0$) w porównaniu do działającego pola grawitacyjnego. Daje ono różnicę czasów: $\Delta t = 45\,700$ ns = 45,7 μs . Kinematyczne przesunięcie częstotliwości w stronę czerwieni uwzględnia ruch zegarów ziemskich i satelitarnych, lecz zakładamy tutaj, że działanie pola grawitacyjnego na powierzchni Ziemi oraz pola w punkcie, gdzie znajduje się satelita, jest bardzo małe. Założenia takie prowadzą do powstania różnicy czasów między wskazaniem zegarów rzędu $\Delta t = 7100$ ns = 7,1 μs . Kiedy uwzględnimy efekty związane z polem grawitacyjnym oraz z względnym ruchem zegarów, wypadkowa różnica czasu na zegarze ziemskim i satelitarnym (przesunięcie częstości ku fioletowi i czerwieni) jest rzędu

$\Delta t = 39\,000$ ns = 39 μs . W rezultacie zegar atomowy na orbicie spieszy się względem ziemskiego o 39 mikrosekund na dobę.

Zjawisko Sagnaca rozpatrywane w inercjalnym układzie odniesienia prowadzi do uzyskania różnicy czasu w sieci zegarów równej co do wartości 207,4 ns (równanie (III.3.7)). Jest ona interpretowana jako dodatkowy czas potrzebny, aby światło dotarło do poruszającego się punktu.

Współzrędną czasową w systemie GPS, wyznaczaną dla satelity poruszającego się po stałej orbicie kołowej o promieniu r , prowadzi do wypadkowej różnicy czasu na zegarach ziemskim i satelitarnym (równanie (III.4.13)) rzędu $\Delta t = 38,58 \text{ } \mu\text{s}$, więc zegar atomowy satelity spieszy się względem ziemskiego o 38,58 mikrosekund na dobę. Rozważania dotyczące współzrędną czasową prowadzą do zależności opisanej równaniem (III.4.12). Formuła ta zawiera w sobie kilka głównych źródeł błędów m.in. globalne przesunięcie ku fioletowi, ziemski potencjał kwadrupolowy, potencjał związany z rotacją Ziemi i zjawiska związane z ruchem satelitów na orbitach.

Pominięcie błędów wynikających z wyżej wymienionych zjawisk relatywistycznych powodowałoby wskazanie niepoprawnych położenia odbiornika, a co z tym idzie, również nieprawidłowe działanie całego systemu GPS.

Zatem w procesie synchronizacji zegarów na satelicie i na powierzchni Ziemi kluczową rolę odgrywają zależności pochodzące ze szczególnej i ogólnej teorii względności, które umożliwiają wprowadzanie odpowiednich korekt w działaniu systemu.

Literatura

- [1] http://www.wolinpn.pl/gora/sip/www_gps/gps/tresc.htm.
- [2] [http://pl.wikipedia.org/wiki/Galileo_\(system_nawigacyjny\)](http://pl.wikipedia.org/wiki/Galileo_(system_nawigacyjny)).
- [3] http://pl.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System.
- [4] <http://tycho.usno.navy.mil/gps.html>.
- [5] <http://gps-navstar.webpark.pl/satelity.html>.
- [6] www.level.com.pl/linki/opis_systemu_gps.doc.
- [7] J.F. Pascual-Sánchez, „Introducing Relativity in Global Navigation Satellite Systems”, <http://arxiv.org/abs/gr-qc/0507121v3>.
- [8] <http://www.blondyna2.nd.e-wro.pl/dyplomwww/gps.html>.
- [9] W. Kopczyński, A. Trautman, *Czasoprzestrzeń i grawitacja* (PWN, 1984).
- [10] http://pl.wikipedia.org/wiki/Szczególna_teoria_względności.
- [11] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Czasoprzestrzeń>.
- [12] http://pl.wikipedia.org/wiki/Interwał_czasoprzestrzenny.
- [13] http://pl.wikipedia.org/wiki/Transformacja_Lorentza.
- [14] http://pl.wikipedia.org/wiki/Grupa_Lorentza.
- [15] D.J. Griffiths, *Podstawy elektrodynamiki* (PWN, 2006).
- [16] B.F. Schutz, *Wstęp do ogólnej teorii względności* (PWN, 1995).
- [17] http://wazniak.mimuw.edu.pl/index.php?title=PF_Moduł_6.
- [18] L.D. Landau, E.M. Lifszyc, *Teoria pola* (PWN, 1976).
- [19] http://pl.wikipedia.org/wiki/Ogólna_teoria_względności.
- [20] <http://iftia9.univ.gda.pl/~fizjks/kosmologia/otw/otw.html>.
- [21] http://pl.wikipedia.org/wiki/Stała_kosmologiczna.
- [22] <http://www.mimuw.edu.pl/delta/artykuly/delta1203/stalak.pdf>.

- [23] J. Foster, J.D. Nightingale, *Ogólna teoria względności* (PWN, 1985).
[24] http://pl.wikipedia.org/wiki/Równanie_Einsteina.
[25] http://www.if.pwr.wroc.pl/~wsalejda/pop/gps_final.pdf.
[26] <http://www.geoida.pw.edu.pl/Studia/Ref-Wprow-fin.pdf>.
[27] http://en.wikipedia.org/wiki/Earth_Centered_Inertial.

- [28] <http://en.wikipedia.org/wiki/ECEF>.
[29] http://en.wikipedia.org/wiki/International_Celestial_Reference_Frame.
[30] N. Ashby, „Relativity in the Global Positioning System”, <http://relativity.livingreviews.org/Articles/lrr-2003-1/>.

PTF



Nagrody PTF za rok 2009

Nagrody otrzymali:

- ▶ Medal im. Mariana Smoluchowskiego – **dr Wojciech Żurek** z Los Alamos National Laboratory za badania związków pomiędzy fizyką klasyczną i kwantową;
 - ▶ Nagrodę im. Wojciecha Rubinowicza – **prof. Jerzy Jurkiewicz** z Instytutu Fizyki UJ za udział w sformułowaniu kauzalnej teorii gravitacji w czterech wymiarach;
 - ▶ Nagrodę I stopnia im. Arkadiusza Piekary za wyróżniającą się pracę magisterską – **mgr Anna Dyrdał** za pracę „Topologiczny anomalny efekt Halla” wykonaną pod kierunkiem prof. Józefa Barnasia na Wydziale Fizyki UAM w Poznaniu;
 - ▶ Nagrodę II stopnia za wyróżniającą się pracę magisterską – **mgr Wojciech Brzezicki** za pracę „Kwantowe przejścia fazowe w łańcuchach spinowych” wykonaną pod kierunkiem prof. Andrzeja M. Olesia w Instytucie Fizyki UJ;
 - ▶ Nagrodę III stopnia za wyróżniającą się pracę magisterską – **mgr inż. Bartłomiej Grześkiewicz** za pracę „Model materiału o ujemnym współczynniku załamania dla fal elektromagnetycznych z zakresu mikrofalowego” wykonaną pod kierunkiem dr hab. Eryka Wolarza na Wydziale Fizyki Politechniki Poznańskiej;
 - ▶ Medal i nagrodę im. Krzysztofa Ernsta za popularyzację fizyki – **prof. Jan Stankowski** za wszechstronną i pełną pasję działalność popularyzatorską, w szczególności za organizację warsztatów naukowych „Lato z helem”;
 - ▶ Medal i nagrodę I stopnia im. Grzegorza Białkowskiego dla wyróżniających się nauczycieli – **mgr Elżbieta Ka-wecka**, nauczycielka z XXXV Liceum Ogólnokształcącego im. Bolesława Prusa w Warszawie, za wkład w rozwój nowych metod nauczania fizyki, a w szczególności wspomaganych technologią informacyjną, oraz pracę z nauczycielami i młodzieżą, mającą na celu zwiększenie efektywności nauczania–uczenia się;
 - ▶ Nagrodę II stopnia dla wyróżniających się nauczycieli – *ex aequo* **mgr Jacek Orzechowski**, nauczyciel z II Liceum Ogólnokształcącego im. Stanisława Staszica w Starachowicach, za pracę z uzdolnioną młodzieżą i wybitne osiągnięcia uczniów na arenie krajowej i międzynarodowej, oraz **dr Dagmara Sokołowska**, nauczycielka z V Liceum Ogólnokształcącego im. Augusta Witkowskiego w Krakowie, za wkład w kształcenie przyszłych naukowców poprzez stosowanie nowych inicjatyw w nauczaniu;
 - ▶ Nagrodę III stopnia dla wyróżniających się nauczycieli – *ex aequo* **mgr Maria Puchta**, nauczycielka z Zespołu Szkół nr 5 z Oddziałami Integracyjnymi im. Stefana Kisielewskiego w Warszawie, za aktywną, twórczą pracę na rzecz poprawy jakości nauczania fizyki w gimnazjum i liceum, oraz **mgr Paweł Zięba**, nauczyciel z III Liceum Ogólnokształcącego we Wrocławiu, za wdrażanie indywidualnego programu nauczania fizyki i sukcesy w pracy z uzdolnionymi uczniami;
 - ▶ Dyplom specjalny – **prof. Andrzej Bielski** z Instytutu Fizyki UMK za długoletnią działalność na rzecz Polskiego Towarzystwa Fizycznego;
 - ▶ Dyplom specjalny – **dr Wojciech Dindorf** za znaczny i niekonwencjonalny wkład w kształcenie nauczycieli w Polsce.
- Uroczyste wręczenie nagród odbyło się we wrześniu 2009 r. podczas XL Zjazdu Fizyków Polskich w Krakowie.

Nanomateriały zol-żel dla optoelektroniki i fotowoltaiki

Ludwika Lipińska

Instytut Technologii Materiałów Elektronicznych, Warszawa

Nanomaterials sol-gel for optoelectronics and photovoltaics

Abstract: The sol-gel method is used to obtain nanopowders of polycomponent oxides at Institute of Electronic Materials Technology. The role of nanopowders in optoelectronics and photovoltaic technology is described. The garnet of $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG) is used to describe the details of sol-gel procedure. It is shown that the process is going by chemical reactions at low temperature and annealing at about 1000°C . Nanopowders of compound are very high purity and stoichiometry. Some results of luminescence of YAG:Nd, $Y_4Al_2O_9$ (YAM):Yb and Nd and $GdCa_4O(BO_3)_3$ (GdCOB):Eu are presented. It is shown that decay life times are longer for nanopowders than these for single crystals. The detailed results are presented in our cited publications.

Metoda zol-żel jest stosowana w Instytucie Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME) do otrzymywania nanoproszków wieloskładnikowych tlenków. W pracy jest opisane znaczenie nanoproszków dla zastosowań w optoelektronice i fotowoltaice. Przedstawiono opis procesu metody zol-żel na przykładzie granatu $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG). Wykazano, że proces zachodzi na drodze reakcji chemicznej w niskiej temperaturze i temperaturze prażenia ok. 1000°C . W rezultacie otrzymuje się materiały bardzo czyste, o wysokiej stechiometrii. Omówiono badania luminescencji dla YAG:Nd oraz $Y_4Al_2O_9$ (YAM):Yb i Nd i $GdCa_4O(BO_3)_3$ (GdCOB):Eu. Pokazano, że czasy zaniku luminescencji badanych nanoproszków są dłuższe niż te obserwowane w monokryształach. Szczegółowe wyniki są przedstawione w cytowanych publikacjach.

Materiałom stosowanym w przyrządach elektrooptycznych i technice laserowej stawia się bardzo wysokie wymagania, niezbędne są: wysoka czystość, homogeniczność i jednorodność fazowa. Chemiczne metody mokre [1] mają przewagę nad metodami fizycznymi oraz reakcjami w fazie stałej, ponieważ dzięki łatwej dyfuzji w roztworach wodnych pozwalają uzyskiwać jednorodność materiałów na poziomie molekularnym. Do otrzymywania materiałów optycznych stosuje się metody kriochemiczne, współstrącania oraz zol-żel. Każda z nich pozwala otrzymywać jednorodne pod względem składu materiały o strukturze amorficznej lub nanokrystalicznej. Wszystkie wymienione metody obdarzone są pewnymi niedogodnościami. Kriochemiczne wymagają stosowania drogiego oprzyrządowania, strąceniowe są bardzo wrażliwe na wahania pH, które mogą powodować niejednorodność fazową, metoda zol-żel jest czasochłonna, ale posiada atuty, których pozbawione są pozostałe mokre metody [2,3].

Najważniejszym jest niska temperatura, często zbliżona do pokojowej wymagana na różnych etapach syntezy z wyjątkiem etapu zagęszczania, który nie jest konieczny. To zmniejsza niebezpieczeństwo termicznego rozkładu matrycy ceramicznej i substancji, które są unieruchomione w jej sieci. Dzięki temu można otrzymywać

materiały niestabilne termicznie i termodynamicznie, których nie można otrzymać w inny sposób, osiągając przy tym wysoki stopień czystości i stechiometrii. Używając metaloorganicznych prekursorów zawierających polimeryzujące ligandy organiczne można produkować materiały, które zawierają w swojej masie zarówno organiczne jak i nieorganiczne sieci polimeru. Organicznie modyfikowana ceramika (ORMOCER) jest właśnie taką hybrydą składników organicznych i nieorganicznych. Ponieważ w syntezie zol-żel materiałem wyjściowym jest roztwór zolu, możliwe jest formowanie materiałów o skomplikowanych kształtach, wytwarzanie filmów lub włókien jak również monolitów bez potrzeby obróbki mechanicznej lub topnienia. Materiał poddany obróbce termicznej ($500\text{--}1000^\circ\text{C}$) krystalizuje dając jednofazowe, jednorodne pod względem wielkości ziarna nanoproszki.

Metoda zol-żel ma długą tradycję. W literaturze naukowej publikacje na jej temat zaczęły pojawiać się w latach trzydziestych ubiegłego wieku. Przez trzydzieści lat pozostawała w sferze zainteresowań wyłącznie chemików. W latach sześćdziesiątych zaczęli ją stosować ceramicy do wytwarzania homogenicznych proszków. Jednocześnie rozpoczęto intensywne badania mechanizmu złożonego procesu zol-żel. W ostatnich latach dzięki coraz dosko-

nalszymi metodami badawczymi w znacznym stopniu zostały one wyjaśnione. Jednocześnie dzięki pojawieniu się nowych technik charakteryzacji w pełni doceniono właściwości materiałów zol–żel, zyskały one opinię zaawansowanych materiałów nowej generacji [4–6]. Otworzyły się przed nimi bardzo szerokie możliwości zastosowań. Mają swoje czasopismo, od 1995 roku ukazuje się *Journal of Sol–Gel Science and Technology*. Obecnie trwa prawdziwy renesans metody zol–żel, osiąga ona swój pełny potencjał. Największe możliwości zastosowania unikatowych materiałów istnieją w optoelektronice i technologiach optokomunikacyjnych (fotonicznych).

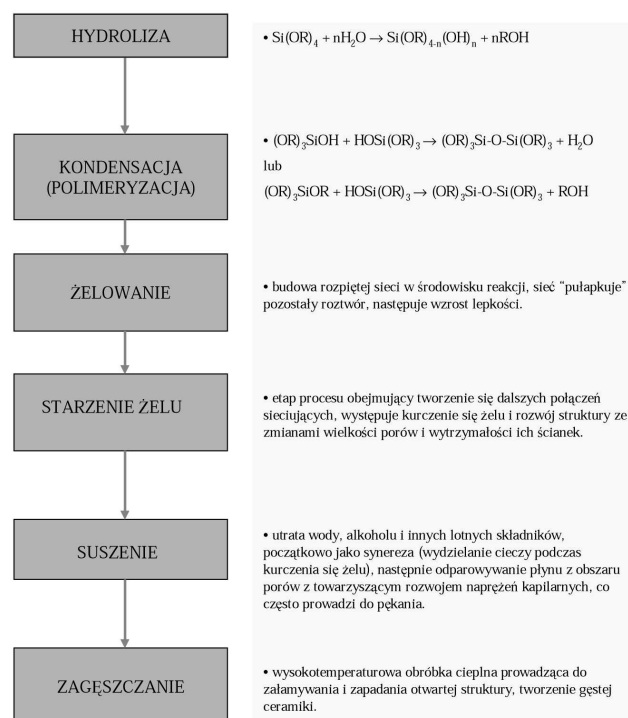
Nanokrystaliczne proszki tlenków domieszkowanych jonami ziem rzadkich wykazują silną luminescencję. Mogą służyć do wytwarzania laserowej ceramiki lub włókien fotonicznych [7–8]. Fotoniczne kryształy-nanokompozyty 3D, których właściwości zależą od okresowo zmieniającej się stałej dielektrycznej ϵ mogą znaleźć zastosowanie w urządzeniach optyki zintegrowanej [9]. Ferroelektryczne materiały PT, PZT, PLT, PLZT mogą być również otrzymywane metodą zol–żel w postaci cienkich filmów [10–12]. Materiały te budzą wielkie zainteresowanie, ponieważ mogą znaleźć zastosowanie jako nośniki trwałej pamięci optycznej, światłowody, czujniki, przełączniki elektrooptyczne. Metoda zol–żel pozwala w prosty sposób otrzymywać kropki kwantowe – cząsteczki półprzewodników AIIBVI (np. CdS, CdSe, PbS, ZnS) o rozmiarach nano wbudowane w ceramiczną matrycę lub szkło [13]. Wykazują one dużą nieliniowość optyczną. Mogą być wykorzystane do budowy laserów nowej generacji.

Ciekawą grupę materiałów stanowią hybrydowe nanokompozyty organiczno-nieorganiczne [14]. Są one niezwykle wszechstronne w sensie składu, możliwości obróbki, cech fizycznych i optycznych. Ich właściwości zależą nie tylko od natury komponentów organicznych i nieorganicznych, ale również od wzajemnego oddziaływania obu faz, które może znacznie zmieniać właściwości produktu końcowego. Interesującym przykładem tego typu kompozytów są szkła domieszkowane barwnikami [15]. Synteza zol–żel pozwala otrzymywać szeroką gamę materiałów przeznaczonych na sensory chemiczne, biologiczne i optyczne [16].

W Zakładzie Technologii Chemicznych i Ochrony Środowiska Instytutu Technologii Materiałów Elektronicznych (ITME) od lat wytwarzane są nanokrystaliczne proszki za pomocą metody zol–żel – wieloetapowej syntezy chemicznej. Metoda ta wymaga użycia odpowiednich związków chemicznych – prekursorów, w postaci których wprowadza się potrzebne pierwiastki. Tradycyjnie są to związki alkoksy – alkoholany (rysunek przedstawia schemat klasycznej metody zol–żel). Alkoholany są odczynnikami drogimi i mało trwałymi, łatwo rozkładają się pod wpływem wilgoci. Ekonomiczną, tańszą wersją metody zol–żel jest metoda Pechiniego, tzw. zmodyfikowana metoda zol–żel, do jej stosowania wystarczają zwykłe sole nieorganiczne lub tlenki metali, które są znacznie tańsze

od alkoholanych. Była ona stosowana w ITME do wytwarzania nanokrystalicznych tlenków z układu Y-Al-O: Y₂O₃ (YO), Y₃Al₅O₁₂ (YAG), Y₄Al₂O₉ i granatu gadolinowo-galowego Gd₃Ga₅O₁₂ (GGG) oraz boranów – GdCa₄O(BO₃)₃ (GdCOB) i YAl₃(BO₃)₄ (YAB). Badane materiały były domieszkowane i współdomieszkowane jonami ziem rzadkich np. Nd, Er, Eu i Yb.

Mechanizm powstawania złożonych struktur tlenkowych w tym przypadku jest nieco inny niż przy zastosowaniu związków alkoksy, wymaga stosowania czynników kompleksujących i związków organicznych ulegających polimeryzacji. Ta odmiana metody zol–żel jest również szybsza, pozwala wyeliminować długotrwały etap starzenia żelu niezbędny przy użyciu alkoholanych. Oszczędność czasu jest znacząca, może sięgać tygodni. Z powodzeniem była stosowana do otrzymywania licznych związków o strukturze regularnej – granatów oraz jednoskośnej – boranów. Drugą grupę związków wytwarzanych metodą zol–żel w ITME stanowią materiały elektrodowe do jonowych baterii litowych, np. fosforan litowo-manganowy LiMnPO₄ oraz tlenek LiMn₂O₄. Mankamentem zmodyfikowanej metody zol–żel jest wprowadzanie dużej ilości związków organicznych, które muszą zostać usunięte w procesie kalcynacji. Ten etap syntezy zol–żel decyduje o morfologii powierzchni otrzymanych nanoproszków, wielkości ziaren i stopniu aglomeracji.



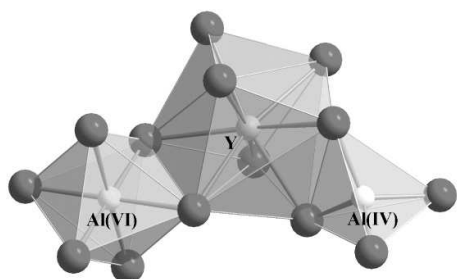
Schemat procesu zol–żel (na przykładzie alkoholany krzemu)

Na przykładzie najbardziej znanego materiału laserowego – granatu itrowo-aluminiowego (YAG) – zostanie przybliżona metoda zol–żel oraz właściwości materiałów, które pozwala otrzymywać.

