

ZENON E. ROSKAL

EKSPERYMENTALNY TEST OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI

1. WSTĘP

We współczesnej filozofii nauki niewielką uwagę poświęca się dokonaniom ostatnich lat w zakresie nowych możliwości potwierdzenia ogólnej teorii względności (OTW). Najczęściej wymieniane są nieliczne historyczne już testy, które mają charakter wybitnie obserwacyjny¹. Podobny charakter ma też większość najnowszych prób potwierdzenia OTW. W pełni eksperymentalny charakter – zdaniem Francisa Everitta – głównego projektanta tego kosmicznego eksperymentu ma niedawno zakończona misja badawcza (raport końcowy został podpisany 31 grudnia 2008 r. przez Roberta Kahna, Francisa Everitta, Barry'ego Muhlfeldera i Toma Langensteina), nosząca na-

Dr hab. ZENON E. ROSKAL, prof. KUL – Katedra Filozofii Przyrody Nieożywionej, Wydział Filozofii, Katolicki Uniwersytet Lubelski Jana Pawła II; adres do korespondencji: Al. Racławickie 14, 20-950 Lublin; e-mail: kronos@kul.lublin.pl

¹ Różnica między obserwacyjnymi a eksperymentalnymi testami OTW wyraża się przede wszystkim w tym, że te pierwsze mogły być przeprowadzone tylko w odpowiednim czasie. Obserwacyjne potwierdzenie ugięcia promienia światła w pobliżu tarczy słonecznej było możliwe tylko w czasie zaćmienia Słońca, na które trzeba było czekać, a nawet podejmować wyprawy badawcze na tereny, gdzie było ono obserwowalne. Testy eksperymentalne nie wymagają tak daleko idącego podporządkowania się naturze. Warto także zauważyć, że obserwacyjne potwierdzenie niektórych przewidywań ogólnej teorii względności (ugięcie światła w pobliżu tarczy słonecznej) w czasie wypraw badawczych mających na celu zaobserwowanie tego zjawiska 29 maja 1919 r. zostało wielokrotnie wzmocnione w ramach tzw. nauki popularnej. W tym czasie został też błyskawicznie zbudowany autorytet Einsteina. Jeden ze współczesnych historyków – Paul Johnson – uznał, że jest to cezura współczesności. Już w pierwszym zdaniu monografii na temat współczesności pisze: „The modern world began 28 May 1919 when photographs of a solar eclipse, taken on the island of Principe off west Africa and at Sobral in Brazil, confirmed the truth of a new theory of the universe” (P. J o h n s o n, *Modern Times Revised Edition: The World from the Twenties to the Nineties*, New York 2001, s. 1). Por. m.in. P. C o l e s, *Einstein and the Birth of Big Science*, Cambridge 2000 (passim).

zwę Gravity Probe B² (Sonda grawitacyjna B), gdyż cała aparatura badawcza mająca na celu obserwację przewidzianego przez OTW zjawiska znajduje się pod kontrolą eksperymentatorów. Bezprecedensowe eksperymenty stały się możliwe w związku z rozwojem najnowszych technologii, ale warto też zwrócić uwagę na interesujący proces ewolucji astronomii i astrofizyki w kierunku nauki eksperymentalnej oraz odnotować fakt wielokrotnego potwierdzenia teorii (OTW), która zyskała już trwałą pozycję w strukturze współczesnej nauki. Jednym z powodów eksperymentalnego testu OTW wydaje się być potrzeba precyzyjnego określenia kształtu lokalnej czasoprzestrzeni, ale innym może być to, że wysuwane są liczne modyfikacje OTW i zachodzi pilna potrzeba ich akceptacji lub odrzucenia.

W tej perspektywie interesujące jest zebranie rozproszonych informacji na temat rozpoczętej w 2004 r. misji Gravity Probe B, której celem było przetestowanie ogólnej teorii względności, polegające na zmierzeniu krzywizny czasoprzestrzeni w okolicach Ziemi (efekt geodetyczny) oraz pomiarze tzw. efektu Lense-Thirringa z dokładnością do 1%. Wstępne wyniki uzyskane w 2007 i 2008 r. nie są zadowalające przede wszystkim w tym sensie, że nie udało się potwierdzić efektu Lense-Thirringa z projektowaną dokładnością. Poza tym formułowane są przypuszczenia, że odkryto szereg sygnałów, których interpretacja może się okazać bardziej interesujące od pierwotnego celu eksperymentu.

Podjęty problem można wyartykułować jako próbę filozoficznej refleksji nad wpływem najnowszych technologii na możliwości poznawcze współczesnej nauki (astrofizyki) na przykładzie projektowania, finansowania i realizacji misji badawczej Gravity Probe B, a także nad wynikami prowadzonych w jej ramach eksperymentów. Aktualność tego zagadnienia wyraża się m.in. w tym, że misja Gravity Probe B, mimo podpisania raportu końcowego, nie jest w pełni zakończona, gdyż w dalszym ciągu opracowywane są wyniki w celu wyeliminowania czynników zakłócających mierzone wielkości fizyczne. Należy też pamiętać, że testowana w tym eksperymencie

² Nazwa ta wskazuje na kontynuację przedsięwzięcia badawczego podjętego przez Smithsonian Astrophysical Observatory i NASA w 1976 r. Celem tej misji kosmicznej było również testowanie OTW, ale innych jej prognoz niż w eksperymencie Gravity Probe B. Zadaniem pierwszej misji było zbadanie przewidywanej przez OTW grawitacyjnej dylatacji czasu. W tym celu został wystrzelony w kosmos (18 czerwca 1976 r.) wysokiej precyzji zegar atomowy (maser wodorowy), który przebywał na wysokości 10 tys. km przez 1h 55 min., a następnie został wodowany. Całe urządzenie ważyło tylko 100 kg. Koszt tej misji był też o wiele niższy. Zgodność predykcji z obserwacją była równa 70×10^{-6} . Por. R.F.C. Vesot [et al.], *Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser*, „Physical Review Letters” 45 (1980), s. 2081-2084.