Badanie procesów zol–żel zachodzących przy wytwarzaniu nanokrystalicznych proszków granatu itrowo-aluminiowego (YAG)

1. Wstęp

Nanokrystaliczne proszki tlenków domieszkowanych jonami ziem rzadkich wykazują silną luminescencję. Mogą służyć do wytwarzania laserowej ceramiki lub włókien fotonicznych. Granat itrowo-aluminiowy (YAG) domieszkowany jonami ziem rzadkich jest cenionym materiałem laserowym. Wytwarzanie go w postaci monokryształów jest kosztowne i czasochłonne. Stąd wziął się pomysł, aby syntezować go w postaci nanoproszków poddawanych następnie spiekaniu.



Struktura granatu itrowo-aluminiowego

Proszkowe prekursorY granatu itrowo-aluminiowego można otrzymywać na trzy różne sposoby. Pierwszy z nich polega na spiekaniu w temperaturze 1750°C rozdrobnionych i dokładnie wymieszanych proszków tlenków itru i glinu [17–18], jego istotą jest reakcja w fazie stałej. Pozostałe dwa sposoby to chemiczne, mokre metody oparte na reakcjach współstrącania i zol–żel. W metodzie współstrącania ziarna o strukturze YAG otrzymuje się w wyniku wprowadzenia rozpuszczalnych soli metali do roztworu, który następnie alkalizuje się do pH zapewniającego całkowite usunięcie jonów metali w postaci mieszaniny wodorotlenków itru i glinu [19–20]. Osad po odmyciu anionów adsorbowanych na jego powierzchni poddawany jest obróbce termicznej – kalcynacji w temperaturze z zakresu 1000–1200°C. Schemat otrzymania nanoproszków metodą zol–żel w wielkim uproszczeniu polega na wytwarzaniu wodnych zawiesin koloidalnych (zoli) w wyniku reakcji hydrolizy soli metali, które następnie przemieniają się w lepkie żele, a po suszeniu w temperaturze 120°C w substancje stałe (kserożele). Proszki polikrystalicznego prekursora YAG powstają w wyniku obróbki termicznej – kalcynacji w 1000°C [21–22].

2. Sposób przeprowadzenia eksperymentów

Stosowano następujące odczynniki:

- ▶ Tlenek itru Y_2O_3 99,5%
- ▶ Azotan glinu dziewięciowodny $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ cz.d.a.

- ▶ Tlenek neodymu Nd_2O_3 99,995%
- ▶ Kwas octowy CH_3COOH 99,5%
- ▶ Kwas azotowy HNO_3 (65-procentowy) cz.d.a.
- ▶ Glikol etylenowy $HO-CH_2-CH_2-OH$ cz.
- ▶ Woda dejonizowana.

Termiczną analizę destrukcji kserożelu YAG wykonano na deriwatografie firmy NETZSCH model STA 409 w zakresie temperatur 20–1000°C z szybkością narastania temperatury 2°C/min.

Informacje o zmianach strukturalnych zachodzących podczas obróbki termicznej proszków kserożeli oraz potwierdzenie zgodności struktury otrzymanych prekursorów z atomowo-cząsteczkową budową monokryształu YAG-u uzyskiwano za pomocą rentgenowskiej analizy strukturalnej. Badania prowadzono na dyfraktometrze proszkowym Siemens D-500 wyposażonym w półprzewodnikowy detektor krzemowy z domieszką litu. Parametry pomiaru metodą krokową w zakresie kątów 2θ 15–65° z krokiem 0,05° i czasem zliczania 4 s, promieniowanie lampy $Cu K_\alpha$ sr. 1,548 Å.

Rozmiary, kształt oraz morfologię powierzchni proszków YAG-u na różnych etapach obróbki cieplnej ustalano na podstawie obrazów próbek w wiązce elektronów wtórnych skaningowego mikroskopu elektronowego.

Rozmiar cząstek i ich statystyczny rozkład oceniano ze zdjęć poddanych obróbce za pomocą telewizyjnego analizatora obrazów Clemex (Kanada).

Widma FT-IR w zakresie średniej podczerwieni (4000–400 cm^{-1}) rejestrowano za pomocą spektrometru Perkin-Elmer System 2000 z rozdzielczością 4 cm^{-1} . Próbkę w postaci pastylek KBr sporządzono mieszając 2 mg proszku YAG w 800 mg KBr i prasując pod ciśnieniem około 250 atm. Widma rejestrowano względem analogicznie przygotowanej pastylki zawierającej czysty KBr.

Badania termogravimetryczne wykonano na deriwatografie firmy NETZSCH model STA 409 w zakresie temperatur 20–1000°C z szybkością narastania temperatury 2°C/min.

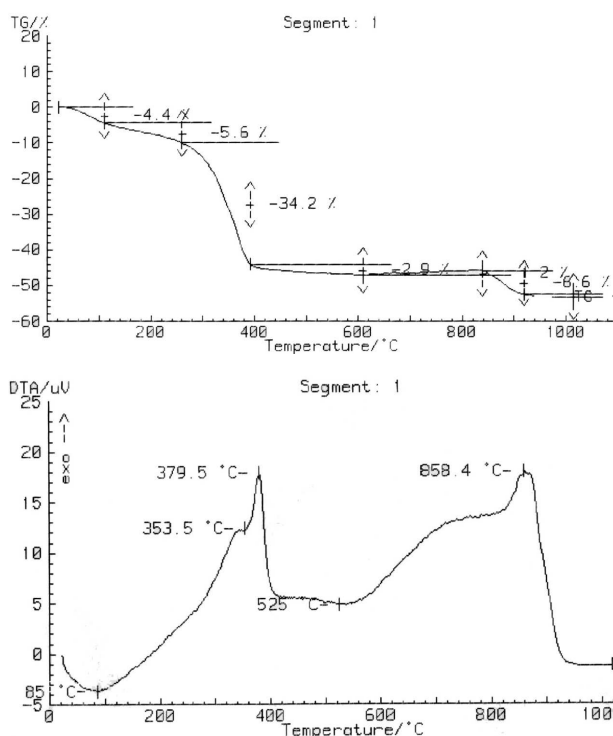
Metoda syntezy YAG-u czystego i domieszkowanego neodymem z użyciem glikolu etylenowego [21]

Y_2O_3 (15,691 g, 0,06949 mol) rozpuszczono w 600 ml kwasu octowego o stężeniu 0,4 mol/l przy mieszaniu w ciągu 10 godz., w temperaturze 55–60°C, w naczyniu przykrytym szkłem zegarkowym. Podczas przebiegu procesu sprawdzano pH i utrzymywano je na poziomie 4,5–5,0 dodając stężonego kwasu octowego 86,89 g, (0,2316 mol) $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ rozpuszczano w 250 ml wody destylowanej i dodano do pierwszego roztworu i mieszano jeszcze 2 godz. utrzymując w tej samej temperaturze. Następnie dodawano 26,4 ml – 0,471 mola glikolu

etylenowego. Słabo kwaśne środowisko ($\text{pH} \approx 5$) zapobiega flokulacji tlenków metali. Podczas zateżnienia przez ostrożnie wyparowanie w temperaturze 60–70°C roztwór zawierający Y–Al–octan–azotan–glikol przy ciągłym mieszaniu przemieniał się w biały przezroczysty żel, który po suszeniu w temperaturze 100–120°C zmieniał kolor na lekko brązowy. Wysuszony proszek kserożelu rozdrabniano w moździerz agatowym i wygrzewano w ciągu 2 godzin w temperaturze 800°C w atmosferze powietrza. Ponieważ żele zawierające związki organiczne są łatwopalne, stosowano powolne ogrzewanie (ok. 2°C/min) zwłaszcza w zakresie temperatur 150–400°C. Po dodatkowym rozdrabnianiu proszki poddawano kalcynacji w przedziale temperatur 800–1600°C w atmosferze powietrza w ciągu 6 godzin. W celu otrzymania granatu domieszkowanego neodymem tlenek neodymu wprowadzano do mieszaniny reakcyjnej razem z tlenkiem itru.

3. Wyniki badań

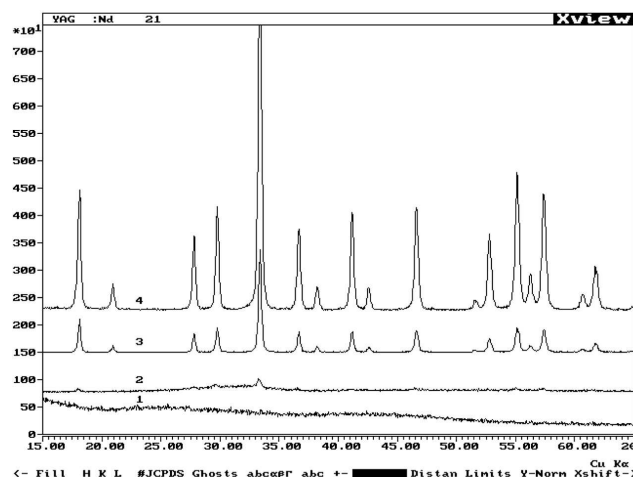
Na rysunku 1 przedstawiono wyniki analizy termicznej procesu pirolizy kserożelu YAG w zakresie temperatur od pokojowej do 1000°C, krzywa górna (TGA) przedstawia zależność ubytku masy od temperatury, a dolna krzywa (DTA) – charakterystyczne temperatury reakcji, które towarzyszą tym procesom.



Rys. 1. TGA i DTA kserożelu YAG, wzrost temperatury 2°C/min.

Jak widać z przedstawionych danych, ze wzrostem temperatury obserwuje się ubytek masy badanej próbki, który osiąga pod koniec ogrzewania 53,25%. Ubytek ten powstaje w kilku etapach, przy czym każdemu etapowi

towarzyszy efekt cieplny. Pierwszy ubytek masy o 4,4% związany jest z efektem endotermicznym. Następne straty masy próbki są związane z procesami egzotermicznymi. Jak widać z rys. 1, największy efekt cieplny ma miejsce w temperaturze około 379°C i towarzyszy mu największy ubytek masy 34,2%. W zakresie temperatur 600–840°C obserwuje się nieznaczny wzrost masy – 1,2%, któremu towarzyszy niewielka reakcja egzotermiczna. Drugi co do wielkości efekt cieplny ma swoje maksimum w temperaturze około 858°C, ale ubytek masy jest mniejszy niż dla reakcji w 380°C i wynosi około 6,6%.

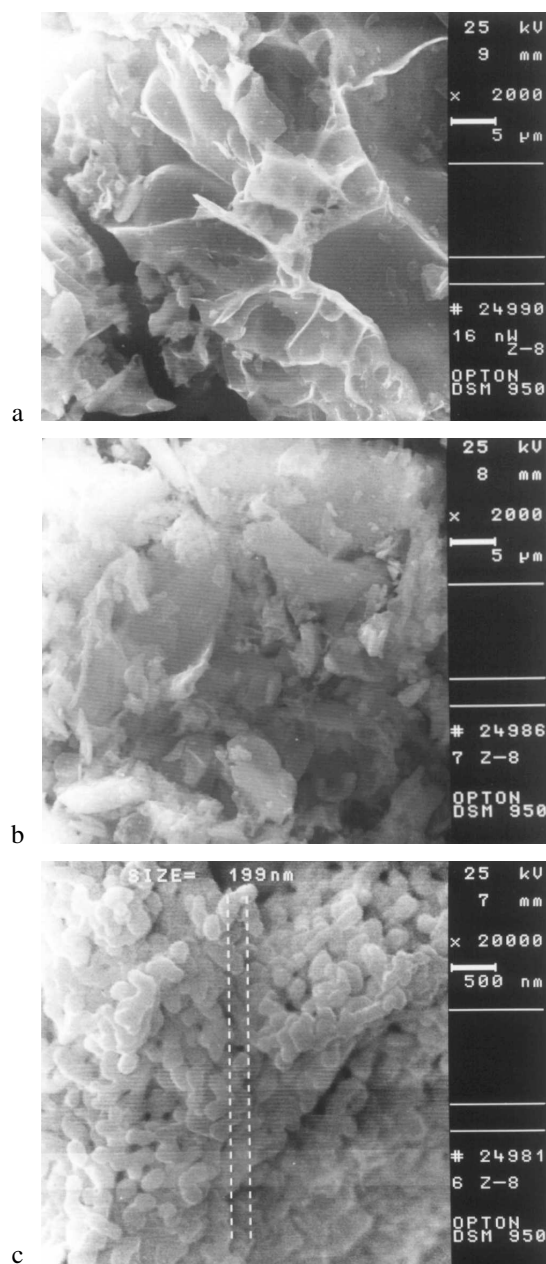


Rys. 2. Dyfraktogramy proszków YAG kalcynowanych w różnych temperaturach. 1 – 120°C; 2 – 800°C; 3 – 1000°C; 4 – 1000°C (4% mol Nd₂O₃)

Na rysunku 2 przedstawiono zależność intensywności linii rentgenowskich od kąta dyfrakcji 2θ dla próbek proszków zawierających YAG (widma 1–3) i YAG z 4% molowymi Nd₂O₃ poddanych obróbce cieplnej w różnych temperaturach. Jak widać, dyfraktogram próbki wyjściowego kserożelu przedstawia linię równoległą do osi kątów (widmo 1). Dyfraktogram próbki proszku, którą poddano pirolizie w temperaturze 800°C (widmo 2) jest bardzo podobny do poprzedniego widma z tą różnicą, że w zakresie kątów 2θ około 33,5° obserwuje się pik o małej intensywności. Obróbka termiczna w temperaturze powyżej 1000°C kserożelu YAG-u czystego (widmo 3) i z 4-procentową zawartością Nd₂O₃ (widmo 4) prowadzi do powstawania w zakresie kątów 2θ serii pików, przy czym charakter pików i ich położenie nie zmienia się w obecności tlenku neodymu. Porównywanie otrzymanych dyfraktogramów z widmem zarejestrowanym na próbce monokrystalicznego YAG-u dowodzi, że mamy do czynienia z polikrystalicznymi proszkami YAG których wartości stałych sieci wahały się w granicach 1,1979–1,2007 nm, a wielkość kryształitów od 107 nm do 310 nm.

Na rysunkach 3a, b i c przedstawiono otrzymane za pomocą mikroskopii skaningowej zdjęcia proszków wyjściowego kserożelu oraz poddanych obróbce cieplnej w temperaturach 800°C i 1200°C. Jak widać z rys. 3a,

mikrostruktura proszku wysuszonego kserożelu składa się z płaskich płatków o nieforemnej postaci z ostrymi krawędziami o rozmiarach rzędu 5–35 μm .



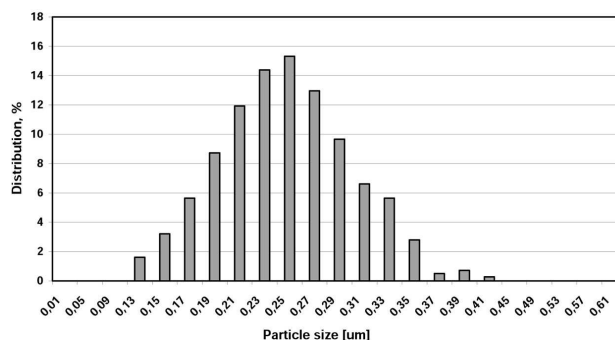
Rys. 3. Kształt i morfologia powierzchni proszków a) suszonych w 120°C w ciągu 6 godzin, b) kalcynowanych w 800°C w ciągu 2 godzin, c) kalcynowanych w 1200°C w ciągu 2 godzin.

Stopniowe ogrzewanie próbki do 800°C i przetrzymywanie w tej temperaturze w ciągu 2 godzin (rys. 3b) wywołuje zmianę koloru proszku z jasnożółtego do ciemnobrunatnego, jednak widocznych zmian w mikrostrukturze proszku nie obserwuje się.

Natomiast dalsza kalcynacja proszku w temperaturach 1000°C i wyższych w ciągu od dwóch do sześciu godzin prowadzi do dużych zmian w mikrostrukturze proszku

(rys. 3c). Jak wynika z rys. 3c, obróbka termiczna w takich temperaturach sprzyja przejściu od struktury amorficznej do polikrystalicznej. Powstają bardzo drobne ziarna o kulistym kształcie, połączone w nieduże aglomeraty. Przybliżona ocena rozmiarów cząsteczek wskazuje, że one mają one rozmiary rzędu 200 nm.

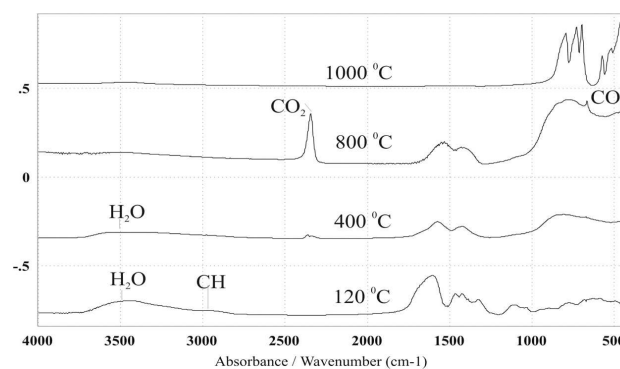
Szczegółowe i dokładniejsze dane o rozmiarach cząstek i ich statystycznym rozkładzie otrzymano ze zdjęcia, poddanego obróbce za pomocą telewizyjnego analizatora obrazów Clemex (Kanada). Wyniki tej analizy przedstawiają rys. 3c i 4.



Rys. 4. Rozkład rozmiarów ziaren proszku YAG poddanego kalcynacji w 1200°C w ciągu 2 godzin

Z zamieszczonych wykresów wynika, że więcej niż połowa cząstek (54,6%) ma rozmiary w przedziale 200–300 nm, a średni rozmiar wynosi 254 ± 47 nm.

Na rysunku 5 przedstawiono widma w podczerwieni kserożeli suszonych w 120°C i poddanych następnie pirolizie w temperaturach 400°C, 800°C i 1000°C.



Rys. 5. Widmo IR kserożeli suszonych w 120°C i następnie kalcynowanych w różnych temperaturach w ciągu 2 godzin

Z analizy otrzymanych krzywych wynika, że widma wyjściowego kserożelu mają pasma pochłaniania z maksimum przy 3444 cm^{-1} i 2954 cm^{-1} oraz grupę pasm w zakresie $(1400\text{--}1700) \text{ cm}^{-1}$. Wygrzewanie próbki w 400°C w ciągu dwóch godzin prowadzi do prawie całkowitego usunięcia pików przy 3444 cm^{-1} i 2954 cm^{-1} i pewnego zmniejszenia intensywności pików oraz ich liczby przy

(1400–1700) cm^{-1} . Po obróbce termicznej w ciągu 2 godzin w 800°C obserwuje się zniknięcie pasm w zakresie 4000–2500 cm^{-1} , dalsze obniżenie intensywności pasm przy 1422 i 1532 cm^{-1} z jednoczesnym powstawaniem piku przy 2342 cm^{-1} . Wygrzewanie próbki w 1000°C prowadzi do pozostania serii pasm w zakresie częstotliwości poniżej 1000 cm^{-1} .

4. Omówienie wyników

Jak wynika z przytoczonego przeglądu literaturowego i przeprowadzonych badań, proces powstawania polikrystalicznego proszku o strukturze granatu itrowo-alumino-owego jest złożony i przebiega w kilku etapach. Wysuszony w 120°C kserożel zawiera jony metali, reszty kwasowe kwasów azotowego i octowego oraz glikol etylenowy, które są połączone pomiędzy sobą za pośrednictwem wiązań chemicznych. Na widmie w podczerwieni (rys. 7) pasma pochłaniania z maksimum około 3444 cm^{-1} i 2954 cm^{-1} wskazują na obecność wody i grup CH. Z analizy dodatkowo otrzymanych widm octanu itru i azotanu glinu wynika, że pasma w zakresie 1400–1700 cm^{-1} należą do drgań grup wchodzących w skład jonu octanowego.