OTW należy do centralnych teorii współczesnej fizyki. Ewentualne odrzucenie OTW z pewnością miałyby wpływ m.in. na współczesną kosmologię. Na marginesie tych rozważań warto też jest odnotować, kilka uwag o charakterze historycznym, które wpisują aktualne przedsięwzięcia badawcze w ważne historyczne procesy wskazując na ciągłość rozwoju nauki i jej uwikłanie w różnej proweniencji czynniki zewnętrzne.

2. GENEZA EKSPERYMENTU GRAVITY PROBE B

Koncepcja eksperymentu zwanego Gravity Probe B pojawiła się już na samym początku ery kosmicznej, której cezurą jest wystrzelenie pierwszego sztucznego satelity Ziemi³. Pomysł testowania OTW w kosmosie wysunął fizyk z Uniwersytetu Stanforda Leonard Schiff (1915-1971), który znany był z tego, że preferował równoległe badania w odległych gałęziach fizyki zajmując się równocześnie OTW i mechaniką kwantową (fizyka wysokich energii). Propozycja nowego testu OTW wysunięta przez Schiffa polegała na sprawdzeniu tzw. efektu Lensa-Thirringa⁴. W wersji zaproponowanej przez

³ Miało miejsce to 4 października 1957 r. W tym dniu za pomocą rakiety R-7 (zaprojektowanej przez Siergieja Korolowa) został wystrzelony w kosmos z kosmodromu Bajkonur Sputnik 1. Ten bezzałogowy statek pozostawał na orbicie do 4 stycznia 1958 r., kiedy spłonął w atmosferze, opadając na Ziemię. Ten sukces technologiczny ZSRR nie tylko rozpoczął ostrą rywalizację z USA, ale także jest interpretowany jako symboliczny początek ery podboju kosmosu. Jedną z form obchodów 50-lecia tej rocznicy była konferencja naukowa nt. *Kosmos dla Ludzi – 50 lat ery kosmicznej*, zorganizowana w dniach 2-3 października 2007 r. na Politechnice Warszawskiej.

⁴ Efekt ten, zwany również „wleczeniem okładów inercjalnych”, został przewidziany jako wniosek płynący z OTW już w 1918 r. Hans Thirring (1888-1976), austriacki fizyk pracujący na Uniwersytecie Wiedeńskim, w kilku publikacjach (H. Thirring, *Über die Wirkung rotierender ferner Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie*, „Physikalische Zeitschrift” 19 (1918), s. 33; tenże, *Berichtigung zu meiner Arbeit: „Über die Wirkung rotierender Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie“*, „Physikalische Zeitschrift” 22 (1921), s. 29) oraz w pracy napisanej wspólnie z wiedeńskim matematykiem Josephem Lensem (1890-1985) – (J. Lense, H. Thirring, *Über den Einfluss der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie*, „Physikalische Zeitschrift” 19 (1918), s. 156-163) opisał zjawisko, które jest konsekwencją założeń OTW na temat natury przestrzeni. Interesujące jest to, że motywy podjęcia tych koncepcyjnych badań były filozoficzne. Hans Thirring usiłował sprawdzić czy nowa teoria grawitacji spełnia wysuniętą wcześniej przez Ernsta Macha zasadę, zwaną dzisiaj zasadą Macha, zgodnie z którą masa ciała nie jest jego wewnętrzną cechą, ale skutkiem oddziaływania pozostałej materii Wszechświata. Zasada ta była ważnym czynnikiem inspirującym Alberta Einsteina do opracowania nowej – konkurencyjnej w stosunku do Newtonowskiej – teorii grawitacji. W tym celu Thirring i Lense rozważali przypadek układów inercjalnych znajdujących się wewnątrz wolno obracającej się z jednostajną

Schiffa należało zmierzyć kąt odchylenia osi orbitującego żyroskopu ustawionego w kierunku odległych gwiazd. Według jego obliczeń w przypadku orbity biegunowej⁵ o promieniu 804,672 km (500 mil) odchylenie powinno wynosić ok. 7 sekund kątowych na rok⁶. Osobą, która w decydujący sposób wpłynęła na realizację tego eksperymentu był angielski fizyk Francis Everitt⁷. Projektem eksperymentu zainteresował go w 1962 r. William Fairbank.

prędkością cienkiej powłoki oraz na zewnątrz rotującej sferycznej masy. Był to rodzaj eksperymentu myślowego. Przy tych założeniach okazało się, że wewnątrz powłoki geometria przestrzeni jest praktycznie (pseudo)euklidesowa, ale na zewnątrz obracającej się kuli przestrzeń wykazuje relatywistyczne efekty zgodne z zasadą Macha. Współcześnie dominuje jednak pogląd, zgodnie z którym nie ma pełnej zgodności między zasadą Macha i OTW. Wyliczone przez Lense'a i Thirringa odchylenie od orbity kołowej rotującego żyroskopu na bliskiej, biegunowej orbicie wokół Ziemi wynosiło 1,3 mm, co dawało 0,26 sekundy kątowej na rok odchylenia osi wirującego żyroskopu. Efekt polegający na precesji osi wirującego żyroskopu nazwano wleczeniem układów inercjalnych, gdyż przypominało to porywanie przestrzeni za rotującym ciałem, analogicznie do porywania gęstej i lepkiej substancji, w której rotuje sfera. Wielkość tego efektu była tak mała, że nie rozważano wówczas możliwości jego pomiaru, poza tym wówczas jeszcze nie brano poważnie po rozważeniu możliwości umieszczenia sztucznego satelity na orbicie Ziemi. Por. F. E m b a c h e r, *Mach, Thirring & Lense, Gödel – getting dizzy in space-time*, „Journal of Physics: Conference Series” 82 (2007), s. 1-6.