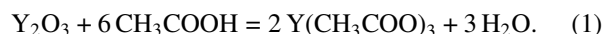
Na podstawie analizy rentgenowskiej (rys. 2) stwierdzono, że kserożel ma budowę amorficzną, świadczy o tym brak pików na dyfraktogramie 1, potwierdzają to również zdjęcia otrzymane za pomocą mikroskopii elektronowej (rys. 3). Analiza termiczna (rys. 1) sugeruje, że niskotemperaturowy (do 400°C) etap pirolizy kserożelu, strata masy o 4,4% i towarzyszący temu efekt endotermiczny przy 120°C jest związany z utratą cząsteczek wody. Ubytek masy w zakresie temperatur (200–400)°C i związany z nim efekt egzotermiczny z maksimum przy 380°C prawdopodobnie jest związany z procesem częściowego wypalania organicznych składników kserożelu. Widmo w podczerwieni próbki wypalanej w 400°C potwierdza tę tezę dużym zmniejszeniem intensywności pasm pochłaniania w zakresie częstotliwości 4000–2500 cm^{-1} . Nieznaczny wzrost masy w zakresie temperatur 600–840°C, któremu towarzyszy niewielka reakcja egzotermiczna, prawdopodobnie jest wynikiem dwóch procesów: dalszej destrukcji termicznej oraz adsorpcji tlenu węgla, na co wskazuje pik na widmie przy 2342 cm^{-1} . Jednak, jak widać z dyfraktogramu próbki wypalanej przy 800°C (rys. 2, widmo 2) jest ona niewystarczająca do powstania prekursora. Dyfraktogram wypalonego w 800°C proszku przedstawia linię prostą, co świadczy o tym, że amorficzna budowa kserożelu nie uległa zmianie. Wskazuje na to także obraz próbki uzyskany za pomocą mikroskopu elektronowego (rys. 3a).

Drugi co do wielkości efekt cieplny (maksimum na krzywej DTA przy 858°C) i mniejszy niż dla reakcji przy 380°C ubytek masy (6,6%) jest związany z procesem wypalania reszty związków organicznych, desorpcji CO₂ oraz przemianą fazową, w wyniku której powstaje polikrystaliczny proszek granatu itrowo-alumino-owego. W wyniku tej przemiany na dyfraktogramach (rys. 2, widma 3 i 4) są obecne piki charakterystyczne dla monokryształu YAG. Zdjęcie zrobione za pomocą mikroskopu elektronowego (rys. 3c) potwierdza przemianę pod wpływem temperatury

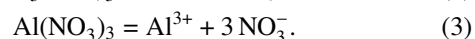
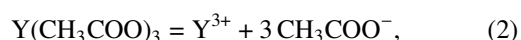
amorficznego kserożelu w formę drobno ukształtowane cząstki i – jak to widać z rys. 3c – o bardzo małym rozrzucie co do wielkości. Na widmie w podczerwieni proszku wypalonego w 1000°C (rys. 5) powstały pasma pochłaniania tylko w zakresie poniżej 1000 cm^{-1} , które są charakterystyczne dla wiązania Me–O.

Fizykochemiczne metody badania procesu powstawania polikrystalicznego prekursora granatu itrowo-alumino-owego pozwalają na zaproponowanie mechanizmu tego procesu.

Proces zaczyna się od rozpuszczenia tlenku itru w kwasie octowym:



Powstały octan itru oraz azotan glinu ulegają dysocjacji na jony:

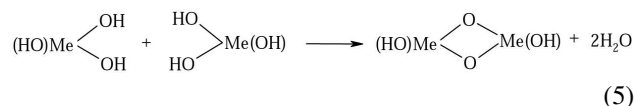


Pod wpływem podwyższonej temperatury w słabo kwaśnym środowisku w wyniku hydrolizy w roztworze powstają wodorotlenki itru i glinu:

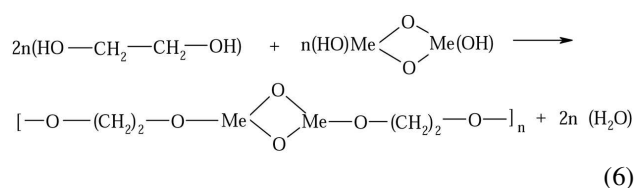


gdzie Me: Y i Al.

Wodorotlenki ulegają procesowi olacji, w wyniku czego tworzą się związki połączone między sobą mostkami tlenowymi.



Ważną funkcję spełnia wprowadzony do mieszanki glikol etylenowy. Według [7] ten dwufunkcyjny alkohol łączy między sobą związki mostkowe metali w polimery o niedużej wartości n , w wyniku czego powstaje matryca, która, jak można sugerować, kształtuje rozmiar cząstek prekursora.



Istnienie tej matrycy chroni w czasie ostrożnej kalcynacji (narastanie temperatury nie więcej niż 2°C/min) układ od przedwczesnego oddziaływania pomiędzy atomami tlenu i metali, które może doprowadzić do powstania samodzielnych tlenków itru i glinu uniemożliwiając tym samym osiągnięcie celu – otrzymanie proszku o strukturze YAG-u, będącego roztworem stałym tlenków Y₂O₃ i Al₂O₃.

Właściwości spektroskopowe

Badano luminescencyjne własności związków domieszkowanych i otrzymano wiele interesujących nowych

wyników. Widma emisyjne wzbudzano wiązką lasera argonowego o długości fali 514,5 nm odpowiadającej energii pasma absorpcji jonu aktywnego optycznie. Pomiar prowadzono w temperaturze pokojowej przy pomocy układu pomiarowego Dongwoo Optron Fluometer. Wszystkie wyniki spektroskopowe nanoproszków YAG:Nd, wysoko domieszkowanych przedstawiono w publikacji [23], w niniejszej pracy zamieszczono tylko czasy życia dla poziomu $^4F_{3/2}$.

Tabela 1. Czasy życia luminescencji nanoproszków YAG:Nd³⁺ zmierzone w 300 K

Próbka	Czas życia [μ s]	Krzywa zaniku
YAG 1 at.% Nd monokryształ	215	wykładnicza
YAG 1 at.% Nd nanoproszek	312	wykładnicza
YAG 8 at.% Nd nanoproszek	26,5	wykładnicza
YAG 10 at.% Nd nanoproszek	5,2	wykładnicza
YAG 15 at.% Nd nanoproszek	7,6	wykładnicza
YAG 20 at.% Nd nanoproszek	2,3	niewykładnicza
YAG 25 at.% Nd nanoproszek	1,6	niewykładnicza
YAG 27 at.% Nd nanoproszek	1,4	wykładnicza

Na przykład, jak pokazano w tab. 1, czas życia dla proszku YAG domieszkowanego 1 at.% Nd jest dłuższy niż ten cytowany w literaturze dla monokryształu.

Otrzymano również wiele interesujących wyników dla innych badanych materiałów, tlenków wieloskładnikowych. Emisja luminescencji dla proszku czystego i domieszkowanego GdCOB:Eu³⁺ pokazuje rolę domieszki Eu³⁺. Czas życia stanu wzbudzonego gadolinu $^6P_{7/2}$ wynosi 2,7 ms dla czystego proszku i ulega efektywnemu skróceniu do 0,21 ms dla domieszkowanych 4 at.% Eu. W przypadku tlenoboranów gadolinowych i roztworów stałych z itrem oraz domieszkowanych europem wykazano, że nieuporządkowanie jest związane z podstawieniami jonów ziem rzadkich w pozycjach Ca (1) i (2) i proces nie zależy od metody przygotowania tych materiałów (monokryształy/nanokryształy).

W przypadku YAM-u współdomieszkowanego jonami Yb i Nd pokazano wydajny transfer energii bezpromienistej pomiędzy tymi jonami. Natomiast czasy zaniku luminescencji nanoproszków są dłuższe od obserwowanych w monokryształach.

Na podstawie zaprezentowanych wyników można wnioskować, że w porównaniu z monokryształami nanokryształy są mniej zdefektowane i nie wykazują odchyień od stechiometrii rozważanego materiału. Wszystkie wyniki są szczegółowo opisane w publikacjach [24–32].

Wysoka czystość i stechiometria nanoproszków oraz własności luminescencyjne pozwalają przewidywać, że będą miały szerokie zastosowanie jako materiały wyjściowe w wielu technologiach wykorzystywanych w optyce, produkcji różnego typu wyświetlaczy plazmowych (PDP), emisyjnych, polowych oraz jako ekrany w lampach obrazowych, jako fosfory, detektory oraz w technologii cienkowarstwowej. Własności luminescencyjne mogą być wykorzystane w elementach z nanokrysztalitami wbudowanymi w żywice i inne media.

5. Wnioski

- ▶ Otrzymano nanoproszki YAG:Nd o zawartości neodymu w zakresie 2–27,5% atomowych [23].
- ▶ Metodami analizy termicznej oraz spektroskopii w podczerwieni zbadano niskotemperaturowe stadia termodestrukcji wysuszonego przy 120°C kserożelu.
- ▶ W wyniku badań ustalono, że cząstki kserożelu uzyskują strukturę YAG-u w temperaturze powyżej 800°C.
- ▶ Na podstawie przeprowadzonych badań zaproponowano mechanizm powstawania struktury granatu w proszkach otrzymywanych metodą zol–żel.
- ▶ Zmierzono czasy życia nanoproszków o różnej koncentracji domieszki. Dla 1% at. Nd jest ona najwyższa, dla nanokrysztalicznej próbki zarejestrowano znacznie dłuższy czas życia niż dla kryształu objętościowego.

Serdeczne podziękowania dla prof. Anny Pajączkowskiej, kierownika grantu nr 3 T11 B 004 30, w ramach którego realizowano część przedstawionych badań. Również dla prof. Witolda Ryby-Romanowskiego za badania spektroskopowe i dr Ryszarda Diduszko za wykonanie badań rentgenowskich.

Literatura

- [1] D.R. Uhlmann, J.M. Boulton, G. Teowee, „New Optical Materials by Wet Chemical Processing”, *J. Non-Cryst. Solids* **196**, 26 (1996).
- [2] C.J. Brinker, G.W. Scherer, *Sol–Gel Science: The Physics and Chemistry of Sol–Gel Processing* (Academic Press, New York 1990).
- [3] J.D. Wright, A.J.M. Sommerdijk, *Sol–Gel Materials: Chemistry and Applications* (Gordon and Breach Science Publishers, The Netherlands 2001).
- [4] R. Reifeld, „Prospects of Sol–Gel Technology Towards Luminescent Materials”, *Opt. Mater.* **16**, 1 (2001).
- [5] J. Livage, „Sol–Gel Processes”, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* **2**, 132 (1997).
- [6] S. Bhandarkar, „Sol–Gel Processing for Optical Communication Technology”, *J. Am. Ceram. Soc.* **87**, 1180 (2004).
- [7] D. Hreniak, W. Stręk, P. Mazur, R. Pazik, M. Ząbkowska-Waławek, „Luminescence Properties of Tb³⁺:Y₃Al₅O₁₂ Nanocrystallites Prepared by the Sol–Gel Method”, *Opt. Mater.* **26**, 117 (2004).
- [8] R.C. Pullar, A.K. Bhattacharya, „Polycrystalline Yttrium Aluminium Garnet (YAG) Fibres Produced from the Steaming of an Aqueous Sol–Gel Precursor”, *Materials Letters* **39**, 173 (1999).
- [9] M.I. Samoilovich i in., „Artificial Opal Structures for 3D-Optoelectronics”, *Microelectronic Engineering* **69**, 277 (2003).
- [10] Z. Jiwei, Y. Xi, Z. Liangying, „The Optical Waveguide Characteristics of Highly Orientated Sol–Gel Derived Polycrystalline Ferroelectric PZT Thin Films”, *Ceramics International* **27**, 585 (2001).
- [11] T. Tanase, Y. Kobayashi, M. Konno, „Preparation of Lead Zirconate Titanate Thin Films with a Combination of Self-Assembly and Spin-Coating Techniques”, *Thin Solid Films* **457**, 264 (2004).

- [12] Z. Weihua, Z. Gaoyang, C. Zhiming, „Photosensitive PZT Gel Films and their Preparation for Fine Patterning”, *Mater. Sci. Eng.* **B99**, 168 (2003).
- [13] B. Capoen, „Effects of the Sol–Gel Solution Host on the Chemical and Optical Properties of PbS Quantum Dots”, *Journal of Molecular Structure*” **651–653**, 467 (2003).
- [14] B. Lebeau, C. Sanches, „Sol–Gel Derived Hybrid Inorganic–Organic Nanocomposites for Optics”, *Current Opinion in Solid State and Materials Science* **4**, 11 (1999).
- [15] S. Wu, W. Dong, C. Zhu, „Structure and Laser Properties of UV Dye-Doped Hybrid Material”, *Opt. Mater.* **15**, 167 (2000).
- [16] B.D. MacDonagh i in., „Sol–Gel Coatings for Optical Chemical Sensors and Biosensors”, *Sensors and Actuators* **B29**, 51 (1995).
- [17] A. Ikesue, K. Kamata, K. Yoshida, „Effects of Neodymium Concentration on Optical Characteristics of Polycrystalline Nd:YAG Laser Materials”, *J. Am. Ceram. Soc.* **79**, 1921 (1996).
- [18] Y. Rabinovitch, D. Tetard, M.D. Faucher, M. Pham-Thi, „Transparent Polycrystalline Neodymium Doped YAG: synthesis parameters, laser efficiency”, *Opt. Mater.* **24**, 345 (2003).
- [19] J. Lu, K. Ueda, H. Yagi, T. Yanagitani, Y. Akiyama, A.A. Kaminskii, „Neodymium Doped Yttrium Aluminium Garnet (Y₃Al₅O₁₂) Nanocrystalline Ceramics – a New Generation of Solid State Laser and Optical Materials”, *J. Alloys Comp.* **341**, 220 (2002).
- [20] N. Matsushita, N. Tsuchiya, K. Nakatsuka, T. Yanagitani, „Precipitation and Calcination Processes for Yttrium Aluminium Garnet Precursors Synthesized by the Urea Method”, *J. Am. Ceram. Soc.* **82**, 1977 (1999).
- [21] M. Veith, S. Mathur, A. Kareiva, M. Julavi, M. Zimmer, V. Huch, „Low Temperature Synthesis of Nanocrystalline Y₃Al₅O₁₂ (YAG) and Ce-Doped Y₃Al₅O₁₂ via Different Sol–Gel Methods”, *J. Mater. Chem.* **9**, 3069 (1999).
- [22] P. Vagueiro, A. López-Quintela, „Synthesis of Yttrium Aluminium Garnet by the Citrate Gel Process”, *J. Mater. Chem.* **8**, 161 (1998).
- [23] L. Lipińska, L. Loiko, A. Kłos, S. Ganschow, R. Diduszko, W. Ryba-Romanowski, A. Pajączkowska, „Nanopowders and crystals in (Y_{1-x}Nd_x)₃Al₅O₁₂ system: Preparation and properties”, *Journal of Alloys and Compounds* **432**, 177 (2007).
- [24] E. Talik, M. Kruczek, A. Pajączkowska, A. Kłos, L. Lipińska, E. Łojko, „Chemical analysis of GdCa₄O(BO₃)₃ by XPS”, *J. Alloys Comp.* **442**, 282 (2007).
- [25] P. Solarz, M. Nikl, A. Kłos, R. Lisiecki, W. Ryba-Romanowski, A. Rzepka, S. Ganschow, A. Pajączkowska, „Luminescence characteristics of undoped and Eu-doped GdCOB single crystals and nanopowders”, *Cryst. Res. & Technol.* **42**, 1308 (2007).
- [26] A. Rzepka, W. Ryba-Romanowski, R. Diduszko, L. Lipińska, A. Pajączkowska, „Growth and characterization of Nd, Yb-Yttrium oxide nanopowders obtained by sol–gel method”, *Crystal Research and Technology* **42**, 1314 (2007).
- [27] A. Kłos, L. Lipińska, P. Solarz, W. Ryba-Romanowski, „Spectroscopic studies of Eu³⁺-doped Gd_{1-x}Y_xCa₄O(BO₃)₃ prepared by sol–gel method”, *J. Alloys Comp.* **459**, 410 (2008).
- [28] L. Lipińska, W. Ryba-Romanowski, A. Rzepka, S. Ganschow, R. Lisiecki, R. Diduszko, A. Pajączkowska, „Synthesis and characterization of Nd gadolinium gallium garnet (GGG) nanopowders obtained by modified sol–gel method”, *Cryst. Res. Technol.*, w druku (2008).
- [29] W. Ryba-Romanowski, L. Lipińska, R. Lisiecki, A. Rzepka, A. Pajączkowska, „Optical study of rare earth-doped Gd₃Ga₅O₁₂ nanocrystals obtained by a modified sol–gel method”, *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* **9**, 3020 (2009).
- [30] W. Ryba-Romanowski, R. Lisiecki, A. Rzepka, L. Lipińska, A. Pajączkowska, „Luminescence and excitation energy transfer in rare earth-doped Y₄Al₂O₉ nanocrystals”, *Optical Materials* **31**, 1155 (2009).
- [31] L. Lipińska, A. Rzepka, W. Ryba-Romanowski, D. Klimm, S. Ganschow, R. Diduszko, „Nd(III) and Yb(III) ions incorporated in Y₄Al₂O₉ obtained by sol–gel method: synthesis, structure, crystals and luminescence”, *Cryst. Res. Technol.* **44**, 146 (2009).
- [32] A. Szysiak, L. Lipińska, W. Ryba-Romanowski, T. Solarz, R. Diduszko, A. Pajączkowska, „Nanopowders of YAl₃(BO₃)₄ doped by Nd, Yb and Cr obtained by sol–gel method: synthesis, structure and luminescence properties”, *Mater. Res. Bull.*, wysłane do druku (2009).

Czy mechanika kwantowa zagraża szczególnej teorii względności?

Leszek M. Sokołowski

Obserwatorium Astronomiczne, Uniwersytet Jagielloński

Is quantum theory a threat to special relativity?

Abstract: Recently there appeared some suggestions that highly sophisticated quantum mechanical experiments involving entangled states might be a threat to special relativity and ultimately enforce deep modifications of the theory. Here we attempt to shed some light on the problem from the relativist's viewpoint. We emphasize what special relativity proper is: it consists of physically interpreted theorems concerning geometry of Minkowski spacetime and as such is compatible with a wide class of phenomena propagating at superluminal velocities. The very construction of a spacetime (Galilei or Minkowski) requires classical objects being quantum matter in quasi-classical states. These quasi-classical states are essential also for quantum mechanics, as is expressed in the dualism of the quantum object versus the classical measuring device. Special relativity is based on effects involving elementary particles and this shows that the quantum world necessitates Minkowski spacetime as the background, hence special relativity is robust. On the other hand a fully relativistic description of many quantum mechanical processes encounters a number of difficulties indicating that the current comprehension and interpretation of quantum theory is still incomplete and needs far reaching development.

Ostatnio pojawiły się sugestie, iż eksperymenty z cząstkami kwantowymi w stanach splątanych mogą wymusić znaczące zmiany szczególnej teorii względności. Tutaj rozpatruję tę kwestię z punktu widzenia relatywisty. Właściwa STW obejmuje twierdzenia geometryczne o czasoprzestrzeni Minkowskiego i nie wyklucza rozmaitych zjawisk biegnących z ponadświetlnymi prędkościami, których dopatrzeć się można w procesach kwantowych. Sama konstrukcja jakiegokolwiek czasoprzestrzeni wymaga ciał klasycznych, czyli agregatów kwantowej materii w stanach bliskich klasycznym. Ciała klasyczne są konieczne również w mechanice kwantowej, gdyż wymaga ona dualizmu: obiekt kwantowy – klasyczny przyrząd pomiarowy. STW opiera się na pomiarach na cząstkach kwantowych w stanach prawie klasycznych, z czego wynika, że fizyka cząstek elementarnych wymaga czasoprzestrzennej sceny o geometrii Minkowskiego i stany splątane nie mogą tej sceny naruszyć. Tym niemniej, w pełni relatywistyczny opis wielu procesów kwantowych napotyka poważne trudności. Są one wyraźnym sygnałem, że nasze pojmowanie teorii kwantów jest wciąż dalece niekompletne i teorię tę trzeba znacząco rozwinąć.

1. Sformułowanie zagadnienia

W *Świecie Nauki* z kwietnia 2009 r. ukazał się artykuł Davida Alberta i Rivki Galchen „Kwantowe zagrożenie dla szczególnej teorii względności”. Polska redakcja uznała go za tak kontrowersyjny, że uzupełniła go polemicznym artykułem „To nie musi koniecznie być tak: paradoksy interpretacji paradoksu Einsteina” pióra prof. Marka Żukowskiego z Uniwersytetu Gdańskiego. Polecam ich lekturę. Poruszone w nich zagadnienie jest fragmentem szerszego problemu, z którym długo jeszcze będziemy się zmagać,

więc postanowiłem oświetlić go z innej strony. Temat jest trudny i pisanie o nim na poziomie przyjętym w *Scientific American* tylko zaciemni sprawę.

D. Albert i R. Galchen twierdzą (z dodatkowych informacji wynika, że merytorycznym autorem jest Albert), iż zjawiska kwantowe, w których mamy do czynienia ze splątaniem stanów¹ mogą prowadzić do trudności z ich relatywistycznym opisem, co może wręcz wstrząsnąć szczególną teorią względności. Uważam to za pogląd błędny. Z kolei prof. Żukowski stwierdza, że „w zakresie zbadanych zjawisk związanych z kwantowym splątaniem teoria względ-

¹Polski przekład „splątanie” angielskiego „entanglement” przyjął się powszechnie, lecz nie jest w pełni trafny, bowiem w odróżnieniu od „spłecenia” sugeruje obecność chaosu („włosy ma splątane, a nie starannie splecione”).

ności zdaje się mieć całkiem dobrze”, lecz w moim przekonaniu podany przez niego argument omija sedno sprawy. Autorzy obu artykułów podchodzą do kwestii ewentualnych niezgodności od strony teorii kwantów i przyjmują, że gdyby niezgodności te okazały się realne, to poszkodowana, „wstrząśnięta”, byłaby teoria Einsteina. Jako relatywista chcę spojrzeć na tę kwestię od strony teorii względności.