⁵ Tylko w przypadku takiej orbity precesja daje się rozłożyć na dwie niezależne składowe w układzie ortogonalnym: składową geodetyczną i składową pochodzącą od efektu „wleczenia układu”.

⁶ L. S c h i f f, *Possible new experimental test of general relativity theory*, „Physical Review Letters” 4 (1960), s. 215-217. Artykuł ten został zauważony dopiero dwa lata po opublikowaniu i sukcesywnie jego indeks cytowań wzrastał, osiągając aktualnie (sierpień 2009) 106 pozycji. L. Schiff rozwinął swoją pierwotną koncepcję w artykule: L.I. S c h i f f, *Proposed gyroscope experiment to test general relativity theory*, [w:] *Conference Internationale sur les Theories Relativistes de la Gravitation*, red. L. Infeld, Warszawa 1964. Propozycja nowego testu była jednak poprzedzona wcześniejszymi (grudzień 1959 r.) konsultacjami, prowadzonymi z W.M. Fairbankiem, wybitnym autorytetem w dziedzinie nadprzewodnictwa, i R.H. Cannonem, cenionym specjalistą w zakresie konstrukcji żyroskopów, których celem była ocena trudności technicznych takiego przedsięwzięcia. Por. także: L.I. S c h i f f, *Motion of a Gyroscope According to Einstein's Theory of Gravitation*, [w:] *Nonlinear Gravitodynamics, The Lense-Thirring Effect, A documentary introduction to current research*, ed. J. Ruffini, Costantino 1960, s. 427- -438. Idea ta była jednak niezależnie sformułowana już w listopadzie 1959 r. przez George'a E. Pugha uczonego zatrudnionego w Departamencie Obrony USA.

⁷ F. Everitt studiował fizykę na Uniwersytecie Londyńskim pod kierunkiem laureata Nagrody Nobla Patricka M.S. Blacketta, który zwykł powtarzać, że jeżeli nie wiemy jakim działem fizyki się zająć, to należy odkryć nową technologię, która zazwyczaj prowadzi do nowych działań fizyki. Ten punkt widzenia znajduje potwierdzenie w koncepcji nauki wysuniętej przez Wiktora Oktabę, który w pracy poświęconej teorii eksperymentu zauważa, że „Nauka jest zorganizowanym obszarem wiedzy (często probabilistycznej) dotyczącej określonej dziedziny zainteresowań. Wiedza ta jest zdobywana za pomocą metody naukowej, która dotyczy bardziej działań naukowych i technologicznych niż metod stosowanych przez indywidualnych naukowców i techno-

Wcześniej Everitt zajmował się paleomagnetyzmem, ale zmienił swoje zainteresowania po przyjeździe na Uniwersytet Pensylwański, gdzie podjął badania nad ciekłym helem. W owym czasie zainteresował się także badaniami, w których wykorzystywano żyroskopy pracujące w bardzo niskich temperaturach do testowania ogólnej teorii względności. W ten sposób została zainicjowana najdłużej projektowana i realizowana kosmiczna misja badawcza w dotychczasowej historii tzw. ery kosmicznej.

3. TECHNOLOGIE WYKORZYSTANE W EKSPERYMENCIE GRAVITY PROBE B

Warty 650 milionów dolarów satelita został wystrzelony w kosmos 20 kwietnia 2004 r. z Vandenberg Air Force Base w Kalifornii. Wyniosła go na orbitę rakieta Boeing Delta 2. Najdłużej projektowany eksperyment w dziejach ery kosmicznej jest stosunkowo prosty z punktu widzenia fizyki, ale o wiele bardziej skomplikowany technologicznie. Eksperyment był wyzwaniem przede wszystkim dla inżynierów, którzy w trakcie przygotowań do misji musieli wykazać się wielką pomysłowością. Misja Gravity Probe B charakteryzuje się bowiem tym, że jest to doświadczenie z zakresu badania grawitacji, w którym wykorzystano nowej generacji technologie, m.in. SQUID (Superconducting QUantum Interference Device, Nadprzewodzący Interferometr Kwantowy). Technologia SQUID wykorzystuje zjawisko tunelowania Josephsona⁸, które jest podstawą do konstrukcji tzw. złącza Joseph-

logów, chociaż oczywiście obu aspektów nie można ostro oddzielić". (W. O k t a b a, *Historia teorii eksperymentu*, Lublin 2002, s. 24).

⁸ Zjawisko to przewidział (już w następnym roku zostało doświadczalnie potwierdzone) 22-letni fizyk z Cambridge Brian David Josephson, który m.in. za to odkrycie w wieku 33 lat dostał w 1973 r. Nagrodę Nobla. Wieloletnia praktyka jest taka, że nagradzani są w ramach tej samej nagrody także i inni fizycy pracujący nad pokrewnymi dziedzinami. Josephson swoją nagrodę podzielił z japońskim fizykiem Leo Esaki i Amerykaninem Iwarem Giaeverem. Na tym zjawisku oparta jest zasada działania tzw. złącza Josephsona, które ma wiele przyszłościowych zastosowań, m.in. do produkcji o dwa rzędy wielkości szybszych komputerów. Współcześnie Josephson jest zaangażowany w projekt badawczy mający na celu wyjaśnienie na gruncie fizyki fenomenu ludzkiej świadomości. Znany jest też z zainteresowań zjawiskami paranormalnymi oraz życzliwości dla problemów filozoficznych (kognitywistyka). Według niego mechanika kwantowa jest teorią niepełną i nieostateczną. W dyskusjach, które prowadzi z filozofami, rozwija zasadę komplementarności. Opowiada się też za wprowadzoną przez Goulda zasadą NOMA, która mówi o rozłączności magisterium nauki i teologii. Znany jest też z życzliwych interpretacji doświadczeń Martina Fleischmanna i Stanleya Ponsa tzw. zimnej fuzji.