Różnica stanowisk jest istotna. Jeśli chodzi o zakres zjawisk fizycznych, do których się stosują, obie teorie są równorzędne, bowiem wszelka materia jest ze swej natury i relatywistyczna, i kwantowa, różnią się natomiast stopniem rozwoju. Szczególna teoria względności jest teorią skończoną, zamkniętą i dobrze zrozumianą – tak przynajmniej sądzą relatywiści. Mechanika kwantowa wciąż się rozwija. Jej aparat matematyczny osiągnął już postać dojrzałą, zaś fundamenty, co dobitnie widać z obu artykułów, wciąż rodzą zasadnicze wątpliwości interpretacyjne. Obie teorie są prawdziwe w sensie zgodności ze wszystkimi znanymi eksperymentami. Chodzi o to, by ustalić, w którą stronę należy iść, gdy napotkamy trudności w jednocześnie kwantowym i relatywistycznym opisie zjawisk.

W odróżnieniu od teorii względności, której interpretacja fizyczna jest spójnie i jednoznacznie związana z jej aparatem matematycznym, interpretacja mechaniki kwantowej nie wynika z niej samej i jest nałożona na nią w pewnym sensie arbitralnie. Oprócz najpowszechniej znanej tzw. ortodoksyjnej kopenhaskiej interpretacji mechaniki kwantowej (którą wielu fizyków uważa za jedynie słuszną, a nawet za jedynie możliwą), istnieje wiele innych, w tym interpretacja zespołowa oraz wieloświatowa interpretacja Everetta. (Niedawno spotkałem się nawet z poglądem, że nic takiego jak ortodoksyjna interpretacja kopenhaska nie istnieje, bowiem jej czołowi przedstawiciele, Bohr, Dirac i Heisenberg różnili się w wielu istotnych punktach, a to, co podaje się pod tą nazwą w podręcznikach, to jedynie część wspólna ich poglądów). Interpretacje te różnią się w kwestiach fundamentalnych: co to jest stan kwantowy (funkcja falowa) i jego redukcja, co to jest pomiar kwantowy. Eksperymentalnie są nierozróżnialne: każde doświadczenie daje się opisać w ich terminach. Po kilkudziesięciu latach bezowocnych poszukiwań eksperymentu myślowego, który by jakąś istniejącą interpretację wyróżnił lub wyeliminował albo zasugerował sformułowanie nowej, niektórzy badacze zdecydowali się na krok radykalny. W latach dziewięćdziesiątych pojawiła się idea, by mechanikę kwantową sformułować na nowo na bazie uproszczonej wersji kwantowej teorii grawitacji, czyli kwantowej kosmologii. Sam pomysł, że wielki Wszechświat jest obiektem kwantowym, a tym bardziej, że jego opis jest nadrzędny w stosunku do zwykłej mechaniki kwantowej atomów, wielu wydaje się absurdalnym, lecz była to śmiała próba wydobycia się z zamkniętego kręgu niemożności. Niestety i ona okazała się fiaskiem.

Twierdzą, że wszelkie problemy mechaniki kwantowej, w tym wynikające na styku zjawisk dla stanów splątanych i relatywistycznych, należy rozwiązywać rozwijając

tę teorię przy założeniu, że teoria względności dostarcza jej ustalonej sceny, na której rozgrywają się te zjawiska.

2. Co to jest teoria względności?

Charakterystyczne, że w obu wspomnianych artykułach nie jest powiedziane czym właściwie jest szczególna teoria względności (STW). Bez rozstrzygnięcia tego trudno jest ustalić, czy mechanika kwantowa może wymusić istotne jej modyfikacje. Standardowa odpowiedź, że STW jest tym, co pod tą nazwą jest wykładane w podręcznikach, najczęściej elektrodynamiki klasycznej, jest niezadowolająca. Z oczywistych powodów STW powstała i rozwinęła się przy badaniu zjawisk elektromagnetycznych, lecz daleko wykracza poza nie i nie należy jej mieszać z ich teorią.

STW jest zbiorem fizycznie zinterpretowanych twierdzeń geometrii Minkowskiego. Fundamentalnym aksjomatem STW jest, że matematycznym modelem fizycznej czasoprzestrzeni jest afiniczna przestrzeń Minkowskiego. Jest to szczególnie rodzaj przestrzeni metrycznej, czyli takiej, w której dowolnym dwu punktom (zwanym w tym przypadku punktami chwilami lub zdarzeniami) możemy przypisać ich odległość. Jeżeli w pewnym wyróżnionym układzie współrzędnych, fizycznie interpretowanym jako inercjalny układ odniesienia (IUO), współrzędne przestrzenne i czasowe dwu zdarzeń różnią się o Δx , Δy , Δz i Δt , to zdarzenia te dzieli odległość, zwana interwałem czasoprzestrzennym Δs , którego kwadrat jest równy

$$(\Delta s)^2 = (\Delta x)^2 + (\Delta y)^2 + (\Delta z)^2 - c^2(\Delta t)^2, \quad (1)$$

gdzie c jest pewną stałą przyrody o wymiarze prędkości, zwykle identyfikowaną z prędkością propagacji w próżni niektórych oddziaływań fundamentalnych, przede wszystkim elektromagnetycznych. Przestrzeń Minkowskiego różni się od czterowymiarowej przestrzeni euklidesowej tym, że współrzędna czasowa jest wyróżniona: wyraz $c^2(\Delta t)^2$ pojawia się ze znakiem ujemnym, więc kwadrat interwału może być dodatni, ujemny oraz zerować się dla różnych zdarzeń. Obie przestrzenie mają tę samą topologię, co oznacza, że np. w dwu wymiarach przedstawia je nieskończona płaszczyzna, która w żadnym kierunku nie związa się w walec.

Aby wprowadzić samo pojęcie fizycznej czasoprzestrzeni, a następnie przypisać jej jakąś geometrię (Minkowskiego lub inną), należy pewne relacje pomiędzy obiektami materialnymi zinterpretować geometrycznie. Jest to procedura skomplikowana i subtelna, nigdzie nie widziałem jej matematycznie ścisłego sformułowania. W sposób mniej ścisły opisał ją parokrotnie Einstein. Pojęciem pierwotnym, niedefiniowanym, są zdarzenia elementarne, które modelujemy punktami geometrycznymi. Ogół faktów empirycznych wskazuje, że istnieją ciała materialne, którym można nie przypisywać rozciągłości oraz zachodzące z ich udziałem praktycznie momentalne zjawiska; uważamy je za zdarzenia elementarne. Chwilowe położenie planety (którą widzimy jako kropkę na niebie)

na jej orbicie wokół Słońca oraz zderzenie dwu cząstek elementarnych są sztandarowymi przykładami. Droga abstrahowania z danych empirycznych dochodzimy do pojęcia punktu materialnego (cząstki punktowej), którego cała historia, czyli zbiór wszystkich dotyczących go zdarzeń, jest zbiorem zdarzeń elementarnych tworzących w czasoprzestrzeni jednowymiarową trajektorię zwaną linią świata. Należy podkreślić, że ta identyfikacja zdarzeń elementarnych w zbiorze wszystkich zdarzeń ma charakter czysto empiryczny (fenomenologiczny) i nie odwołuje się do żadnej teorii fizycznej. Nasz opis zjawisk opiera się na założeniu, że wszystkie procesy fizyczne rozgrywają się w czasoprzestrzeni, zatem każda teoria fizyczna musi z góry założyć istnienie pewnej czasoprzestrzeni (absolutnej lub dynamicznej, jak w ogólnej teorii względności) jako areny zjawisk, a nie poprzedzać jej wprowadzenie. W tym sensie zdarzenie elementarne może składać się ze skomplikowanych procesów z punktu widzenia fizyki oddziaływań fundamentalnych: pojedyncze jądro atomowe i całą planetę traktujemy w wielu praktycznie ważnych sytuacjach jak cząstkę punktową. Dokonując abstrahowania w innym kierunku identyfikujemy jako zdarzenie elementarne miejsce, w którym nic nie ma i nic się nie dzieje.

Przypisanie czysto abstrakcyjnej przestrzeni matematycznej jakiejś geometrii polega na arbitralnym nadaniu jej szeregu własności: topologicznych, liniowych lub struktury różniczkowej, na końcu nadajemy jej metrykę lub grupę transformacji niezmienniczych. W fizyce postępujemy inaczej, z tym, że w efekcie końcowym musimy dojść do tworu, który jednoznacznie da się modelować pewną przestrzenią matematyczną. Punktem wyjścia jest przypisanie zdarzeniom (punktom) współrzędnych przestrzennych i czasowych, czyli skonstruowanie fizycznego układu odniesienia. Konstrukcja ta opiera się na dwu założeniach będących uogólnieniem faktów empirycznych. Po pierwsze, istnieją rozciągłe ciała materialne, zwane *prętami sztywnymi*, które zachowują swój kształt i inne własności w czasie i które nie oddziałują między sobą, jeżeli nie są w bezpośrednim kontakcie. Ze zbioru takich cienkich prętów, które nie przemieszczają się względem siebie, budujemy nieskończoną sześcienną kratownicę, gęsto wypełniającą całą przestrzeń (pojmowaną tutaj czysto intuicyjnie jako szczególny podzbiór czasoprzestrzeni). Za jej pomocą każdemu zdarzeniu elementarnemu przypisujemy współrzędne przestrzenne równe trzem liczbom numerującym najbliższy węzeł kratownicy.

Po drugie, zakładamy, że istnieją dobre zegary. Taki zegar mierzy czas zliczając okresy zjawiska cyklicznego ściśle periodycznego, czyli takiego, którego okres jest stały w czasie. Fundamentalnym faktem empirycznym jest istnienie wielu całkowicie odmiennych fizycznie zjawisk ściśle periodycznych (wirująca Ziemia i pulsary, ruch orbitalny Ziemi, zegary wahadłowe, sprężynowe, kwarcowe i atomowe), oczywiście z pewną dokładnością. Ścisłą periodyczność wykrywamy porównując różne procesy cykliczne; gdyby w przyrodzie istniał tylko jeden proces cykliczny, to ustalenie, czy jego okres jest stały, byłoby niemożliwe i byłoby to kwestią konwencji. Składową tego

założenia jest też, że zegary mogą być małe, w granicy – punktowe.

Zegary umieszczamy we wszystkich węzłach sieci. Nie zakładamy tu żadnej synchronizacji, wymagamy jedynie, by wskazania pobliskich zegarów zmieniały się w sposób ciągły. W ten sposób każde zdarzenie ma 4 współrzędne. Takich fizycznych układów odniesienia można skonstruować nieskończenie wiele; dla prostoty zakładamy, że dwa różne układy poruszają się względem siebie i ruch ten może być dowolny. W każdym układzie każdy pręt i zegar jest nieruchomy względem wszystkich pozostałych.

Mając układy odniesienia można ustalić geometrię czasoprzestrzeni metodami geometrii różniczkowej stosowanymi w ogólnej teorii względności (OTW), bowiem STW jest szczególnym przypadkiem OTW. Jest to fakt o zasadniczej doniosłości dla rozumienia samej STW, ale dla naszego celu użycie aparatu geometrii Riemanna nie jest konieczne. Odwołamy się do faktu, który leży u samych podstaw fizyki: w zbiorze wszystkich układów odniesienia istnieje wyróżniona klasa układów inercjalnych. Gdy zidentyfikujemy jeden IUO, to każdy inny układ poruszający się jednostajnie i prostoliniowo względem niego też jest inercjalny.

Określenie ruchu jednostajnego (stała prędkość) wymaga synchronizacji zegarów. Można jej dokonać w klasie układów szerszej niż inercjalne, lecz dla nich jest szczególnie prosta. W IUO wszystkie zegary idą w tym samym tempie, zatem ich synchronizacja definiuje w czasoprzestrzeni trójwymiarową hiperpłaszczyznę zdarzeń równoczesnych, którą tradycyjnie nazywamy przestrzenią fizyczną w danej chwili.

Następny postulat, również bardzo dobrze potwierdzony doświadczalnie, zwany *zasadą względności Galileusza–Einsteina*, głosi, iż w klasie IUO nie da się wybrać podklasy układów, które byłyby dodatkowo wyróżnione fizycznie. Wszystkie IUO są dokładnie równorzędne fizycznie i prawa fizyki (za wyjątkiem tych, które ze swej natury wyróżniają pewien układ, jak np. termodynamika) winny mieć tę samą postać matematyczną w każdym z nich. W szczególności prawa mechaniki kwantowej muszą być takie same we wszystkich IUO.

Ostatni postulat służy do rozróżnienia pomiędzy klasyczną fizyką nierelatywistyczną a STW. Można mu nadać różną treść fizyczną; najwygodniej postulatem tym uczynić fakt empiryczny, iż istnieje prędkość oddziaływań fundamentalnych, która jest stałą przyrody. Wynika z niego, że interwał czasoprzestrzenny (1) jest niezmiennikiem transformacji między różnymi IUO, czyli ma sens odległości geometrycznej, a zachowującymi go transformacjami są transformacje Lorentza. Fizyczna czasoprzestrzeń ma strukturę przestrzeni Minkowskiego. Widać też, że układy inercjalne odgrywają w fizycznej czasoprzestrzeni tę samą rolę co kartezjańskie układy współrzędnych w przestrzeni euklidesowej.

Z geometrii tej wynika, że czas mierzony przez punktowy zegar, zwany jego *czasem własnym*, ma prosty sens geometryczny: jest równy długości jego linii świata.

Dla ruchu jednostajnego prostoliniowego jest to oczywiście. Wątpliwości pojawiają się przy ruchu przyspieszonym: długość dowolnej krzywej gładkiej jest z definicji aproksymowana długością linii prostej łamanej, zatem dobry zegar musi być nieczuły na dowolnie duże przyspieszenia. Twierdzenie to, zwane *clock hypothesis*, powoduje nieustające spory. Jest jasne, że nie każdy zegar je spełnia. Poprawna wersja hipotezy o zegarach brzmi²:

dla każdego przyspieszenia (w układzie własnym) istnieje taki ściśle periodyczny proces, że zegar na nim oparty nie doznaje żadnych zakłóceń, tzn. idzie jak w ruchu jednostajnym prostoliniowym i mierzy czas będący długością jego linii świata.

Ważne jest, że najlepszego potwierdzenia tej hipotezy dostarczają zjawiska kwantowe. Dla przykładu, w eksperymencie wykonanym w CERN-ie [1] relatywistyczne miony krążyły po okręgu o promieniu $R = 2,5$ m i miały czynnik Lorentza $\gamma = 12,1$. Ich czas życia był dokładnie γ razy większy niż czas życia w spoczynku, czyli był taki, jakby poruszały się bez przyspieszenia. Ich przyspieszenie odśrodkowe mierzone w układzie LAB było $a \approx c^2/R \approx 3,6 \cdot 10^{16} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 3,6 \cdot 10^{15} g$. Wewnętrzny zegar kwantowy mionów, odpowiedzialny za ich rozpady, jest zupełnie niewrażliwy na przyspieszenia, które zniszczyłyby każdy znany nam zegar atomowy.

Dla STW istotne jest pytanie, czy istnieje graniczne przyspieszenie, powyżej którego każdy proces periodyczny ulega zakłóceniu. Ewentualnego kandydata daje tzw. skala jednostek naturalnych Plancka, w której definiuje się przyspieszenie Plancka

$$a_p = \frac{c}{t_p} = \left(\frac{c^7}{\hbar G} \right)^{1/2} = 5,57 \cdot 10^{51} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 5,68 \cdot 10^{50} g,$$

gdzie $t_p = 5,39 \cdot 10^{-44}$ s jest czasem Plancka. Powszechnie wierzy się, że te jednostki skali Plancka, które zawierają stałą Newtona G , odnoszą się do hipotetycznych zjawisk kwantowej grawitacji, w których nie istnieje klasyczna czasoprzestrzeń. Ani mechanika kwantowa, ani inna znana nam fizyka niegrawitacyjna nie sugerują żadnej granicy, powyżej której hipoteza o zegarach przestaje być prawdziwa.

Ostatnio fizyk z Uniwersytetu Jagiellońskiego, Andrzej Staruszkiewicz, podał bardzo interesujący model w pełni relatywistycznego rotatora [2] i wysunął hipotezę, że może on służyć jako zegar mierzący czas różny od jego czasu własnego. W moim przekonaniu, gdyby hipoteza ta okazała się prawdziwa, byłaby największym wyzwaniem dla STW w ciągu stu lat jej istnienia. Po wykonaniu skomplikowanych obliczeń okazało się [3], że ruch tego rotatora jest indeterministyczny, zatem nie może on działać jak zegar i STW uniknęła modyfikacji.

W sumie, właściwa STW składa się z tych twierdzeń geometrii Minkowskiego, które dają się zinterpretować fizycznie. Czasoprzestrzeń Minkowskiego tworzy ustaloną („absolutną”) scenę, na której rozgrywają się dramaty wszystkich procesów fizycznych. Procesy te mogą

być dowolne, byleby zmieściły się na tej scenie. One muszą się do niej dopasować, ona do nich – nie. Tak jak nie musimy sprawdzać eksperymentalnie, że ciała materialne podlegają twierdzeniom geometrii Euklidesa, gdy inne doświadczenia wykazały, iż przestrzeń wokół nas jest z dużą dokładnością euklidesowa, tak nie trzeba testować wszystkich twierdzeń STW. Nie znaczy to, że STW nie ma granic stosowalności. Jedną granicę wskazał ponad 90 lat temu Einstein: w obecności oddziaływań grawitacyjnych czasoprzestrzeń staje się obiektem dynamicznym i tylko w małych obszarach daje się przybliżać przestrzenią Minkowskiego. Relacja między nimi jest dokładnie taka, jak między powierzchnią zakrzywioną i płaszczyzną do niej styczną. Drugiej granicy, jak dotąd całkowicie spekulatywnej, dostarcza koncepcja kwantowej grawitacji: na odległościach mniejszych niż $l_p = 10^{-33}$ cm znika klasyczna czasoprzestrzeń OTW i zastępuje ją coś nieznanego, radykalnie odmiennego. Pomiędzy tymi granicami (ściślej biorąc, dla odległości większych od rozmiarów jądra atomowego) STW jest dobrze potwierdzona i prawdopodobieństwo, że odkryjemy coś nieoczekiwanego jest znikome.

3. Twierdzenia towarzyszące STW

Od samego jej powstania korpusowi właściwej STW towarzyszą twierdzenia niegeometryczne, powszechnie wliczane w jej obręb, a czasami uważane za jej fundament. Ich status jest odmienny: dotyczą pewnych własności materii i są prawdziwe lub nie, w każdym razie ich prawdziwości nie można rozstrzygnąć w ramach właściwej STW. Wymieńmy trzy najważniejsze.

1. Zasada przyczynowości Einsteina: „prędkość światła jest maksymalną prędkością przenoszenia energii w przyrodzie i żaden ruch fizyczny nie może być szybszy; w szczególności nie istnieją tachiony”.

Jest to zasada dynamiczna dotycząca oddziaływań. W kwantowej teorii pola używa się warunku, który wygląda jak matematycznie ściśle sformułowanie tej zasady: operatory pola komutują, gdy brane są w punktach połączonych wektorem przestrzennopodobnym. Warunek ten jest podstawą Modelu Standardowego cząstek elementarnych, jest więc słuszny w obrębie zjawisk opisanych tym modelem. Natomiast jego interpretacja za pomocą zasady Einsteina nie jest ogólnie słuszna. Jest ona słuszna w przypadku pola elektromagnetycznego, klasycznego i kwantowego, które jest mierzalne w pojedynczym punkcie czasoprzestrzeni: przemienność operatorów oznacza, że pole w punkcie x nie ma wpływu na wartość pola w y , jeżeli czterowektor $y - x$ jest przestrzennopodobny, z czego wynika, że pole to propaguje się z prędkością nie przekraczającą c . Jest niesłuszna w przypadku pól kwantowych niemierzalnych, takich jak pole elektronowe (Diraca), dla których fizyczna prędkość propagacji nie jest dobrze określona. Warunek komutowania operatorów pola dla przestrzennopodobnego wektora $y - x$ jest uzasadniany tym, że zapewnia on niezmienniczość lorentzowską macierzy rozpraszania S , bez odwoływania się do przyczynowości [4].

²Nazwa „hipoteza” jest tu nietrafna, bowiem faktycznie jest to twierdzenie empiryczne.