sona (pomiędzy dwoma nadprzewodnikami umieszcza się cienką warstwę dielektryka). Dzięki temu urządzeniu można mierzyć zmiany strumienia magnetycznego z bezprecedensową precyzją sięgającą 10^{-18} T. Podobnie jak interferometry, które pozwalały na pomiary odległości z bardzo wielką precyzją, urządzenia oparte na technologii SQUID pozwalają na pomiary bardzo słabych pól magnetycznych. Jest to zatem bardzo czuły magnetometr. Tak małe natężenia pola magnetycznego wytwarzają np. prądy elektryczne płynące w neuronach lub mięśniu sercowym, dlatego urządzenie to znalazło zastosowanie w magnetoencefalografii i magnetokardiografii. Taka dokładność wymagana była do pomiaru natężeń pól magnetycznych generowanych w tzw. zjawisku Londona⁹, które z kolei było wykorzystane do pomiaru kątów

⁹ Zjawisko to badali Fritz i Heinz Londonowie jeszcze przed drugą wojną światową. Fritz Wolfgang London (1900-1954) urodził się we Wrocławiu (Breslau). Jego ojciec był profesorem matematyki na Uniwersytecie Wrocławskim. Pierwsze naukowe artykuły F. Londona były z filozofii, podobnie jak i praca magisterska z zakresu systemów dedukcyjnych napisana pod kierunkiem wybitnego fenomenologa Aleksandra Pfändera. Jego poglądy filozoficzne były opozycyjne w stosunku do pozytywizmu logicznego i ewoluowały w kierunku antyredukcjonizmu. Wiele późniejszych jego prac z zakresu fizyki kwantowej było inspirowanych tą filozoficzną postawą. Zainteresowania fizyką obudził w nim Max Born, który polecił go Arnoldowi Sommerfeldowi. Studia pod kierunkiem Sommerfelda ujawniły jego wielki talent matematyczny i zaowocowały artykułami z zakresu spektroskopii. W początkowym okresie F. London wykazał się próbami interpretacji w języku mechaniki kwantowej teorii Hermana Weyla, unifikującej elektromagnetyzm z ogólną teorią względności. Fritz London jako jeden z pierwszych fizyków zauważył podobieństwa między zjawiskami nadprzewodnictwa i nadciekłości i zinterpretował te zjawiska w języku mechaniki kwantowej. Według Londona nadprzewodnictwo jest makroskopowym zjawiskiem, w którym przejawiają się efekty kwantowe. Ten punkt widzenia został później potwierdzony w głównych pracach J. Bardeena, L.N. Coopera i J. R. Schrieffera, którzy stworzyli obowiązującą do dziś teorię nadprzewodnictwa nazwaną o pierwszych liter ich nazwisk teorią BCS. F. London w dwutomowej monografii (*Superfluids*, vol. 1, New York: Wiley and Sons 1950, v. 2, New York: Wiley and Sons 1954) podsumował swoje osiągnięcia teoretyczne w zakresie nadprzewodnictwa. Jego teoria w dużej mierze była jednak fenomenologiczna. Głównym wkładem F. Londona w teorię nadprzewodnictwa było wyjaśnienie zjawiska (równania Londona), które wcześniej (1933 r.) odkryli i badali niemieccy fizycy Fritz Walther Meißner (1882-1974) i Robert Ochsenfeld (1901-1993), tzw. zjawisko Meißnera-Ochsenfelda, które polega na wypychaniu pola magnetycznego ze stacjonarnego nadprzewodnika (ściśle biorąc, mamy do czynienia z sytuacją, w której pole magnetyczne wnika na głębokość kilkuset angstromów, zwaną londonowską głębokością penetracji). Por. F. L o n d o n, H. L o n d o n, *The electromagnetic equations of the supraconductor*, „Proceedings of the Royal Society”. A. Mathematical, Physical and Engineering Sciences 149 (1935), s. 71-88, gdzie podane są równania znane współcześnie jako równania Londona, oraz K. G a v r o g l o u, *Fritz London: a scientific biography*, Cambridge 1995, s. 117-272, gdzie można zapoznać się z szerszym historycznym i filozoficznym kontekstem. Zjawisko Meißnera-Ochsenfelda jest jednym ze sposobów przeciwdziałania grawitacji, tzw. lewitacja magnetyczna, która jest wykorzystywana w bardzo kosztownej technologii, jaką jest kolei magnetyczna (*maglev*). Zmiana natężenia pola magnetycznego generowanego w zja-

precesji w żyroskopach znajdujących się na pokładzie sondy kosmicznej Gravity Probe B.

Wszystkie niezbędne do eksperymentu Gravity Probe B technologie były dostępne już w 1981 r., ale od dostępności poszczególnych technologii do ich wzajemnego współdziałania jest bardzo daleka droga. Na przykład technologie produkcji żyroskopów¹⁰ były wówczas bardzo zaawansowane, aczkolwiek wynalazek żyroskopy został dokonany stosunkowo niedawno¹¹.

wisku Londona jest proporcjonalna do kąta nachylenia osi obrotu nadprzewodnika. Ściśle biorąc, nadprzewodząca warstwa niobu, którym pokryte są żyroskopy wytwarza proporcjonalny do prędkości kątowej żyroskopy magnetyczny moment dipolowy (moment Londona), który z kolei wykorzystywany jest do określenia przestrzennej orientacji osi żyroskopy. Pośrednio można zatem mierzyć precesję tej osi. Por. m.in. Y.M. X i a o, W. F e l s o n, C.H. W u, G.M. K e i s e r, J.P. T u r n e a u r e, *Observation of the London Moment and Trapped Flux In Precision Gyroscopes*, „IEEE Transactions on Applied Superconductivity” 3 (1993), s. 2144-2147, gdzie podane są szczegółowe informacje na ten temat. Warto też zauważyć, że w końcowym raporcie z grudnia 2008 r. autorzy eksperymentu stwierdzili odstępstwa od liniowości zależności kąta nachylenia osi obrotu nadprzewodzącego żyroskopy od natężenia pola magnetycznego, aczkolwiek nie byli w stanie podać poprawnej funkcji charakteryzującej tę zależność ograniczając się tylko do wskazania zakresu ograniczenia.

¹⁰ Technologie produkcji żyroskopów (tzw. żyroskopy kriogeniczne) wykorzystanych w eksperymencie Gravity Probe B były znane już w połowie lat pięćdziesiątych i stosowne m.in. przez korporację General Electric. Kriogeniczny żyroskop elektrostycznie łożyskowany wynalazł już 1954 r. Arnold Nordsieck (doktorant Roberta Oppenheimera). Konstrukcje te były wykorzystywane w systemach nawigacyjnych superbombowców i łodzi podwodnych, które dzięki tak doskonałym systemom nawigacyjnym mogły pozostać w zanurzeniu ponad miesiąc. Interesujące jest to, że wymiary tych żyroskopów były bardzo zbliżone do wymiarów żyroskopów użytych w eksperymencie Gravity Probe B. Por. A. L a w r a n c e, *Modern Inertial Technology. Navigations, Guidance, and Control*, New York 1998², s. 126-128 oraz J. L e w, *Sto wcieleń żyroskopy*, Warszawa 1963, s. 42-44, gdzie można znaleźć niezbyt ściśle informacje na ten temat. Por. także J.A. L i p a, C.W.F. E v e r i t t, *The role of cryogenics in the gyroscope experiment*, „Acta Astronautica” 5 (1978), s. 119-123, gdzie dyskutowana jest rola kriogeniki na etapie projektowania żyroskopowych urządzeń pomiarowych wykorzystywanych w eksperymencie Gravity Probe B.

¹¹ Za wynalazcę żyroskopy uznaje się Léona Foucaulta (1819-1869), który w 1851 r. nie tylko skonstruował urządzenie do wizualizacji ruchu obrotowego, ale także zaproponował jego nazwę (utworzoną ze słów języka greckiego: *gyros* – obrót, *skopeo* – obserwować), która się przyjęła. Według niektórych biografów Foucaulta (S. D e l i g e o r g e s, *Foucault et ses pendules*, Paris 1990, passim) inspiracją były rozmowy przeprowadzone z matematykiem Louisem Poinsosem (1777-1859). Jednakże dużo wcześniej (1817 r.) podobną konstrukcję wykonał niemiecki profesor matematyki i astronomii na Uniwersytecie w Tybindze Johann Gottlieb Friedrich von Bohnenberger (1765-1831). Konstrukcja ta, zwana aparatem Bohnenbergera, była opisana i zilustrowana w katalogu wydanym na własny koszt przez amerykańskiego wytwórcę instrumentów optycznych (B. P i k e, *Illustrated Descriptive Catalogue of Optical, Mathematical and Philosophical Instruments: “Bohnenberger’s Machine”*, vol. 1, New York 1848, s. 142 (fig. 146). Ówczesna cena katalogowa tego instrumentu wynosiła 5 dolarów. W monografii poświę-

Od czasu kiedy Elmer Ambrose Sperry¹² (1860-1930) i niezależnie od niego Hermann Anschütz-Kaempfe¹³ (1872-1931) zaczęli przemysłową produkcję żyroskopów głównie do celów nawigacji¹⁴ nastąpił ogromny postęp w tej dziedzinie przede wszystkim wskutek szerokiego zastosowania żyroskopów w maszynach bojowych na morskich i powietrznych teatrach działań wojennych w czasie pierwszej i drugiej wojny światowej. Żyroskopy wykorzystane w eksperymencie Gravity Probe B musiały być zrobione z dokładnością przewyższającą wielokrotnie (milion razy) precyzję wykonania najlepszych żyroskopów dla potrzeb nawigacji. Pod względem geometrycznym są to prawie idealne kule i tym samym są najbardziej sferyczne obiekty jakie kiedykolwiek zostały wykonane w historii techniki. Wykonane z kwarcu i pokryte warstwą niobu o grubości 1,25 mikrometra kule mają średnicę 38

conej temu fizykowi jest cały rozdział na temat żyroskopu (A. A c z e l, *Wahadło. Léon Foucault i tryumf nauki*, Warszawa 2007, s. 117-121), ale Johann von Bohnenberger, a tym bardziej katalog Benjamina Pike'a, nie jest wspomniany ani razu.

¹² W 1910 r. na Brooklinie w Nowym Yorku założył Sperry Gyroscope Company, gdzie były produkowane żyrokomasy i żyrostabilizatory okrętowe. W 1918 r. jego syn Lawrence Sperry założył nowy oddział firmy Lawrence Sperry Aircraft Company, który produkował urządzenia nawigacyjne na potrzeby lotnictwa. Obie firmy połączyły się w 1924 r., tworząc Sperry Corporation. Tutaj też zostały opracowane pierwsze systemy naprowadzania użyte w tzw. latających bombach oraz tzw. autopilot. Po rozpadzie tej korporacji jej część (Sperry Flight Systems) wchodzi w skład koncernu Lockheed Martin, który wspólnie z Uniwersytetem Stanforda przeprowadza misję badawczą Gravity Probe B. Por. T. P. H u g h e s, *Elmer Sperry: Inventor and Engineer*, Baltimore 1971, passim.

¹³ W 1905 r. w pobliżu Kiel Anschütz-Kaempfe założył małą firmę produkującą urządzenia nawigacyjne wykorzystujące żyrokomasy. W następnym roku zaczął z nim współpracować jego kuzyn Maximilian Schuler (1882-1972), który okazał się nie tylko bardzo zdolnym inżynierem, ale także teoretykiem. Znany jest jako odkrywca tzw. zasady strojenia Schulera, która pozwala na adaptację bezwładnościowych systemów nawigacyjnych do elektronicznych systemów kontroli. Por. M. S c h u l e r, *Die Störung von Pendel und Kreiselapparaten durch die Beschleunigung des Fahrzeuges*, „Physikalische Zeitschrift” 24 (1923), s. 16.