Właściwa STW postuluje jedynie niezmienniczość równań ruchu materii (klasycznej i kwantowej) względem transformacji Poincarégo, co nie ogranicza prędkości transportu energii. Przynajmniej dla pól klasycznych energia może a priori przenosić się z prędkością nadświatłą. Przykładem jest elektrodynamika Borna–Infelda, w której pole podobne do elektromagnetycznego spełnia nieliniowe równania ruchu i ma prędkość większą od c .

Rozważmy ruchy jednowymiarowe, by ustalić, co STW mówi o ich prędkościach. Niech w układzie inercjalnym S' obiekt fizyczny ma prędkość v' , wówczas w układzie S poruszającym się względem S' z prędkością $-V$ ma on prędkość

$$v = \frac{v' + V}{1 + (1/c^2)Vv'}. \quad (2)$$

Z transformacji Lorentza wynika, że $|V| < c$, a z (2) wiadać, że v i v' są jednocześnie albo mniejsze od c , albo większe od c , albo równe c . Prędkość światła jest granicą nieprzekraczalną z dołu i z góry. Hipotetyczne tachiony poruszają się zatem w każdym układzie z $v > c$, co oznacza, że ich czterowektor pędu jest przestrzennopodobny i mają ujemny kwadrat masy. Istnieją więc IUO, w których tachion biegnie wstecz w czasie. Uważa się, że prowadzi to do sprzeczności z przyczynowością: wysłanym w przeszłość tachionem można uśmiercić własnego dziadka, gdy był małym dzieckiem.

Roger Penrose podał prosty czysto logiczny dowód niemożliwości istnienia tachionów [5]. Dowód jest niezwykle sugestywny, jednak Andrzej Staruszkiewicz wskazał w nim istotną lukę. Penrose przyjmuje za oczywiste, że gdyby tachiony istniały, to możliwe byłoby zbudowanie ze zwykłej materii urządzenia, które mogłoby je emitować i absorbować podobnie jak elektrony i fotony. Tego nie można zakładać. W fizyce należy podać konkretny model dynamiki oddziaływań tachionów ze zwykłą materią i w jego ramach sprawdzać, czy nie prowadzi do sprzeczności wewnętrznych lub z innymi prawami fizyki. Jedyne, co Penrose dowiódł, to to, że tachiony nie mogą oddziaływać ze zwykłą materią tak, jak ona oddziałuje ze sobą. Być może tachiony oddziałują z materią w radykalnie inny sposób, a może w ogóle z nią nie oddziałują. W tym ostatnim przypadku dawałyby znać o swoim istnieniu tylko pośrednio, poprzez swoje pole grawitacyjne, co jednak nie usuwałoby wszystkich kłopotów, bowiem OTW „nie lubi” tachionów.

2. Niemożliwe jest istnienie ciał doskonale sztywnych.

3. Cząstki elementarne (obiekty, które we wszystkich oddziaływaniach biorą udział jako całość i nie można wyróżnić w nich części składowych) muszą być punktowe.

Oba twierdzenia podaje i dowodzi w swoim podręczniku Landau [6], oba dotyczą dynamiki. Ciała rozciągnięte doskonale sztywne zapewne nie istnieją, lecz jego dowód

oparty na tezie, że STW wyklucza nieskończoną prędkość oddziaływania w takim ciele (w jego układzie spoczynkowym) jest nieprzekonujący. To jest kwestia modelu oddziaływań. Z kolei wywiedziona stąd teza, że obiekt elementarny musi być punktowy, bo inaczej byłby doskonale sztywny, jest fałszywa. W OTW obiektem elementarnym są czarne dziury. W czasoprzestrzeni Minkowskiego hipotetycznymi obiektami elementarnymi mogą być jednowymiarowe struny.

4. Teoria względności a mechanika kwantowa

Czytelnik zorientował się już, że STW zarówno w swoim rozwoju historycznym jak i w przedstawionej schematycznie powyżej rekonstrukcji logicznej bazuje na pojęciu materii złożonej z ciał klasycznych. Samo pojęcie czasoprzestrzeni jako zbioru punktów wymaga w swej konstrukcji istnienia specyficznych ciał rozciągniętych. Każde takie ciało zajmuje określony obszar przestrzeni i wszędzie indziej go nie ma, nie wywiera również na całą niezajętą przez siebie przestrzeń zauważalnego wpływu. Klasyczne ciała mają też różne, niezmiennie w czasie, kształty i rozmiary, dzięki czemu w granicy otrzymujemy pojęcie ciała punktowego, a stąd punktu geometrycznego. Dalej, układ odniesienia budujemy z ciał praktycznie sztywnych, nie mogą one puchnąć lub kurczyć się, ani w żadnym stopniu być „rozmyte” w przestrzeni³. Następnie, o ile mechanizm zegarowy jest na ogół kwantowy, jak w zegarach atomowych, to sam zegar musi być dobrze zlokalizowany przestrzennie. W przeciwnym razie nie moglibyśmy zweryfikować zasadniczej tezy STW, iż zegary mierzą długość swoich linii świata. Aby zmierzyć prędkość propagacji pola elektromagnetycznego i innych pól lokalnie mierzalnych, muszą istnieć sygnały zlokalizowane przestrzennie, tzn. w pewnych warunkach musi stosować się przybliżenie optyki geometrycznej. Inaczej stała przyrody c byłaby nam niedostępna. Niczego z tego nie zdołalibyśmy zrealizować, gdybyśmy mieli do dyspozycji jedynie cząstki kwantowe w stanie własnym pędu, czyli opisane falą płaską.

Wszelka materia ma naturę kwantową i ciała ściśle klasyczne nie istnieją. Zarazem oprócz stanów kwantowych, w których cząstka „jest gdziekolwiek” (fale płaskie), istnieją stany prawie klasyczne, w których duże agregaty materii zachowują się jak ciała klasyczne. I te stany są kluczowe operacyjnie i konceptualnie dla fizyki. Kopenhaska interpretacja mechaniki kwantowej i każda inna musi w ten czy inny sposób wprowadzić fundamentalny dualizm: z jednej strony istnieje obiekt kwantowy, a z drugiej – klasyczny przyrząd, który wykonuje na nim pomiar i klasyczny obserwator interpretujący wynik pomiaru. Porażka kwantowej kosmologii wzięła się głównie stąd, że w kwantowym wszechświecie tego dualizmu nie ma i nie ma czym go sensownie zastąpić.

³Większość tych warunków nie jest spełniona w silnym i zmiennym polu grawitacyjnym. W OTW konstrukcja układu odniesienia jest bardziej skomplikowana i zawsze odwołuje się, jawnie lub implicite, poprzez zasadę równoważności, do układu lokalnie geodezyjnego („spadającej windy”). Nie jest mi znany żaden przepis budowania układu odniesienia, np. współporuszającego się (synchronicznego), który konsekwentnie zrezygnowałby z posługiwania się lokalnie obowiązującą fizyką klasyczną w STW.

Fizyka czysto kwantowa nieoparta na pochodnym wobec niej tle klasycznym nie istnieje i nic nie wskazuje, by w przyszłości miała powstać. Czasoprzestrzeń jest dla fizyki kwantowej tłem najbardziej elementarnym. Naturalną dziedziną zjawisk relatywistycznych jest fizyka cząstek elementarnych, zatem świat obiektów kwantowych najmocniej potwierdza, że dla niego tłem jest STW.

Zatem, czy nieznanne nam jeszcze zjawiska kwantowe opisane stanami splątanymi mogą wnieść coś istotnie nowego do STW? W zakresie odległości i energii, w którym relatywistyczne fotony, leptony i hadrony będące w stanach bliskich klasycznemu, w tysięcznych eksperymentach akceleratorowych dobrze potwierdziły geometrię Minkowskiego, możliwość taką należy wykluczyć. Eksperymenty te wskazują nam, że świat kwantowy jednoznacznie implikuje STW, a z drugiej strony relatywistyczny opis procesów kwantowych napotyka rozmaite trudności, z których tylko część bierze się ze stanów splątanych. Wynika stąd, że nie rozumiemy do końca mechaniki kwantowej, że pewne elementy pojęciowe świata kwantowego wciąż się nam wymykają.

Zdumiewając się efektami stanów splątanych warto wziąć pod uwagę inną kwestię. Fundamentalnym założeniem fizyki, odróżniającym ją np. od medycyny, jest, że zawsze możemy podzielić świat na interesujący nas obiekt i resztę, przy czym wpływ reszty świata na ten obiekt jest w pełni pod naszą kontrolą. W szczególności możemy ten obiekt całkowicie odizolować i uczynić swobodnym. Rozważmy rozpraszanie dwu cząstek. Cząstki nadlatują z nieskończoności, zderzają się i ponownie rozbiegają. Oddziaływanie między nimi daje zauważalne efekty tylko wtedy, gdy są dostatecznie blisko siebie. Gdy oddalą się, stają się ponownie swobodne i pomijając wielkości zachowywane, takie jak energia i pęd, ich stany wewnętrzne są niezależne. Tak jest dla cząstek klasycznych. Oddziałujące cząstki kwantowe tworzą stan splątany i niezależnie od tego, jak bardzo się potem oddalą, pozostają sprzężone, więc nigdy nie staną się niezależne i swobodne. Wykonując eksperymenty na jednej z nich w żaden sposób nie ustalimy, czy jest w jednocząstkowym stanie swobodnym, czy też w stanie splątanym z innymi. Stan kwantowy cząstki jest zawsze określony przez całą jej historię, zatem jest ona sprzężona ze sporą częścią Wszechświata. Czy istnieją w ogóle cząstki swobodne, czy taką cząstkę można wytworzyć eksperymentalnie? Czy też wszystkie cząstki elementarne są ze sobą splątane od Wielkiego Wybuchu, a my dopiero teraz zaczynamy zauważać splątanie między niektórymi z nich?

Nasuwa się tu pewna analogia. Operacyjne określenie inercjalnego układu odniesienia napotyka zasadnicze trudności w obecności oddziaływań grawitacyjnych, bowiem pola grawitacyjnego nie da się ekranować. Zamiast próbować obejść te trudności jakimiś trickami, Einstein uznał nieistnienie IUO za fundamentalny fakt fizyki grawitacyjnej i opracował OTW.

W mechanice kwantowej jest jeszcze wiele do zrobienia.

5. O sposobach przekonywania oponentów i szerszej publiczności

Na zakończenie mam komentarz o dyskutowaniu o mechanice kwantowej. Prof. Andrzej Staruszkiewicz lubi powtarzać, że gdy dwu fizyków dyskutuje o fizyce i nie mogą dojść do porozumienia, to żaden z nich nie rozumie o co chodzi. Gdyby bowiem jeden z nich prawidłowo rozumiał problem, to potrafiłby poprawnie przedstawić go drugiemu, a ten zrozumiałby argument i zgodził się. Innymi słowy, istnieje prawda obiektywna, jest poznawalna i intersubiektywnie komunikowalna. (W tym tkwi zasadnicza odmienność nauk ścisłych od humanistycznych. Dla humanisty pogląd ten jest skrajnym przejawem totalitaryzmu w myśleniu).

Einstein stale powtarzał, że mechanika kwantowa dobrze przewiduje wyniki eksperymentów, lecz nie daje mu głębokiego zrozumienia fizycznej rzeczywistości, jaki ma w elektrodynamice, teorii względności czy termodynamice. Tylko raz zdołał skonkretyzować swoje zarzuty: w 1935 r. sformułował paradoks EPR. Bohr odpowiedział mu szybko, co wywołało wrażenie, iż pisał na kolanach. Z dzisiejszej perspektywy Bohr zrobił mały krok w właściwym kierunku. Nie przewidział eksperymentu z 1998 r., który podważył wnioski wyciągnięte przez Einsteina z paradoksu EPR, a przede wszystkim nie dysponował aparatem pojęciowym, który powstał pół wieku później. Pisał więc filozoficznie. Dla kogoś, kto chciał dowiedzieć się jak jest naprawdę, nie było to – bo nie mogło być – przekonujące; wystarczało za to komuś, kto chciał się upewnić, że wszystko jest w porządku. Większość fizyków, entuzjastów nowej fizyki, wraz z czołowymi autorytetami tamtej epoki, była usatysfakcjonowana. Filozoficznie Bohr „dał odpór” Einsteinowi, a w samej fizyce problemu nie ma, bo mechanika kwantowa działa dobrze. Sprawa zamknięta. Ten czysty pragmatyzm nasilił się w następnych latach wraz z powstaniem elektrodynamiki kwantowej i uprawianiem „modelarstwa” w fizyce wysokich energii. Teoria kwantów służyła do wyliczania wyników doświadczeń, „filozofowanie” było źle widziane. W 1938 r. Einstein, bez cienia żalu, powiedział Infeldowi: „Tu w Princeton uważają mnie za starego durnia”. Nie tylko w Princeton.

Znamienne, że gdy przed 40 laty studiowałem mechanikę kwantową, to ogromna większość ówczesnych podręczników w ogóle nie wspominała o paradoksie EPR. To, że w ten sposób postponowano Einsteina, było zrozumiałe. To, że w równym stopniu postponowano Bohra, było zaskakujące. Nieliczne podręczniki, które o sprawie pisały, jak np. Błochincewa, po prostu powtarzały sformułowania Bohra. Nie sposób było dowiedzieć się coś więcej. Sporo było na ten temat w literaturze popularnonaukowej i z niej dowiadaliśmy się o tej kontrowersji, ale oczywiście żadnych wyjaśnień tam nie było, bo autorzy też problemu nie rozumieli. Dyskutowaliśmy więc intensywnie w kręgu rówieśników i starszych kolegów w nadziei wypracowania wspólnie zadowalającego zrozumienia teorii. Echa tych dysput dotarły wysoko, gdyż jeden

z czołowych fizyków teoretyków udzielił młodzieży publicznie ostrzeżenia: „Nie rozumiesz mechaniki kwantowej? To twój problem. I nie ujawniaj tego, bo ci to zaszkodzi w karierze”.

Klimat zaczął się powoli zmieniać w latach siedemdziesiątych. W 1981 r. Aspect wykonał słynne doświadczenia. Wymagały one nowych wyrafinowanych technik eksperymentalnych, ale nawet gdyby techniki te były dostępne 20 lat wcześniej, to nie zrobiłby wtedy swoich pomiarów, bo zakrzyczano by go, że zajmuje się głupstwami. W następnym ćwierćwieczu postęp był wyraźny, coraz więcej wiemy i rozumiemy, wiemy też, że pewnych rzeczy nie rozumiemy. Powinien więc nadejść już czas bardziej merytorycznej dyskusji. Niestety, jak przed laty, emocje nadal dominują, czego dobitnym przykładem są oba artykuły w *Świecie Nauki*.

Najpierw D. Albert zaatakował Bohra odczytując powierzchniowo jego odpowiedź Einsteinowi. Zarzucił mu posługiwanie się językiem filozoficznym nie rozumiejąc, że ten nie miał wyboru, jeśli chciał cokolwiek odpowiedzieć. Z odsieczą ruszył prof. Żukowski, jednak zamiast wytknąć Albertowi błędy i uproszczenia, zaatakował drugiego Alberta – Einsteina. Ten bowiem, stwierdziwszy w eksperymencie myślowym EPR obecność tego, co nazwał elementem fizycznej rzeczywistości, a czego nie przewidywała mechanika kwantowa, uznał, że coś jest na rzeczy, czyli że teoria ta jest niekompletna. A powinien był skromnie przyjąć, że odkrycie to jest przypadkiem bez znaczenia, bowiem odpowiednio bardziej skomplikowany eksperyment elementy te wyeliminuje jako wzajemnie sprzeczne. Żukowski przyznaje wprawdzie, że inny, bardziej od EPR złożony eksperyment też jest po myśli Einsteina („Cóż za radość dla Einsteina i spółki: ileż tu elementów fizycznej rzeczywistości!”), lecz przecież już w 50 lat po pracy EPR badacze tacy jak Greenberger, Horne, Zeilinger i sam Żukowski wykazali, że w ogólności elementy fizycznej rzeczywistości są sprzeczne z mechaniką kwantową, a wykonany 10 lat później eksperyment

poparł tę teorię przeciwko Einsteinowi. Dlaczego Einstein nie domyślił się, że już za 60 lat okaże się, iż był w błędzie? Przecież „Gdyby EPR znali wyniki GHZ lub nierówności Bella, to ich praca by nie powstała, a gdyby nawet ją napisali, to na pewno zostałaby odrzucona przez recenzentów”. (Myśl niejasna, w każdym razie gdyby Einstein żył jeszcze 40 lat i skorzystał z szansy, by zrobić naukowy przekręt, to nie udało by mu się). W sumie, „Einstein, Podolsky i Rosen zbyt szybko wyciągnęli wnioski z rozważań opartych tylko na jednym przykładzie dwucząstkowego stanu splątanego (tzw. stan EPR), w którym te sprzeczności [między elementami rzeczywistości fizycznej] bardzo trudno ujawnić”. Jeżeli Czytelnik pomyślał, że ostatnia część tego zdania wyraża okoliczność łagodzącą, to się myli. „Einstein i jego współpracownicy postąpili jak inżynierowie dopuszczający do startu wahadłowce: skoro odrywająca się pianka izolacyjna do dziś nie spowodowała katastrofy, to nie wywoła jej także w przyszłości”. Na szczęście nikt przez Einsteina życia nie postradał.

Niezamierzony komizm tej iście kawaleryjskiej szarży na Einsteina polega na tym, że podobny zarzut można postawić Bohrowi. Przecież mógł w 1935 r. odpowiedzieć krótko Einsteinowi: „jedna jaskółka wiosny nie czyni, a oczami duszy widzę, że za 60 lat wyjdzie na moje”.

Co jest w mechanice kwantowej, że tak rozpala ludzi?

Literatura

- [1] F. Farley, J. Bailey, E. Picasso, *Nature* **217**, 17 (1968).
- [2] A. Staruszkiewicz, *Acta Phys. Polon. B Proc. Suppl.* **1**, 109 (2008).
- [3] Ł. Bratek, preprint arXiv:0902.4189.
- [4] S. Weinberg, *The Quantum Theory of Fields, Vol. 1 Foundations* (Cambridge Univ. Press, Cambridge 1995), par. 5.1.
- [5] R. Penrose, *Nowy umysł cesarza* (Wyd. Nauk. PWN, Warszawa 1995), s. 240–42.
- [6] L. Landau E. Lifszyc, *Teoria pola* (PWN, Warszawa 1977), par. 15.

Upiorne oddziaływanie na odległość

Tadeusz Pabjan

Centrum Kopernika Badań Interdyscyplinarnych, Kraków

Spooky action at a distance

Abstract: One of the most extraordinary features of quantum objects is their nonlocality, which is also described by such terms as nonseparability or quantum entanglement. This feature means that quantum objects do not seem to possess any spatiotemporal localization and, regardless of their remoteness, they act as they were single indivisible entities, in which the information between the particular constituents of the system is transmitted immediately. The primary purpose of the paper is to bring closer and to explain this notion – especially in the historical context of the dispute about interpretation of quantum mechanics as well as of the Bell theorem of 1964.

Jedną z najbardziej niezwykłych własności obiektów kwantowych jest ich nielokalność, określana również mianem nieseparowalności lub splątania kwantowego. Własność ta decyduje o tym, że obiekty kwantowe wydają się nie posiadać czasoprzestrzennej lokalizacji i niezależnie od dzielących je odległości, zachowują się tak, jak gdyby stanowiły jedną niepodzielną całość, w której informacja pomiędzy poszczególnymi elementami układu przekazywana jest w sposób natychmiastowy. Podstawowym celem artykułu jest przybliżenie i wyjaśnienie tego pojęcia – przede wszystkim w historycznym kontekście sporu o interpretację mechaniki kwantowej oraz twierdzenia Bella z roku 1964.

Jednym z filarów fizyki klasycznej jest zasada lokalności (lokalnej przyczynowości), zgodnie z którą oddzielone przestrzennie obiekty nie mogą oddziaływać na siebie inaczej, jak tylko za pośrednictwem innych obiektów lub pola, będącego przekaźnikiem sygnału fizycznego. Natychmiastowe i bezpośrednie oddziaływanie możliwe jest tylko wtedy, gdy obiekty są w tym samym punkcie przestrzeni¹, w każdym zaś innym przypadku sygnał fizyczny – nawet jeśli porusza się z maksymalną możliwą prędkością, to znaczy z prędkością światła – potrzebuje czasu, by pokonać przestrzeń, oddzielającą te obiekty. To właśnie ta zasada decyduje o tym, że w fizyce klasycznej oddzielonych przestrzennie obiektów nie traktuje się jako jedną i tę samą rzecz, ale jako osobne i niezależne fragmenty rzeczywistości fizycznej.

Zasada lokalności nie obowiązuje – lub przynajmniej obowiązuje w znacznie ograniczonym zakresie – w mechanice kwantowej, w związku z czym mówi się o kwantowej nielokalności (nonlocality), nieseparowalności (nonseparability) lub splątaniu (entanglement) obiektów kwantowych. Pierwszy z tych terminów zwraca uwagę na to, że

świat kwantowy nie respektuje zasady lokalności; drugi i trzeci – podkreślają aspekt wewnętrznej zależności, jaka ma miejsce pomiędzy oddzielnymi przestrzennie obiektami kwantowymi. Na oznaczenie tego fenomenu stosuje się również inne nazwy, które w taki czy inny sposób nawiązują do tego, że obiekty kwantowe wydają się nie posiadać czasoprzestrzennej lokalizacji i niezależnie od dzielących je odległości, zachowują się tak, jak gdyby stanowiły jedną niepodzielną całość, w której informacja pomiędzy poszczególnymi elementami układu przekazywana jest w sposób natychmiastowy.

Za klasyczny odpowiednik nielokalności kwantowej można uznać tak zwane „oddziaływanie na odległość”, które występowało we wczesnych teoriach grawitacji i elektromagnetyzmu, i które zostało ostatecznie wykluczone z fizyki przez postulaty szczególnej teorii względności. Przyjmuje się, że nielokalność kwantowa nie jest sprzeczna z teorią względności, ponieważ na poziomie makroskopowym własność ta nie przejawia się jako natychmiastowe oddziaływanie o charakterze kauzalnym, ale przyjmuje postać korelacji kwantowych, których

¹Jest to pewna idealizacja, ponieważ nawet dwa stykające się ze sobą przedmioty nigdy nie znajdują się dokładnie w tym samym punkcie przestrzeni.

nie można wykorzystać do przesyłania sygnału fizycznego z prędkością większą od prędkości światła². Świadomość tego, czym w rzeczywistości jest nielokalność kwantowa, i w jaki sposób należy interpretować ten fenomen, nie pojawiła się od razu w gotowej postaci. Idea ta zrodziła się razem z formalizmem mechaniki kwantowej w połowie lat dwudziestych XX w., a następnie przez długi czas dojrzewała w dyskusjach o poprawnej interpretacji tej teorii [2]. Momentem przełomowym okazał się rok 1964, w którym pojawiło się twierdzenie Bella, umożliwiające testowanie empiryczne nielokalności kwantowej.

1. Spór o interpretację mechaniki kwantowej

Problem nielokalności, ukrytej w standardowej interpretacji mechaniki kwantowej, jako pierwszy zauważył Einstein. Aby ukazać, na czym polega trudność, związana z tym fenomenem, podczas V Konferencji Solvaya w Brukseli (1927) odwołał się on do przykładu redukcji funkcji falowej pojedynczej cząstki. Zgodnie z interpretacją Bohra, pomiar, dokonywany na tego typu układzie, powoduje natychmiastową zmianę fali prawdopodobieństwa cząstki w całej przestrzeni. Redukcja funkcji falowej i znalezienie cząstki w określonym miejscu oznacza, że w tym samym momencie prawdopodobieństwo znalezienia tej cząstki we wszystkich innych, dowolnie odległych, miejscach przestrzeni, natychmiast spada do zera. Tego typu „upiorne oddziaływanie na odległość” ([3], s. 158) było w ocenie Einsteina sprzeczne z teorią względności, ponieważ łamało zasadę lokalnej przyczynowości. Nielokalność mechaniki kwantowej w interpretacji kopenhaskiej była dla Einsteina namacalnym dowodem na to, że teoria ta jest albo błędna, albo niepełna. Kiedy na początku lat trzydziestych twórca teorii względności przekonał się, że pierwsza z tych możliwości nie jest słuszna³, stał się zdeklarowanym zwolennikiem teorii lokalnych zmiennych ukrytych, zgodnie z którą mechanikę kwantową należy uzupełnić o parametry, które uczynią z niej teorię w pełni lokalną, realistyczną i deterministyczną.

Jedno z pierwszych sformułowań teorii zmiennych ukrytych zaproponował jeszcze w 1927 r. Louis de Broglie, wprowadzając pojęcie „fali pilotującej”. Chociaż Einstein

poparł teorię de Broglie’a, to jednak uczynił to bez specjalnego przekonania, ponieważ wiedział, że koncepcja ta zakłada oddziaływanie o charakterze nielokalnym⁴. W teorii tej opis funkcji falowej w przypadku układów dwu lub więcej cząstek elementarnych domaga się zastosowania wielowymiarowej przestrzeni konfiguracyjnej, w której cząstki, pomimo dzielących je odległości, mogą oddziaływać na siebie w sposób natychmiastowy [6]. Sceptycyzm Einsteina oraz krytyka przedstawicieli szkoły kopenhaskiej sprawiły, że de Broglie zrezygnował z dalszych badań nad „falą pilotującą”. Dwie dekady później koncepcję tę na nowo odkrył i rozwinął David Bohm [7]. Wbrew twierdzeniu von Neumanna z roku 1932, ogłaszającemu niemożliwość uzupełnienia formalizmu mechaniki kwantowej o zmienne ukryte, sformułował on kolejną teorię, w której występują tego typu zmienne, utożsamiając „falę pilotującą” de Broglie’a z funkcją falową w przestrzeni konfiguracyjnej. Również i w tej teorii występują oddziaływania nielokalne: poszczególne części układu kwantowego mogą w sposób natychmiastowy wpływać na zachowanie jego innych części⁵.

2. Paradoks EPR

Tymczasem światło dzienne ujrzała słynna praca Einsteina, Podolsky’ego i Rosena [9]. Eksperyment EPR dotyczy zachowania dwóch skorelowanych cząstek, które na skutek wcześniejszego oddziaływania ze sobą pozostają w stanie „splątanych”. Splątanie kwantowe na poziomie makroskopowym przejawia się w postaci następującej korelacji: pomiar położenia (lub pędu) jednej cząstki daje natychmiastową informację o położeniu (lub pędzie) drugiej cząstki, która przed momentem pomiaru nie posiada ani jednoznacznie określonego położenia, ani pędu. Eksperyment EPR nie miał dowodzić nielokalności, ale niepełności mechaniki kwantowej w jej standardowym sformułowaniu. Co prawda, autorzy artykułu rozważali również scenariusz nielokalny, w którym „fizyczna rzeczywistość [drugiego układu] zależy od procesu pomiaru, przeprowadzanego na pierwszym układzie”, ale uznali, że taką ewentualność – chociaż nie jest logicznie niemożliwa – można z góry wykluczyć, ponieważ „żadna rozsądna defi-

²Warto zauważyć, że właśnie do tego argumentu odwoływali się zwolennicy standardowej interpretacji mechaniki kwantowej, gdy Einstein zarzucał im niezgodność ich koncepcji z teorią względności: „[Wykonanie pomiaru] położenia odbitej paczki [falowej] powoduje pewien rodzaj oddziaływania (redukcja paczki falowej) w odległym punkcie, zajmowanym przez emitowaną paczkę; widać, że to oddziaływanie propaguje się z prędkością większą od prędkości światła. Jednakże oczywistym jest, że ten rodzaj oddziaływania nie może zostać wykorzystany do przekazywania sygnałów, a zatem nie pozostaje on w konflikcie z postulatami teorii względności” [1]. Analiza Heisenberga dotyczy pojedynczej cząstki, której funkcja falowa rozdziela się na dwie paczki falowe – transmitowaną i odbitą.

³O tym, że Einstein pogodził się z wewnętrzną niesprzecznością mechaniki kwantowej, może świadczyć następujący cytat: „The entire mathematical formalism [of quantum mechanics] will probably have to be contained, in the form of logical inferences, in every useful future theory” ([4], s. 667).

⁴Einstein przez pewien czas sam zajmował się teorią podobną do koncepcji de Broglie’a, ale zarzucił ją, gdy odkrył, że występują w niej oddziaływania nielokalne [5].

⁵Na temat nielokalnego charakteru teorii de Broglie’a–Bohma John Bell wypowiada następującą uwagę: „Could it be that this strange non-locality is a peculiarity of the very particular de Broglie–Bohm construction of the classical sector, and could be removed by a more clever construction? I think not. It now seems that the non-locality is deeply rooted in quantum mechanics itself and will persist in any completion” ([8], s. 132).

nicja rzeczywistości nie może na to zezwalać” ([9], s. 780). Dokładna analiza rozumowania EPR pozwala się jednak przekonać, że argument zawarty w artykule Einsteina, Podolsky’ego i Rosena w rzeczywistości przemawia za nielokalnością mechaniki kwantowej⁶. Chociaż wniosek ten nie był zamierzony przez autorów artykułu, to jednak Einstein, w jednej ze swoich późniejszych publikacji, przyznał, że zupełność mechaniki kwantowej faktycznie domaga się odrzucenia zasady lokalności: „Staje się oczywiste, że paradoks [EPR] zmusza nas do zarzucenia jednego z następujących dwóch stwierdzeń: (1) opis za pomocą funkcji ψ jest zupełny; (2) rzeczywiste stany przestrzennie oddzielonych obiektów są od siebie niezależne” ([4], s. 681). Jak widać, Einstein był świadom, że nielokalna teoria zmiennych ukrytych jest jedyną alternatywą dla standardowej interpretacji mechaniki kwantowej, chociaż wiele wskazuje na to, że nigdy do końca nie pogodził się z tym faktem. W swojej autobiografii z roku 1946 napisał, że zarówno kopenhaska interpretacja mechaniki kwantowej, odmawiająca realności obiektom kwantowym przed momentem pomiaru, jak i nielokalna teoria zmiennych ukrytych wydają się mu „w równym stopniu nie do zaakceptowania” ([4], s. 85).

3. Twierdzenie Bella

Możliwość ostatecznego rozstrzygnięcia sporu o nielokalność mechaniki kwantowej pojawiła się w roku 1964. Irlandzki fizyk, John Bell, sformułował wtedy twierdzenie [11], w którym wykazał, że przewidywania mechaniki kwantowej różnią się od przewidywań każdej teorii zmiennych ukrytych, w której zakłada się lokalność (oddziaływania fizyczne rozchodzą się ze skończoną prędkością) i realizm (parametry obiektów kwantowych mają wartości niezależne od procesu pomiaru). Założenie lokalnego realizmu prowadzi do mierzalnych efektów, które zostały ujęte w tzw. nierówności Bella. Mechanika kwantowa nie spełnia tej nierówności; jest ona natomiast zachowana przez każdą lokalną i realistyczną teorię. Twierdzenie Bella głosi zatem, że albo mechanika kwantowa nie jest poprawną teorią, albo nie jest słuszne założenie lokalnego realizmu. Oryginalna nierówność Bella oparta jest na zaproponowanym przez Bohma scenariuszu doświadczenia EPR, w którym zamiast cząstek o skorelowanych pędach i położeniach, wykorzystuje się cząstki o skorelowanych spinach. Eksperymentalna weryfikacja twierdzenia Bella domagała się pewnej modyfikacji nierówności, której dokonali w roku 1969 Clauser, Horne, Shimony i Holt [12]. Udoskonaloną nierówność Bella (nierówność CHSH) po raz pierwszy poddali eksperymentalnym testom Freedman i Clauser w roku 1972, zaś rozstrzygające eksperymenty przeprowadziła na początku lat osiemdziesiątych grupa Alaina Aspecta [13]. W doświadczeniach, powtarzanych odtąd wielokrotnie w wielu niezależnych ośrodkach ba-

dawczych, stwierdzono łamanie nierówności Bella. Wynik ten potwierdza poprawność standardowego sformułowania mechaniki kwantowej i falsyfikuje każdą teorię zmiennych ukrytych, opartą na założeniu lokalnego realizmu.

Łamanie nierówności Bella traktuje się powszechnie jako mocny argument, lub wręcz jako dowód na to, że świat kwantowy jest nielokalny. Dwa podstawowe założenia, jakie przyjmuje się przy wyprowadzaniu nierówności Bella, to realizm i lokalność, co oznacza, że przynajmniej jedno z tych założeń nie jest poprawne. Rezygnacja z lokalności na rzecz realizmu wydaje się najniższą ceną, jaką należy zapłacić, by zachować zgodność teorii z doświadczeniem. Wiele wskazuje na to, że jest to jedyne możliwe rozwiązanie, ponieważ sytuacja odwrotna – odrzucenie realizmu i zachowanie lokalności – nie rozwiązuje trudności interpretacyjnych i nie wyjaśnia korelacji, rejestrowanych w doświadczeniach EPR [14]. Korelacje kwantowe, w odróżnieniu od tych, które występują w świecie makroskopowym, są „lokalnie niewyjaśnialne” ([8], s. 153).

Twierdzenie Bella z roku 1964 i eksperymenty potwierdzające łamanie nierówności Bella rozpoczynają nowy rozdział w historii mechaniki kwantowej, nie bez powodu określane mianem ery „eksperymentalnej metafizyki” [15–17]. Nielokalność, mająca dotychczas status dyskusyjnej i nieweryfikowalnej hipotezy, stała się częścią naukowego paradygmatu i w istotny sposób zmieniła nie tylko naukowy, ale i filozoficzny obraz świata. Otrzymane wyniki to jednakże dopiero początek drogi, prowadzącej do pełnego zrozumienia tego, czym w rzeczywistości jest nielokalność. Wiele pytań nadal pozostaje bez odpowiedzi. W szczególności, nierozstrzygniętym problemem jest to, w jakim zakresie nielokalność kwantowa przejawia się w skali makroskopowej. Jeśli Wszechświat na poziomie fundamentalnym zbudowany jest z obiektów kwantowych, to należy oczekiwać, że ich kwantowe własności mają przynajmniej pośredni wpływ na to, w jaki sposób funkcjonuje rzeczywistość fizyczna na poziomie makroskopowym. Badania nad tym zagadnieniem ciągle trwają i wiele wskazuje na to, że w niedługim czasie pozwolą one lepiej poznać naturę nielokalności kwantowej i wyjaśnić związek tego fenomenu z fizyką świata makroskopowego.

Literatura

- [1] W. Heisenberg, *The Physical Principles of Quantum Mechanics* (The University of Chicago Press, Chicago 1930).
- [2] T. Pabjan, *Filozofia Nauki* **60**, 79 (2007).
- [3] A. Einstein, *The Born–Einstein Letters*, red. M. Born (Macmillan, London 1971).
- [4] A. Einstein, w: *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, red. P.A. Schilpp (Tudor, New York 1949).
- [5] D.W. Beusek, *Stud. Hist. Phil. Mod. Phys.* **27**, 437 (1997).
- [6] H.M. Wiseman, arXiv: quant-ph/0509061v3.

⁶Jedną z przesłanek rozumowania EPR jest założenie lokalności, drugą – poprawność kwantowo-mechanicznego opisu splątanych cząstek. Opuszczając drugą przesłankę jako tę, która jest oczywista, argument EPR można wyrazić w postaci następującej implikacji: lokalność pociąga za sobą niezupełność mechaniki kwantowej. Zdanie to jest jednakże równoważne innej implikacji: zupełność mechaniki kwantowej implikuje jej nielokalność [10].

- [7] D. Bohm, *Phys. Rev.* **85**, 166 (1952).
 [8] J.S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics* (Cambridge University Press, Cambridge 2004).
 [9] A. Einstein, P. Podolsky, N. Rosen, *Phys. Rev.* **47**, 777 (1935).
 [10] T. Norsen, arXiv: quant-ph/0408105v3.
 [11] J.S. Bell, *Physics* **1**, 195 (1964).
 [12] J.F. Clauser, M.A. Horne, A. Shimony, R.A. Holt, *Phys. Rev. Lett.* **23**, 880 (1969).
 [13] A. Aspect i in., *Phys. Rev. Lett.* **47**, 460 (1981); **49**, 91 (1982); **49**, 1804 (1982).
 [14] R.Y. Chiao, J.C. Garrison, *Found. Phys.* **29**, 553 (1999).
 [15] A. Shimony, *Brit. J. Phil. Sci.* **35**, 25 (1984).
 [16] *Experimental Metaphysics. Quantum Mechanical Studies for Abner Shimony*, vol. I, red. R.S. Kohen, M. Horne, J.J. Stachel (Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 1997).
 [17] M. Redhead, *From Physics to Metaphysics* (Cambridge University Press, Cambridge 1955).

ZE ZJAZDÓW I KONFERENCJI

IX Spotkanie Demonstratorów

Pierwsze Ogólnopolskie Spotkanie Demonstratorów Fizyki odbyło się w 2001 roku w Uniwersytecie Adama Mickiewicza w Poznaniu. Jego pomysłodawcą był prof. Wojciech Nawrociak ze wspomnianego Uniwersytetu. Odtąd spotkania te odbywają się corocznie w innym mieście Polski. W dniach od 24 do 26 czerwca na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego miało miejsce już IX Ogólnopolskie Spotkanie Demonstratorów Fizyki. Organizatorem tegorocznego Spotkania była Pracownia Pokazowa na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej. Jej kierownikiem jest dr Jan Olejniczak, który przewodniczył również Komitetowi Organizacyjnemu tego Spotkania. Ponadto, w skład komitetu organizacyjnego wchodził mgr Piotr Jacoń, dr Agnieszka Kijanka-Dec i Jerzy Krysiak. Pan Krysiak przygotował również i obsługiwał stronę internetową Spotkania.

W Spotkaniu wzięło udział 51 zarejestrowanych uczestników z 23 instytucji edukacyjnych, w tym z 16 ośrodków akademickich. Ponadto, wśród zarejestrowanych uczestników byli reprezentanci z 2 liceów i po jednym z: gimnazjum, koła naukowego studentów fizyki, wydawnictwa edukacyjnego, muzeum nauki i biura usług edukacyjnych. Wszyscy uczestnicy pochodzili z Polski. Dwóch uczestników Spotkania – mgr inż. Antoni Rogulski z Uniwersytetu Warszawskiego i Pan Edward Kocent-Zieliński z Uniwersytetu Łódzkiego to emerytowani demonstratorzy fizyki. Pierwszy z nich w swoim wystąpieniu przekazał wiele cennych wskazówek, pozwalających usprawnić pokazy. Wszystkich uczestników było znacznie więcej niż 51, ponieważ Spotkanie miało charakter otwarty i brali w nim udział nauczyciele łódzkich szkół, pracownicy Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Łódzkiego, a także uczestniczyło w nim kilkoro rodziców z dziećmi zainteresowanymi fizyką. W czasie Spotkania odbyło się 8 sesji, obejmujących w sumie 22 wystąpienia, w których pokazało doświadczenia 30 osób. W ramach tych wystąpień zaprezentowano ponad 200 doświadczeń ze wszystkich działów fizyki, uwzględnionych w programach nauczania tego przedmiotu – począwszy od gimnazjum, a skończywszy na wyższych uczelniach.

Wśród doświadczeń, które zrobiły największe wrażenie wymienić należy „Pokazy wielkogabarytowe”, przeprowadzone przez członków Komitetu Organizacyjnego Spotkania. Tematy tych doświadczeń to: interferometr Michelsona, zjawisko Dopplera dla światła, maszyna falowa, klatka Faradaya, zasada względności Galileusza i fale elektromagnetyczne. Przyrządy używane do niektórych doświadczeń reprezentowały bardzo wysoki poziom techniczny, np. generator fal na wodzie, używany przez mgra Andrzeja Kozłowskiego i dra inż. Leszka Wicikowskiego z Politechniki Gdańskiej, czy układy pomiarowe z mikrokontrolerami, pokazane przez dra Krzysztofa Kaczałę z Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu.



Uczestnicy Spotkania oglądają pokaz zjawiska Dopplera dla światła w wykonaniu dra Jana Olejniczaka (fot. Stanisław Bednarek)

W innych doświadczeniach zastosowanie znalazły proste przyrządy, a nawet zabawki. Doświadczenia z użyciem tych przedmiotów zaprezentowali m.in. mgr Józefa Więckowska i dr Justyna Juszczyk z Uniwersytetu Wrocławskiego, a także autor niniejszej informacji, który zaprezentował czternaście doświadczeń z różnych działów fizyki, przeprowadzonych przy użyciu bardzo prostej zabawki, zwanej elastyczną kulą wodną. Pewna dość obszerna grupa doświadczeń miała na celu stworzenie sy-

tuacji problemowej polegającej na tym, że wynik doświadczenia w pierwszej chwili był trudny do przewidzenia, ponieważ ktoś inny mógł niepostrzeżenie wprowadzić pewną drobną modyfikację w układzie doświadczalnym, która powodowałaby zaskakującą zmianę tego wyniku. Takie eksperymenty zaprezentowali m.in. mgr Jacek Legendziewicz z Biura Jardan w Krakowie, dr Adam Cieślak i mgr Magdalena Kułakowska z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Tego typu doświadczenia mają bardzo duży potencjał edukacyjny, ponieważ zmuszają odbiorców do stawiania hipotez i ich weryfikacji oraz istotnie rozszerzają dotychczasową wiedzę.