¹⁴ Anschütz-Kaempfe skonstruował nowy typ obudowy żyroskopu, która zmieniała orientację przestrzenną do czasu, gdy oś główna żyroskopu ustawiła się równolegle do osi obrotu Ziemi. Było to urządzenie elektromechaniczne, które tworzyło historycznie pierwszy, ale niepełny system nawigacji bezwładnościowej. Tym sposobem udało się stworzyć prototyp urządzenia nawigacyjnego znanego współcześnie jako żyrokompas lub kompas żyroskopowy. Kiedy Sperry Gyroscope Company zaczęła produkować podobne urządzenia, niemiecki konstruktor skierował sprawę do sądu. Jednym z ekspertów w tej sprawie był Albert Einstein. Sprawa została wygrana przez Niemca, choć konstrukcja żyroskopu została opatentowana już w 1885 r. przez Martinusa van den Bosa, ale właściciel patentu nie zdołał nigdy zbudować prawidłowo działającego prototypu. Po latach Einstein w jednym z prywatnych listów (do E. Meyersona z 27 stycznia 1930 r.) napisał, że praca nad technicznymi raportami na temat żyrokompasów doprowadziła go do wyjaśnienia natury paramagnetyzmu. Por. P. G a l i s o n, *Dlaczego magnetyzm żelaznej sztabki absorbował Einsteina bardziej niż praca nad ogólną teorią względności?*, „Świat Nauki” 10 (2004), s. 46-49.

mm i wagą 63,5 g. Dzięki precyzji wykonania moment bezwładności pochodzący od niesferyczności powoduje precesję, która jest mniejsza niż 10^{-11} stopnia kąтового na godzinę¹⁵ (0,3 milisekundy kątowej na rok, $1,7 \times 10^{-12}$ radiana/h).

W trakcie projektowania eksperymentu pojawiały się jednak trudności finansowe w związku np. z dużą wagą aparatury badawczej, którą trzeba było umieścić na orbicie. Przykładowo w celu osłonięcia urządzeń przed czynnikami zakłócającymi pomiar natężenia pola magnetycznego generowanego przez rotujące żyroskopy zastosowano ołowianą osłonę wielkości dużej lodówki. W kosmos należało też wysłać 2,5 m³ nadciekłego helu. Całość ważyła ponad trzy tony. Satelita został umieszczony na orbicie biegunowej o promieniu 640 km. Zgodnie z obliczeniami skumulowana w ciągu roku precesja geodetyczna (precesja de Sittera) odchyła oś żyroskopu w płaszczyźnie orbity o kąt 6,6 sekundy. Precesja Schiffa związana z efektem wleczenia układów¹⁶ jest około dwa rzędy wielkości (100 razy) mniejsza. Jest to kąt w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny orbity. Skumulowany w ciągu roku osiąga wartość 39 milisekund kątowych.

O skali precyzji pomiarów może też świadczyć realizowana w trakcie trwania eksperymentu procedura orientacji osi żyroskopów. Układem odniesienia dla orbitujących żyroskopów była gwiazda podwójna HR8703 typu RS Cvn o średniej jasności wizualnej 5,6 magnitudo. Dzięki wysokiej klasy teleskopowi (reflektorowi) o średnicy lustra 14 cm mogła być ona obserwowana z dokładnością do 0,1 milisekundy kątowej. W celu uwzględnienia korekty związanej z ruchami własnymi gwiazd w galaktyce gwiazda ta były obserwowana także w radiowym zakresie widma elektromagnetycznego (3.6 cm = 8.4 GHz) przez urządzenia naziemne VLBI (Very Large Base Interferometer). Obserwowane pozycje gwiazdy były następnie porównywane ze

¹⁵ Dane pochodzą z artykułu: W.J. Bencze, M. E. Eglington, R.W. Brumley, S. Buchman, *Precision electrostatic suspension system for the Gravity Probe B relativity mission's science gyroscopes*, „Advances in Space Research” 39/2 (2007), s. 224-229.

¹⁶ Czasami w literaturze przedmiotu nazywa się ten efekt grawitomagnetycznym (*gravitomagnetic effect*) przez analogię do zjawisk opisywanych w klasycznej elektrodynamice. Analogia dotyczy równań OTW, które dla słabego pola grawitacyjnego są formalnie analogiczne do równań Maxwella. Analogia między OTW i elektrodynamiką badającą zjawiska elektromagnetyczne prowadzi do istnienia jeszcze tzw. efektu galwaniczno-grawitomagnetycznego (*galvano-gravitomagnetic effect*) – grawitacyjnego odpowiednika tzw. efektu (klasycznego i kwantowego) Halla, polegającego na pojawianiu się różnicy potencjałów w przewodniku wówczas, gdy płynie w nim prąd elektryczny i przewodnik znajduje się w poprzecznym do płynącego prądu polu magnetycznym. Por. B.J. Ahmedov, *General relativistic galvano-gravitomagnetic effect in current carrying conductors*, „Physics Letters” A 256 (1999), s. 9-14.

współrzędnymi odległego radiokwazara¹⁷. Warto też odnotować, że zostały uwzględnione takie możliwe źródła niepewności pomiarowej jak m.in. momenty obrotowe żyroskopów, odczyt z żyroskopów i odczyt z teleskopu.

4. TECHNICZNE I FINANSOWE PROBLEMY MISJI GRAVITY PROBE B

Eksperyment Gravity Probe B prowadzony jest na Uniwersytecie Stanforda w Laboratorium Fizyki Eksperymentalnej im. W.W. Hansena (Hansen's Experimental Physics Laboratory, HEPL). Dane spływają do Centrum Operacji Misji (Mission Operations Center, MOC), z którego poprzez anteny na Alasce i w Norwegii wychodzą komendy sterujące satelitą i jego urządzeniami. Istnienie takiego centrum jest dobrym argumentem na rzecz tezy, zgodnie z którą Gravity Probe B jest nie tylko obserwacyjnym, ale także eksperymentalnym testem OTW.