Autorzy niektórych wystąpień nie tylko pokazywali doświadczenia, ale również wyświetlali filmy i opowiadali o przedsięwzięciach popularyzujących fizykę w swoich miastach. Jako przykłady mogą tu służyć wystąpienia dra Tadeusza Molendy z Uniwersytetu Szczecińskiego, który mówił o nowościach funkcjonującej w Szczecinie Interaktywnej Wystawy Edukacyjnej pod nazwą Eureka, oraz mgra Waldemara Krychowiaka, mgra Hieronima Ratajczaka i mgra Krzysztofa Stulewskiego z Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu, którzy zaprezentowali doświadczenia z Dziewiątego Toruńskiego Festiwalu Nauki i Sztuki. Podczas Spotkania można było także obejrzeć niezwykle interesujące i rzadko pokazywane zjawiska, takie jak kawitacja. Pokazy tego zjawiska, wspomagane filmem, przedstawił dr Rafał Wojtyński z Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu.

W przerwach między sesjami uczestnicy Spotkania wzięli udział w dwóch wycieczkach: do Muzeum Kinematografii w Łodzi oraz do Muzeum Geologicznego Uniwersytetu Łódzkiego. Ponadto mieli możliwość obejrzenia skaningowego mikroskopu tunelowego, pracującego w Zakładzie Fizyki i Technologii Struktur Nanometrowych Uniwer-

sytetu Łódzkiego, kierowanym przez prof. Wielisława Olejniczaka. Uczestniczyli także w uroczystej kolacji w Centrum Konferencyjnym przy ulicy Kopcińskiego. Pozwoliło im to na lepsze poznanie się, wymianę doświadczeń i nawiązanie interesujących znajomości.

Warto dodać, że w Polsce działa Klub Demonstratorów Fizyki, którego prezesem jest dr Jerzy Jarosz z Uniwersytetu Śląskiego. Obecnie klub ten liczy 54 członków, w tym 4 profesorów. Więcej informacji o funkcjonowaniu Klubu można znaleźć na stronie www.demofiz.univ.szecin.pl, którą opiekuje się dr Tadeusz Molenda. Strona ta zawiera również wiele pożytecznych materiałów – literaturę, linki i opisy – przydatnych w realizacji doświadczeń pokazowych.

Na zakończenie Spotkania głos zabrał dr Jerzy Jarosz. Podsumował jego wyniki, podziękował gospodarzom za świetną organizację i miłe wrażenia doznane w Łodzi. Zakomunikował również, że następne, jubileuszowe, bo dziesiąte już Spotkanie zostanie zorganizowane przez Uniwersytet Śląski i odbędzie się w Ośrodku Wypoczynkowym w Ustroniu lub w Wiśle. Wszyscy uczestnicy Spotkania otrzymali pamiątkowe certyfikaty, potwierdzające udział w Spotkaniu i zdobycie przygotowania do przeprowadzania doświadczeń pokazowych z fizyki, potwierdzone przez dra Jana Olejniczaka. Osoby, które w Łodzi po raz pierwszy prezentowały doświadczenia pokazowe w ramach tych spotkań, zostały przyjęte do Klubu Demonstratorów Fizyki. Więcej informacji o Ogólnopolskim Spotkaniu Demonstratorów Fizyki w Łodzi znajduje się na stronie www.wfis.uni.lodz.pl/ppokaz.

Stanisław Bednarek

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Łódzki

Nanotechnologie

Nanotechnologie, red. Robert W. Kelsall, Ian W. Hamley, Mark Geoghegan, red. nauk. wydania polskiego Krzysztof Kurzydłowski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008, s. 384.

Na nasz rynek trafiło tłumaczenie książki *Nanoscale Science and Technology* wydanej w 2005 r. przez John Wiley & Sons Ltd. (polski tytuł *Nanotechnologie*). Pod hasłem nanotechnologii autorzy rozumieją projektowanie, wytwarzanie, badanie oraz zastosowania układów, w których co najmniej jeden z rozmiarów osiąga wymiary z zakresu od 1 do 100 nm. Układy o skali nanometrowej, oprócz niewątpliwie ciekawych własności, mają potencjał aplikacyjny, który może zrewolucjonizować wiele dziedzin przemysłu. Istnieje nadzieja, że nanotechnologia pozwoli na wytworzenie tanich polimerowych ogniw fotowoltaicznych lub wręcz sztucznych układów fotosyntetycznych, które mają rozwiązać problemy energetyczne ludzkości. Prowadzone są prace nad stworzeniem inteligentnych nanokapsułek dostarczających leki do wybranych – np. rakowych – komórek. W anonsowanych zastosowaniach na pewno wiele jest naukowego marketingu i tylko część z tych, fascynujących z naukowego punktu widzenia prac, doprowadzi do praktycznie użytecznych rozwiązań. Jednakże badania w zakresie nanotechnologii prowadzone są nie tylko na uniwersytetach, ale i w ośrodkach badawczych korporacji przemysłowych, a z wielu zdobyczy nanotechnologii korzystamy wszyscy już teraz. Odtwarzacze CD pracujące w naszych komputerach i czytniki kodów paskowych, którymi kasjerzy skanują nasze zakupy, wykorzystują lasery półprzewodnikowe, w których obszar aktywny optycznie stanowią warstwy o szerokości z zakresu nanometrowego. Głównie współczesnych dysków twardych wykorzystują zjawisko gigantycznego magnetooporu występującego w układzie warstw, z których niektóre mają szerokość odpowiadającą tylko kilku komórkom elementarnym litego kryształu.

Recenzowana pozycja ma charakter podręcznika, który wyjaśnia w sposób naukowy zjawiska występujące w strukturach nanometrowych rozmiarów oraz omawia zasady działania urządzeń funkcjonujących w oparciu o te zjawiska. Książka została przygotowana przez pracowników dwóch renomowanych angielskich uniwersytetów z Leeds i Sheffield. Autorzy poszczególnych rozdziałów są bez wyjątku znanymi specjalistami legitymującymi się osiągnięciami naukowymi publikowanymi w czasopiśmie z najwyższej półki. Wielką zasługą wydawnictwa John Wiley & Sons jest nakłonienie tych, bardzo aktywnych i zapewne niezwykle zajętych badaczy, do napisania podręcznika. Recenzowana pozycja jest jednak godna polecenia nie ze względu na wielkie nazwiska autorów, ale z uwagi na jakość, obszerność i spójność materiału, jaki razem przygotowali. Spójność podręcznik zawdzięcza temu, że został oparty na wykładach prowadzonych wspólnie przez obydwa uniwersytety przez kilka lat przed jego wydaniem.

Praca nad strukturami o rozmiarach nanometrowych ma z natury rzeczy charakter interdyscyplinarny i wymaga

współpracy fizyków, elektroników, inżynierów materiałowych, chemików, biochemików itd. Materiał przedstawiony w podręczniku obejmuje bardzo szeroki wachlarz zagadnień, co czyni go lekturą interesującą dla studentów, doktorantów oraz wykładowców wszystkich dziedzin nauk ścisłych. Grono potencjalnych czytelników jest więc bardzo szerokie.

Z założenia każdy rozdział książki miał być przystępny dla czytelnika, który nie jest specjalistą w omawianej dziedzinie. Przystępność rozdziałów zapewniają wstępy z zakresu wiedzy podstawowej, z których czytelnik dowie się o wiązaniach molekularnych, pasmach energetycznych, teorii Fermiego gazu elektronowego, ekscytacjach i polaronach, zasadach i trybach pracy mikroskopów skaningowych, domenach magnetycznych, studniach, drutach i kropkach kwantowych, termodynamice przemian fazowych itd. W mojej ocenie kryterium przystępności zostało zrealizowane na ile to było możliwe biorąc pod uwagę skończony i niezbyt wielki rozmiar książki. Kolejne rozdziały omawiają: wytwarzanie i charakteryzowanie nanostruktur, nanometrowe układy z półprzewodników nieorganicznych i organicznych, nanomateriały i urządzenia magnetyczne, elektroniczne i optoelektroniczne materiały i urządzenia molekularne oraz badania prowadzone przez biotechnologów. W książce można przeczytać m.in. o kwantowym zjawisku Halla, nanorurkach węglowych, laserach i źródłach pojedynczych fotonów, pamięciach optycznych, tranzystorach polowych, silnikach molekularnych, układach do detekcji sekwencji genów itd. Całość mieści się na 460 stronach bogato i atrakcyjnie ilustrowanego tekstu. Często ciekawe i złożone zagadnienia, których pełne omówienie wymagałoby co najmniej osobnego rozdziału (jeśli nie monografii) są wyłożone na jednej stronie. Nie trzeba więc dodawać, że wykład nie jest i nie miał być wyczerpujący. Podręcznik należy traktować jako przewodnik po intensywnie rozwijającej się interdyscyplinarnej dziedzinie wiedzy, przygotowany dla współczesnego czytelnika, który nadmiarem czasu nie dysponuje. Dokładne poznanie każdego z omówionych zagadnień wymaga sięgnięcia do bardziej szczegółowych źródeł. Podręcznik, którego każdy rozdział opatrzony jest wyczerpującą i zalecaną przez autorów bibliografią, jest dobrym punktem startowym do głębszych studiów. Esencjonalność przedstawionego wykładu ma jednak swoją cenę. Z natury rzeczy tekst miejscami trąci encyklopedią, nie zawsze jest łatwy w lekturze i nie każdy z rozdziałów jest równie pasjonujący.

Inicjatorom i wydawcom polskiego przekładu należy się uznanie za wybranie do tłumaczenia i wprowadzenie na polski rynek akurat tego podręcznika. Lepszej pozycji o podobnym charakterze na rynku anglojęzycznym nie znam. Badania z zakresu nanotechnologii i nanonauki są prowadzone prawdopodobnie na wszystkich uniwersytetach i uczelniach technicznych w kraju. Otwierane są nowe kierunki studiów z przymiotnikiem nano w tytule. W 7 Programie Ramowych nanonauka i nanotechnologia

jest jednym z czterech priorytetów (działań). Przy wykorzystaniu tego i innych źródeł finansowania w Polsce powstaje lub jest w stadium planowania wiele nanotechnologicznych ośrodków naukowo-dydaktycznych. Podręcznik trafia więc na nasz rynek w bardzo odpowiednim momencie. Polski czytelnik otrzymuje podręcznik po znacznie bardziej przystępnej cenie (89 PLN) od oryginału (55 GBP). Z tego i powyższych powodów wydanie podręcznika w kraju wydaje mi się jak najbardziej celowe.

Polski tytuł podręcznika – *Nanotechnologie* – nie całkiem oddaje tytuł oryginału i treść książki, która tylko w części poświęcona jest technologii i zastosowaniom. Pominięcie w tytule „nauki” może nieco zawęzić krąg zainteresowanych. Autorzy w przedmowie zaznaczają, że treść podręcznika może tracić na aktualności ze względu na niezwykle tempo postępów badawczych. To właśnie technologiczna, a nie naukowa strona podręcznika jest bardziej narażona na dezaktualizację. Dla przykładu, organiczne urządzenia emitujące światło (Organic Light Emitting Devices) podawane są jako „kuszące komercyjnie” (s. 321) i z historycznego punktu widzenia ważne dla nadania tempa badaniom nad półprzewodnikami organicznymi w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego stulecia. Tymczasem, w chwili gdy książka była składana do druku (przełom 2004 i 2005 r.), na rynku pojawiło się pierwsze urządzenie (rodzaj palmtopa) firmy Sony z wyświetlaczem organicznym. Obecnie wyświetlacze organiczne montowane są w większości telefonów komórkowych, kamer cyfrowych i odtwarzaczy MP3, czyli w urządzeniach dla których ważny jest niski pobór mocy oraz czytelność w świetle dziennym, a które nie wymagają ciągłej pracy wyświetlacza (niski na razie czas życia matrycy organicznej). Zasada działania tych urządzeń, na poziomie podanym w podręczniku, aktualizacji jednak nie wymaga.

Do następnego wielkiego odkrycia treść naukowa książki bardzo na aktualności nie straci. Tym niemniej groźną konkurencją dla niej są źródła internetowe, zwłaszcza te certyfikowane przez ośrodki badawcze i firmy produkujące urządzenia (IBM, Hitachi, Samsung itd.), którym wiarygodności trudno odmówić, a które uaktualniane są na bieżąco. Dla przykładu, w podręczniku znajduje się rozdział o gigantycznym magnetooporze, za którego odkrycie przyznano Nagrodę Nobla dwa lata po wydaniu książki. Moim zdaniem rozdział ten pod względem atrakcyjności prezentacji i przystępności tekstu nie wytrzymuje konkurencji z materiałami, które motywują przyznanie nagrody opisując zjawisko i jego zastosowania, a dostępne są na portalu nobelprize.org. Źródła internetowe – zazwyczaj anglojęzyczne – są jednak konkurencją przede wszystkim dla oryginału, a nie dla wydania polskiego. Nasi studenci zazwyczaj chętniej sięgają po polskie pozycje.

Przy lekturze znalazłem pewne niedociągnięcia lub błędy, których część była wystarczająco intrygująca, aby skłonić mnie do sięgnięcia do oryginalnej wersji podręcznika (ISBN 0-470-85086-8).

1) Na stronie czwartej znajduje się tabela 1.1, która podaje przykłady „układów o obniżonej wymiarowości”. Jako „układy 2D” podane są np. nanorurki węglowe i na-

nodruty. Wszystkie nanostruktury są w gruncie rzeczy trójwymiarowe. Nanodruty są zazwyczaj klasyfikowane jako quasi-jednowymiarowe ze względu na uwięzienie nośników w dwóch kierunkach prostopadłych do osi drutu. Opisem tabeli byłem więc zaskoczony. W oryginale zamiast „układów n -wymiarowych” jest podane „uwięzienie n -wymiarowe”. W tłumaczeniu nastąpiło więc przekłamanie.

2) W rozdziale 1.2.6 jest tekst „W trójwymiarowym kryształach położenie przerw energetycznych jest wyznaczone przez warunki dyfrakcyjne, a elektrony rozpraszają się na płaszczyznach sieciowych”. W oryginale jest „In a three dimensional crystal, the location of energy gaps in the electron dispersion is still determined from electron diffraction by the lattice planes...”. W polskim tłumaczeniu dyfrakcja i rozpraszanie elektronów podane są jako fakty oddzielne. Ponadto brakuje słówka „wciąż” (still), które w tym kontekście znaczy „podobnie jak w sieci jednowymiarowej omówionej szczegółowo wcześniej”. Polska wersja jest więc mniej jasna.

3) Przed wzorem (1.13) rzucił mi się w oczy wzór na energię Fermiego $E_F = \hbar k_F^2 / 2m_e$. We wzorze kreślona stała Plancka powinna być w drugiej potęgce. Ten sam błąd występuje wprawdzie w oryginale, ale wzór jest tak znany, że w polskiej wersji powinien być zostać naprawiony. Błąd jest powtórzony pod wzorem (1.16), ale już tylko w polskiej wersji. W oryginale pod wzorem (1.16) pojawia się poprawna formuła. W zarówno polskiej jak i angielskiej wersji książki zależność energii Fermiego od gęstości gazu elektronowego (1.14) podana jest również błędnie przez brak kwadratu przy stałej Plancka.

4) W polskiej wersji we wzorze na rozkład Fermiego–Diraca (1.18) nawiasy się nie domykają. Brakuje „)” po energii wzbudzeń termicznych $k_B T$.

5) Rysunek 1.8 pokazuje otwieranie przerw energetycznych w relacji dyspersji dla elektronu w jednowymiarowym kryształach. Podpis pod rysunkiem brzmi: „Schematyczne przedstawienie parabolicznej zależności między dozwolonymi wektorami falowymi elektronów a ich energią dla elektronów znajdujących się w jednowymiarowej studni potencjału o okresie równym a ”. Podpis jest błędny dlatego, że: a) zależność przestaje być paraboliczna właśnie z powodu otwierania przerw energetycznych (choć „parabolic” występuje również w oryginale), b) nie wiadomo czym jest „okres jednowymiarowej studni potencjału”. Zamiast „studni potencjału o okresie równym a ” powinien pojawić się tekst „w potencjale periodycznym o okresie a ”. Fizyk nie będzie miał problemów ze zrozumieniem rysunku 1.8, bo go zna z podstawowego kursu fizyki ciała stałego. Niemniej jednak np. biochemik zrozumie z niego niewiele.

6) Pięć linijek pod wzorem (1.19) jest q_r – powinno być q_f (energia tworzenia pojedynczego waku).

7) Na stronie 24 znalazło się zdanie, który może przypisać o szybsze bicie serca specjalistę od quasi-kryształów: „Quasi-kryształy nie mają uporządkowania dalekiego zasięgu”. Według standardowej definicji quasi-kryształu to ciało stałe wykazujące doskonałe uporządkowanie dalekiego zasięgu, tyle że bez translacyjnej periodyczno-

ści. Sformułowanie w oryginale jest poprawne: „Quasi-periodic crystals do not possess (...) long-range periodic order”. Różnicę czyni brakujące w polskiej wersji słowo „periodic”.

8) Na stronie 29 w oryginale i w polskiej wersji rozpoczyna się rozdział, który nosi nazwę odpowiednio „Electronic properties” i „Struktura elektronowa”. Mowa jest o tranzystorach i diodach, a nie o strukturze pasmowej. Polski tytuł powinien więc brzmieć raczej jednak „Własności elektronowe”.

9) W rozdziale tym czytam zdanie, które mnie zaskakuje: „Gdy układ osiąga wymiary mniejsze niż średnia droga swobodna elektronu ze względu na rozpraszanie sprężyste, tenże elektron może przemieszczać się bez losowego zmieniania fazy funkcji falowej”. Jestem zdziwiony, bo rozpraszanie sprężyste fazę zmienia, lecz jej nie randomizuje. Sprawdzam to zdanie w wersji angielskiej. W oryginale jest tutaj mowa o rozpraszaniu nieelastycznym („inelastic” a nie „elastic scattering”).

10) Akapit niżej dowiaduję się w kontekście blokady kulombowskiej, że „proces przewodzenia prądu staje się **jednoelektrodowy**”. Aby przepływ prądu przez układ był możliwy, potrzeba dwóch elektrod, nawet jeśli ten układ ma nanometrowe rozmiary. W tym miejscu chodziło o transport **jednoelektronowy** i tak jest w oryginale. Można by ten błąd uznać za literówkę, ale poniżej w tym samym rozdziale czytam znowu o „tranzystorach jednoelektrodowych”. Chodzi o tranzystor jednoelektronowy. Do wytworzenia tranzystora potrzeba elektrod trzech.

11) Na rysunku 1.23 jest napis „PODŁOŻE” (duże Ł nie weszło). Błędów z czcionkami jest więcej, na przykład na stronie 93 zamiast jednostki Å (0,1 nanometra) pojawia się nieznaną jednostką Å . W tekście znajdują się nieliczne literówki: „charaketryzują” na stronie 158, „ekscytony trypletowi” (zamiast „trypletowe”) na stronie 298, w podpisie pod rysunkiem 1.12 „odległości między najbliższymi, sąsiadującymi, atomami” (drugi przecinek zbędny), „kropkach kwantowe” (zamiast „kwantowych”) na stronie 205. Tytuł podrozdziału 6.1.2.4 podrozdziału o fullerenach zachował angielską formę „buckminsterfullerene”.

12) We wzorze (3.9) na energii stanów stacjonarnych elektronu w drucie kwantowym pojawia się suma energii uwięzienia w kierunkach prostopadłych do osi drutu i energii kinetycznej ruchu wzdłuż jego osi. We wszystkich trzech składnikach sumy pojawia się zwykła stała Plancka h . Dla energii ruchu wzdłuż osi powinna jednak stać stała kreślona \hbar . W oryginale wzór jest poprawny.

13) W rozdziale o supersieciach znajduje się opis zjawiska powstawania pasm związanych z pojawieniem się stanów zdelokalizowanych dla małej szerokości barier,

która umożliwi tunelowanie między studniami. Jako przyczynę pojawiania się stanów zdelokalizowanych podano, że „nośniki w sąsiednich studniach oddziałują między sobą ze względu na przenikanie części funkcji falowych przez bariery”. Istotnie, przenikanie funkcji falowych jest tutaj na rzeczy, ale oddziaływanie nośników z sąsiednich studni już nie. Efekt powstawania pasm (sztucznych stanów krystalicznych) jest zjawiskiem jednocząstkowym (dotyczy jednego nośnika). Powstawanie stanów zdelokalizowanych jest wynikiem obniżenia energii kinetycznej związanej z uwięzieniem, które następuje gdy funkcje falowe zajmują więcej przestrzeni (czyli wiele studni zamiast jednej). W podręczniku, który poświęca wiele miejsca na opis wiązań molekularnych różnego typu oraz powstawanie pasm w kryształach, taka nieścisłość nie wydaje się usprawiedliwiona.

14) Rozdział 3.6.3 poświęcony jest rezonansowym strukturom tunelowym o podwójnej barierze. W opisie prądowo-napięciowej charakterystyki diody tunelowej, przy wyjaśnieniu lokalnych maksimów prądu w funkcji napięcia, pojawia się odwołanie do rezonansu między energią elektronów tunelujących do struktury a energią stanów **związanych** w studni. Ścisłe rzecz biorąc, stany związane między barierami nie istnieją, gdyż ich energia leży powyżej progu kontinuum wyznaczonego przez poziom Fermiego elektrody o niższym potencjale. Równość zachodzi między energią elektronów tunelujących a energią rozproszonych stanów rezonansowych z częściową (bo nie całkowitą) lokalizacją w układzie podwójnej bariery. Tutaj ścisłość została poświęcona na rzecz przystępności opisu zjawiska, co można zrozumieć.