Założona precyzja pomiaru precesji Schiffa okazała się iluzoryczna. Pierwsze pomiary otrzymane w kwietniu 2007 r. obarczone były względnym błędem procentowym w przedziale 256-128%. Taka kolejność liczb pokazuje jak udawało się zmniejszyć względny błąd procentowy. Spodziewano się, że po usunięciu szumów uda się uzyskać dokładność ok. 13%, ale i te założenia okazały się zbyt optymistyczne¹⁸. Można powiedzieć, że najdłużej planowany i bardzo drogi eksperyment w kosmosie zakończył się fiaskiem. Interdyscyplinarny charakter tej misji spowodował jednak, że w trakcie jej trwania powstało na Uniwersytecie Stanforda 85 doktoratów oraz dodatkowo 14 poza uniwersytetem¹⁹.

W perspektywie filozofii nauki, a ściślej – ekonomii nauki, interesujące są kulisy finansowania tego projektu. Od pierwszych szkiców projektu eksperymentu do jego realizacji minęło ponad czterdzieści lat. Tak długi czas

¹⁷ R.R. Ransom, N. Bartel, M.F. Bietenholz, M.I. Ratner, D.I. Lebach, I.I. Shapiro, J.F. Lestrade, *VLBI Imaging and Astrometry of Gravity Probe B Guide Star HR 8703*, [w:] *Future Directions in High Resolution Astronomy: The 10-th Anniversary of the VLBI*, ed. J. Romney, M. Reid, San Francisco 2005, s. 506-510.

¹⁸ W lutym 2009 r. podano, że udało się potwierdzić oczekiwany efekt z niepewnością pomiarową 15%.

¹⁹ Do najbardziej interesujących doktoratów ukończonych na Uniwersytecie Stanforda możemy zaliczyć m.in.: W.J. Benz, *Gyroscope Spin Axis Direction Control for the Gravity Probe Satellite*, Stanford 1996; G.M. Gutt, *Enhancement, Analysis, and Verification of the DC SQUID Readout System for the Gravity Probe B Experiment*, Stanford 1996.

może być przedmiotem refleksji. Według Everitta na rekordowo długi czas planowania misji badawczej Gravity Probe B wpłynęła katastrofa Challengera w 1985 r. Wówczas kierownictwo NASA postanowiło ograniczyć umieszczanie satelitów na orbicie biegunowej, a takiej właśnie potrzebował eksperyment Gravity Probe B. Innym czynnikiem wydłużającym okres przygotowań było usztywnienie finansowania tego programu badawczego, wyrażające się w ustalaniu rocznych limitów, przy których trudno było prowadzić wiele działań równocześnie. Skutkowało to dezintegracją całego programu kosmicznego. Dziesięć razy program ten był skreślany z listy finansowanych programów i po pewnych ograniczeniach ponownie przyjmowany do finansowania. Wszystkie te działania miały swoje źródło w tym, że kierownictwo NASA – zdaniem Everitta – nigdy nie było przekonane do finansowania programów kosmicznych, których celem było eksperymentalne testowanie fundamentalnych teorii fizycznych.

W sytuacji ograniczenia wydatków na ten eksperyment ze strony NASA Everitt był zmuszony pozyskać wsparcie finansowe, wykorzystując to, że najmłodszy syn Williama Fairbanka, który był jednym z głównych pomysłodawców tego eksperymentu, jest założycielem i zarazem dyrektorem generalnym Capital One Financial. Richard Fairbank przekazał na finansowanie eksperymentu prywatny fundusz²⁰ w wysokości 512 tys. dolarów pod warunkiem, że jednak NASA i Uniwersytet Stanforda utworzą fundusz w wysokości 1 mln dolarów. Kwota ta w połowie 2008 r. okazała się niewystarczająca. Dodatkowego wsparcia udzielił wówczas książę dr Turki bin Saud bon Mohammed Al-Saud, który jest wiceprezesem instytutów badawczych w King Abdulaziz City for Science and Technology w Arabii Saudyjskiej. Ten członek saudyjskiej rodziny królewskiej studiował na Uniwersytecie Stanforda i napisał tam doktorat z aeronautyki i astronautyki. To właśnie dzięki niemu udało się zorganizować grant badawczy w wysokości 2,7 mln dolarów, który uratował program badawczy w jego finalnej fazie.

5. UWAGI KOŃCOWE

Z kończącej się misji badawczej Gravity Probe B można wyciągnąć kilka wniosków. 1) Przede wszystkim należy zauważyć wielką dysproporcję między nakładami finansowymi a zrealizowanymi celami misji. Główny cel nie został osiągnięty, natomiast cele pośrednie były do osiągnięcia za pomocą

²⁰ Pieniądze te pozwoliły kontynuowanie numerycznej analizy danych do 30 września 2008 r.

mniej kosztownych eksperymentów²¹. 2) Eksperyment Gravity Probe B pokazał jak wielostronne i skomplikowane są zależności wiedzy przyrodniczej zwłaszcza z zakresu podstawowych teorii fizycznych od poziomu techniki, wiedzy inżynierskiej i stopnia integracji nowych technologii. 3) Projekt badawczy Gravity Probe B dowiódł, że obok obserwacyjnych możliwe są również eksperymentalne testy Ogólnej Teorii Względności oraz to, że teoria ta, która w niedługim czasie będzie mieć sto lat, jest coraz lepiej potwierdzona. 4) Projekt badawczy Gravity Probe B dowodzi, że finansowane są nawet najbardziej kosztowne eksperymenty o małym znaczeniu praktycznym, ale wielkim znaczeniu teoretycznym, polegającym na potwierdzeniu głównych teorii z zakresu fizyki.