15) W rozdziale o gigantycznym magnetooporze w układach wielowarstwowych pojawia się rysunek 4.17 dwóch geometrii przepływu prądu. Dla zastosowań i dla dalszej dyskusji prowadzonej w tekście istotny jest tylko przepływ prądu równoległy do kierunku wzrostu. Rysunek dla prądu płynącego równoległe do warstw jest więc zbędny. Zamiast niego przydałby się natomiast schemat zastępczy ilustrujący prowadzoną w rozdziale dyskusję wypadkowej oporności dla przepływu prądów spinowo spolaryzowanych.

Poziom tłumaczenia podręcznika jest nierówny. W części rozdziałów tłumacze zachowują czujność i poprawiają nieścisłości oryginału. Niestety w kilku miejscach nieścisłości zostały wprowadzane w tłumaczeniu. Niedociągnięcia, które zauważyłem, nie zmieniają mojej opinii, że pozycja jest cenna i godna polecenia.

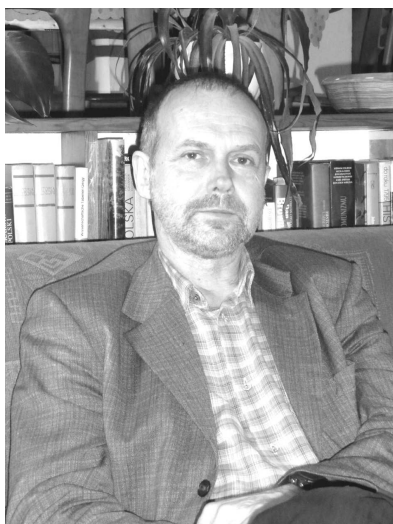
Bartłomiej Szafran

Wydział Fizyki i Informatyki Stosowanej
Akademia Górniczo-Hutnicza
Kraków

■ Jan Antosiewicz

Urodził się w 1954 r. w Warszawie. Studia fizyczne ukończył w 1978 r. na Uniwersytecie Warszawskim. Od ukończenia studiów pracuje w Zakładzie Biofizyki, w Instytucie Fizyki Doświadczalnej, na Wydziale Fizyki UW. Od 2002 r. na stanowisku profesora UW. W Zakładzie Biofizyki stworzył Pracownię Kinetiki Molekularnej, wyposażoną w spektrometry zatrzymanego przepływu, laserowej fotolizy błyskowej i skoku temperatury.

Doktorat uzyskał w 1985 r. za pracę „Badanie hydratacji nukleozydów w oparciu o pomiary prędkości rozchodzenia się fal ultradźwiękowych w roztworach wodno-alkoholowych” wykonaną pod kierunkiem prof. Davida Shugara. Habilitował się w 1999 r. na podstawie pracy „Mezoskopowe modelowanie komputerowe w badaniach struktury, dynamiki i funkcjonowania kwasów nukleinowych i białek”. Tytuł naukowy otrzymał 23 kwietnia 2009 r.



Odbył staże naukowe u prof. Dietmara Pörschke (Max-Planck Institut für biophysikalische Chemie, Getynga, 1986–88) i u prof. J. Andrew McCammona (Uniwersytet w Houston, 1992–94 oraz Uniwersytet Kalifornijski w San Diego, 1995).

Zajmuje się biofizyką molekularną białek i kwasów nukleinowych. Tematyka najważniejszych prac to właściwości elektryczne i struktura białek, kwasów nukleinowych i ich kompleksów, rola oddziaływań elektrostatycznych i hydrodynamicznych w rozpoznawaniu molekularnym, dynamika molekularna białek w stałym pH, protonacyjne stopnie swobody w stabilności i oddziaływaniach białek. Obecne zainteresowania naukowe koncentrują się na molekularnych mechanizmach procesów biologicznych inicjowanych przez zmiany pH środowiska.

Jest współautorem 80 publikacji. Wypromował dwóch doktorów. Jest członkiem American Chemical Society.

Zamiłowania pozazawodowe to historia i turystyka. Żona, Danuta Maria, jest biologiem. Ma dwóch synów, Tomasz (1981) i Marka (1986).

■ Zbigniew Włodarczyk

Urodził się w 1950 r. w Dębicy. W roku 1973 ukończył studia w zakresie fizyki stosowanej na Uniwersytecie Jagiellońskim. Stopień doktora uzyskał w 1982 r. na Uniwersytecie Łódzkim (promotor doc. Alojzy Tomaszewski), a stopień naukowy doktora habilitowanego – w roku 1994 uchwałą Rady Naukowej Instytutu Problemów Jądrowych im. Andrzeja Sołtana. Tytuł naukowy profesora nauk fizycznych otrzymał 23 kwietnia 2009 r.

Od roku 1974 do chwili obecnej pracuje w Instytucie Fizyki Uniwersytetu Humanistyczno-Przyrodniczego im. Jana Kochanowskiego w Kielcach. W latach 1976–77 przebywał w Instytucie Fizyki im. P.N. Lebediewa w Moskwie. Prowadził badania w grupie fizyki teoretycznej Uniwersytetu w Marburgu (krótkoterminowe staże u prof. Richarda Weinerja w latach 1989–92).



Tematyka jego badań naukowych dotyczy fizyki oddziaływań wysokich energii. Można w niej wyróżnić kilka nurtów: a) badania promieniowania kosmicznego (eksperymenty stratosferyczne, eksperyment „Pamir”, 1978–94), b) korelacje i fluktuacje w procesach produkcji wielorodnej (eksperymenty NA49 i NA61 w CERN-ie od 2002 r.), c) astrofizyka dziwnej materii kwarkowej, d) zastosowania nieekstensywnej statystyki do opisu złożonych układów i procesów stochastycznych. Obecne zainteresowania naukowe koncentrują się na zastosowaniach teorii informacji do opisu procesów stochastycznych (w szczególności wpływu fluktuacji parametrów skalujących w procesach produkcji wielorodnej na miarę nieekstensywności układu). W swoim dorobku naukowym ma 130 prac recenzowanych (ponad 2000 cytowań).

Od 1999 r. jest kierownikiem Zakładu Fizyki Jądrowej IF UJK. W latach 1983–99 był wicedyrektorem Instytutu Fizyki, a w latach 1999–2001 pełnił funkcję przewodniczącego Oddziału Kieleckiego PTF.

Jego zainteresowania pozanaukowe to żeglarstwo. Żonaty (żona Ewa), syn Jakub (1976) jest biofizykiem.

■ Tytuły profesorskie

Tytuł naukowy profesora nauk fizycznych nadany przez Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej otrzymał w dniu 17 czerwca 2009 r. Zbigniew Jaroszewicz (Instytut Optyki Stosowanej, Warszawa).

<http://isap.sejm.gov.pl>

■ Nagroda Siemens dla Andrzeja Mycielskiego

Nagrodę Badawczą Siemens za rok 2008 przyznano prof. Andrzejowi Mycielskiemu z Instytutu Fizyki PAN w Warszawie za „opracowanie metody oczyszczania i otrzymywania w skali produkcyjnej superczystych (6N) pierwiastków: manganu (Mn) i magnezu (Mg) oraz wybranych związków półprzewodnikowych dla celów wysokich technologii i zastosowań”.



Andrzej Mycielski odbiera nagrodę z rąk rektora PW, prof. Włodzimierza Kurnika

Nagrodę ustanowiono w wyniku porozumienia zawartego między Politechniką Warszawską a firmą Siemens w 1995 r. Politechnika Warszawska prowadzi i koordynuje całość spraw związanych z obsługą nagrody, poczynając od ogłoszenia edycji aż do uroczystości wręczenia nagród. Przewodniczącym powołanego wspólnie przez obie instytucje jury jest rektor Politechniki Warszawskiej.

Nagradzane mogą być prace z dziedziny elektrotechniki i energetyki, elektroniki (w szczególności w zakresie telekomunikacji i informatyki), automatyki, transportu szynowego i inżynierii biomedycznej oraz zaawansowanych technologii ochrony i inżynierii środowiska, budowy maszyn i inżynierii materiałowej.

Od 2005 roku Siemens przyznaje dwa wyróżnienia: Nagrodę Badawczą – za szczególne wyniki badań naukowych dające się zastosować w praktyce i Nagrodę Promocyjną – za wybitne prace doktorskie lub habilitacyjne. Suma nagród w obydwu kategoriach wynosi 70 tysięcy złotych.

Nagrodę Promocyjną za rok 2008 otrzymał dr Bartosz Firlik za pracę doktorską „Wpływ stanu zużycia profili szyn

oraz geometrii toru na bezpieczeństwo jazdy lekkiego pojazdu szynowego”.

Nagrody wręczone zostały laureatom podczas uroczystości promocji doktorskich i habilitacyjnych, która odbyła się 15 czerwca 2009 r. w Matej Auli Gmachu Głównego Politechniki Warszawskiej.

M. Ł.

■ Jubileusz Jana Mostowskiego

Jan Mostowski, profesor i przewodniczący rady naukowej w Instytucie Fizyki PAN w Warszawie, znany specjalista z zakresu teoretycznej optyki kwantowej, wieloletni (i obecny) przewodniczący Komitetu Głównego Olimpiady Fizycznej, autor i tłumacz wielu tekstów w *Postęпах Fizyki*, skończył 60 lat.



Jan Mostowski

Z tej okazji jego uczniowie, Mariusz Gajda i Karol Życzkowski, zorganizowali sesję Quantum Challenges III, stanowiącą imprezę satelitarną w stosunku do konferencji Quantum Optics VII, odbywającej się w czerwcu br. w Zakopanem. Wykłady na sesji przedstawili nauczyciele, współpracownicy i uczniowie jubilata: Iwo Białynicki-Birula (Warszawa), „Self-supported deformed states of isolated atoms”, Nick Bigelow (Rochester), „What Raman never told you about two-photon quantum state control”, Marek Trippenbach (Warszawa), „Spontaneous and stimulated processes in collisions of Bose–Einstein condensates”, Fritz Haake (Essen), „Orbit bunching in classical chaos”, Konrad Banaszek (Toruń), „The everyday life of photon pairs”, Mark Raymer (Eugene), „Stimulated Raman Scattering Revisited”.

Na zakończenie sesji Joanna Mostowska (Warszawa, córka jubilata) przedstawiła bogato ilustrowany wykład „Cycling across Tibet”. Ten wykład (patrz także <http://azjatyckiebrzmienia.blox.pl/html>), nazwano „przedkolacyjnym”, gdyż po nim odbył się bankiet urodzinowy bohatera wieczoru. Przedstawiciela redakcji *Postępów* tam nie było, ale według naszych informatorów i sesja, i bankiet należały do bardzo udanych.

Jasiu, życzymy Ci zdrowia i sukcesów oraz następnych 60 lat.

M. Ł.

■ VII Bałtycki Festiwal Nauki

W dniach 28–31 maja już po raz siódmy odbył się Bałtycki Festiwal Nauki (BFN) zorganizowany przez pomorskie szkoły wyższe i instytucje naukowe. Podczas wykładów, pokazów laboratoryjnych oraz pikników naukowcy upowszechniali społeczeństwu, w szczególności dzieciom i młodzieży, ponad 40 dyscyplin naukowych, którymi zajmują się na co dzień.

BFN jest imprezą popularnonaukową organizowaną przez wyższe uczelnie województwa pomorskiego, przy współdziałaniu instytutów naukowych Polskiej Akademii Nauk, instytutów branżowych oraz związanych z nauką środowisk pozauczelnianych. Festiwal powstał z inicjatywy Rady Rektorów Województwa Pomorskiego i organizowany jest cyklicznie od 2003 roku. Adresowany jest do wszystkich mieszkańców Wybrzeża i regionu, niezależnie od wieku i wykształcenia, a jego celem jest prezentowanie tematyki i osiągnięć prowadzonych badań naukowych w możliwie zrozumiałej i atrakcyjnej formie oraz rozwinięcie ciekawości świata i radości z jego poznawania, a także zwrócenie społecznej uwagi na wartość i przydatność badań prowadzonych w licznych laboratoriach i instytucjach naukowych.

Wzorem lat ubiegłych nie zabrakło atrakcji dla pasjonatów fizyki. Wydział Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego przygotował dla nich wykłady, pokazy i spotkania na temat tajemniczego świata holografii, barometru wodnego, elektronów, fotonów i czystej energii, ultradźwięków, luminescencji; oto niektóre tytuły: „Fizyczne metody przeciwdziałania fałszerstwom pieniędzy”, „Zabawy ze światłem”, „Jak nanotechnologie pozwalają zwiększyć sygnały świetlne”, „Proekologiczne źródła energii – teraz i w przyszłości”. Bogatą ofertę stworzył też Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej Politechniki Gdańskiej – pokazy przyciągnęły jak zawsze tłumy zwiedzających, bo jak tu się oprzeć, kiedy demonstrują niezwykłe pokazy i eksperymenty fizyczne (lewitujące kolejki, bańki mydlane wielkości piłki plażowej, ferrociecze wyglądające jak jeże) albo proponują obserwacje przy użyciu ka-

mery SlowMotion – gdzie zabawy było co niemiara, bo na ekranie można było obejrzeć coś, czego normalnie ludzkie oko nie rejestruje, bo dzieje się zbyt szybko, w ułamku sekundy – pękający balon pełen wody czy też roztrzaskiwanie się szklanki.

Bałtycki Festiwal Nauki cieszy się rosnącą popularnością nie tylko wśród dzieci i młodzieży szkolnej, ale także i mieszkańców Trójmiasta. Według szacunków organizatorów imprezę odwiedzało codziennie kilka tysięcy zainteresowanych.

Tomasz Jarosław Wąsowicz

■ W 90. rocznicę słynnego zaćmienia

Zaćmienia Słońca stanowią dla astronomów okazję do wielu badań astrofizycznych. Właśnie obchodziliśmy 90. rocznicę ważnego i historycznego zaćmienia, podczas którego udało się po raz pierwszy potwierdzić ogólną teorię względności. W maju 1919 r. sir Arthur Stanley Eddington, astrofizyk brytyjski, zorganizował wyprawę na wyspę Principe leżącą na równiku u zachodnich wybrzeży Afryki. W dniu 29 maja 1919 r. podczas całkowitego zaćmienia Słońca Eddington wraz z asystentem fotografował gwiazdy w gromadzie Hiad; okazały się one nieco przesunięte względem zarejestrowanego 3 miesiące wcześniej położenia nocnego. Zarówno sam fakt, jak i wielkość przesunięcia przewidział Einstein kilka lat wcześniej w ramach ogólnej teorii względności; przesunięcie było skutkiem zakrzywienia biegu promieni światła gwiazd w polu grawitacyjnym Słońca.

Aby uczcić 90. rocznicę tego wydarzenia, przypadającą w Światowym Roku Astronomii, na wyspę Principe udał się zespół: astronomowie – Pedro Ferreira z Uniwersytetu w Oksfordzie i Richard Massem z Uniwersytetu w Edynburgu, oraz antropolog Gisa Weszkalnys z Oksfordu. Wygłosili oni przemówienia okolicznościowe i wykłady popularne, a na plantacji, gdzie Eddington prowadził swoje obserwacje, odstonili tablicę pamiątkową.

Science 324, nr 5932 (5 June 2009)

M. S.



Liczne eksperymenty pokazowe z fizyki cieszyły się ogromnym zainteresowaniem młodzieży (fot. T. Wąsowicz)



Jeż z cieczy ferromagnetycznej utworzony za pomocą pola magnetycznego (fot. OG PTF)



Origami – matematyka papieru (fot. T. Wąsowicz)

NOWE KSIĄŻKI

- Marcus Chown, *Teoria kwantowa nie gryzie. Przewodnik po Wszechświecie*, z jęz. angielskiego tłum. Jacek Bieroń, Wyd. Zysk i S-ka, Poznań 2009, s. 236.
- Jerzy Stasz, *II pracownia fizyczna. Tematyka ćwiczeń i uwagi metodyczne*, Wyd. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2009, s. 136.
- Seweryn Miga, *Nieliniowe właściwości dielektryczne wybranych kryształów ferroicznych*, Wyd. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2009, s. 96.
- Anna Michnik, *Mikrokalorymetryczne badania przemian konformacyjnych albuminy poddanej działaniu wybranych czynników fizykochemicznych*, Wyd. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2009, s. 144.
- Antoni Budniok, Eugeniusz Łągiewka, *Problemy elektrochemii w inżynierii materiałowej*, Wyd. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2009, s. 144.
- Beata Kozłowska, *Promieniotwórczość naturalna wód źródłanych uzdrowisk południowej Polski*, Wyd. Uniwersytetu Śląskiego, Katowice 2009, s. 144.

POSTĘPY FIZYKI W INTERNECIE

<http://postepy.fuw.edu.pl>

- ▶ ARCHIWUM
spisy treści wszystkich zeszytów
- ▶ ARTYKUŁY DO POBRANIA
m.in. przekłady wykładów noblowskich (od roku 2001) oraz wykłady z ostatnich Zjazdów Fizyków Polskich
- ▶ MATERIAŁY DODATKOWE
uzupełnienia niektórych artykułów

WKRÓTCE W POSTĘPACH

- *Aleksandra Drozd-Rzoska i Sylwester Rzoska o nowoczesnej interpretacji pewnych idei Arkadiusza Piekary*
- *Stanisław Krukowski o własnościach powierzchni GaN w modelowaniu za pomocą DFT (density functional theory – teoria funkcjonatu gęstości)*
- *Martin Underwood o życiu i osiągnięciach Józefa Rotblata – wielkiego polskiego fizyka i laureata Pokojowej Nagrody Nobla łącznie z ruchem Pugwash*
- *Stanisław Wróbel i Małgorzata Nowina Konopka o XL Zjeździe Fizyków Polskich (Kraków 2009)*

PRENUMERATA

Postępy Fizyki można zaprenumerować w jeden z następujących sposobów.

▶ PRZEZ ODDZIAŁY PTF (tylko prenumerata krajowa dla członków PTF i studentów):

Cena rocznej prenumeraty krajowej w 2009 r. wynosi 48 zł. Dostawa *Postępów* odbywa się za pośrednictwem Oddziałów.

▶ PRZEZ ZARZĄD GŁÓWNY PTF (tylko prenumerata krajowa):

Wpłaty należy dokonać na konto Zarządu Głównego PTF: 19 1020 1097 0000 7802 0001 3128 (PKO BP IX O/Warszawa) lub w Biurze Zarządu Głównego PTF.

Cena rocznej prenumeraty krajowej w 2009 r. wynosi 60 zł. Dostawa *Postępów Fizyki* następuje drogą pocztową pod wskazany adres.

▶ PRZEZ PRZEDSIĘBIORSTWA KOLPORTAŻU PRASY:

RUCH (<http://www.prenumerata.ruch.com.pl>)

KOLPORTER (<http://sa.kolporter.com.pl>)

GARMOND PRESS (<http://www.garmond.com.pl>)

Cena rocznej prenumeraty krajowej w 2009 r. wynosi 72 zł.

Prenumerata ze zleceniem dostawy za granicę – patrz <http://www.ruch.pol.pl>.

Dostępne są również zeszyty archiwalne – prosimy o kontakt z redakcją.

INFORMACJE DLA AUTORÓW

Artykuły powinny mieć charakter przeglądowy i być dostępne dla ogółu fizyków. Prace należy nadsyłać pod adresem redakcji. O przyjęciu pracy do druku decyduje komitet redakcyjny. Prac niezamówionych i niezakwalifikowanych do druku redakcja nie zwraca. Bardziej szczegółowe informacje na temat układu i sposobu przygotowania pracy znajdują się na stronie internetowej *Postępów Fizyki*.

REKLAMA W POSTĘPACH FIZYKI

Zapraszamy – szczególnie przedstawicieli producentów aparatury oraz sprzętu i oprogramowania komputerowego, wydawców podręczników i książek naukowych oraz popularnonaukowych – do zamieszczania ogłoszeń reklamowych w *Postęпах Fizyki*. Nasze czasopismo dociera do większości polskich fizyków, z których wielu decyduje o bieżących zakupach uczelni, instytutów i szkół. Zainteresowanych prosimy o kontakt z redakcją pod adresem: postepy@fuw.edu.pl.

POSTĘPY FIZYKI (ADVANCES IN PHYSICS)

Founded in 1949, published bimonthly in Polish with titles in English by the Polish Physical Society with a support of the Ministry of Science and Higher Education and the Physics Faculty of the Warsaw University.

INFORMATION FOR SUBSCRIBERS

A subscription order can be sent through the local press distributor or directly to „RUCH” S.A. Oddział Krajowej Dystrybucji Prasy, ul. Jana Kazimierza 31/33, skrytka pocztowa 12, 00-958 Warszawa, Poland (for details see <http://www.ruch.pol.pl>).