BIBLIOGRAFIA

- A c z e l A.: Wahadło. Léon Foucault i tryumf nauki, Warszawa: Prószyński i S-ka 2007.
- A h m e d o v B.J.: General relativistic galvano-gravitomagnetic effect in current carrying conductors, „Physics Letters” A 256 (1999), s. 9-14.
- B e n c z e W.J., E g l i n g t o n M.E., B r u m l e y R.W., B u c h m a n S.: Precision electrostatic suspension system for the Gravity Probe B relativity mission’s science gyroscopes, „Advances in Space Research” 39/2 (2007), s. 224-229.
- C o l e s P.: Einstein and the Birth of Big Science, Cambridge: Icon Books 2000.

²¹ Takie stanowisko można znaleźć w najnowszych publikacjach, gdzie zwraca się uwagę na to, że do pomiaru precesji Schiffa nie jest konieczne modelowanie tego zjawiska za pomocą żyroskopów, gdyż można użyć do tego celu naturalnych satelitów (precesja peryhelium planet wewnętrznych: Merkurego lub Wenus), albo skonstruować inny typ próbnika grawitacyjnego. Proponuje się także wykorzystanie bezzałogowej sondy kosmicznej (Mars Global Surveyor), która znajduje się na prawie biegunowej orbicie Marsa, do pomiaru efektu wleczenia układów inercjalnych dla pola grawitacyjnego Marsa. Na przełomie 2009 i 2010 r. Włoska Agencja Kosmiczna ASI we współpracy z Narodowym Instytutem Fizyki Nuklearnej NFN (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare) oraz Uniwersytetem Rzymskim i Uniwersytetem Lecce planuje umieszczenie satelity LARES (LAsER RElativity Satellite), którego zadaniem jest zmierzenie precesji Schiffa z dokładnością do 1%. W eksperymencie mają zostać wykorzystane najnowszej generacji dalmierze laserowe. Z uwagi na to, że będzie znajdować się on na niskiej orbicie polarnej i będzie stosunkowo niewiele ważyć (poniżej 1500 kg), koszt tego przedsięwzięcia ma być o wiele mniejszy (ok. 15 mln dolarów) niż misji Gravity Probe B. Por. m.in. L. I o r i o, *Recent Attempts to Measure the General Relativistic Lense–Thirring Effect with Natural and Artificial Bodies in the Solar System*, „Proceedings of Science” 017 (2009), s. 1-31. Taka możliwość została zauważona jeszcze w trakcie planowania misji Gravity Probe B. Por. m.in. I. C i u f o l i n i, D.M. L u c c h e s i, F. V e s p e, A. M a n d i e l l o, *Measurement of Dragging of Inertial Frames and Gravitomagnetic Field Using Laser-Ranged Satellites*, „Il Nuovo Cimento A” 109 (1996), s. 575-590; I. C i u f o l i n i, *On a new method to measure the gravitomagnetic field using two orbiting satellites.*, „Il Nuovo Cimento A” 109 (1996), s. 1709-1720.

- Ciufolini I.: On a new method to measure the gravitomagnetic field using two orbiting satellites, „*Il Nuovo Cimento A*” 109 (1996), s. 1709-1720.
- Deligeorges S.: Foucault et ses pendules, Paris: Éditions Carré 1990.
- Embacher F.: Mach, Thirring & Lense, Gödel – getting dizzy in space-time, „*Journal of Physics: Conference Series*” 82 (2007), s. 1-6.
- Everitt C.W.F.: James Clerk Maxwell: Physicist and Natural Philosopher, New York: Charles Scribner’s Sons 1975.
- Maxwell’s Scientific Papers, „*Applied Optics*” 6 (1967), s. 639.
- Galison P.: Dlaczego magnetyzm żelaznej sztabki absorbował Einsteina bardziej niż praca nad ogólną teorią względności?, „*Świat Nauki*” 10 (2004), s. 46-49.
- Gavroglou K.: Fritz London: a scientific biography, Cambridge: Cambridge University Press 1995.
- Hughes T.P., Elmer Sperry: Inventor and Engineer, Baltimore: Johns Hopkins University Press 1971.
- Iorio L.: Recent Attempts to Measure the General Relativistic Lense–Thirring Effect with Natural and Artificial Bodies in the Solar System, „*Proceedings of Science*” 017 (2009), s. 1-31.
- Johnson P.: Modern Times Revised Edition: The World from the Twenties to the Nineties, New York: Harper Collins Publishers Inc. 2001.
- Lawrance A.: Modern Inertial Technology. Navigations, Guidance, and Control, New York: Springer Verlag 1998.
- Lense J.: Thirring, H., Über den Einfluss der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie, „*Physikalische Zeitschrift*” 19 (1918), s. 156-163.
- Lew J.: Sto wcieleń żyroskopu, Warszawa: Wydawnictw MON 1963.
- Lipa J.A., Everitt C.W.F.: The role of cryogenics in the gyroscope experiment, „*Acta Astronautica*” 5 (1978), s. 119-123.
- London F.: Superfluids, vol. 1, New York: Wiley and Sons 1950; vol. 2, New York: Wiley and Sons 1954.
- London F., London H.: The electromagnetic equations of the supraconductor, „*Proceedings of the Royal Society*”. A Mathematical, Physical and Engineering Sciences 149 (1935), s. 71-88,
- Okta W.: Historia teorii eksperymentu, Lublin: LTN 2002.
- Maxwell on Heat and Statistical Mechanics, ed. E. Garber, S.G. Brush, C.W.F. Everitt, London: Associated University Press 1995.
- Maxwell on Saturn’s Rings, ed. S.G. Brush, C.W.F. Everitt, E. Garber, MIT Press 1983.
- Pike B.: Illustrated Descriptive Catalogue of Optical, Mathematical and Philosophical Instruments: “Bohnenberger’s Machine”, vol.1, New-York 1848.
- Schiff L.: Possible new experimental test of general relativity theory, „*Physical Review Letters*” 4 (1960), s. 215-217.
- Motion of a Gyroscope According to Einstein’s Theory of Gravitation, W: Nonlinear Gravitodynamics, The Lense-Thirring Effect, A documentary introduction to current research, ed. J. Ruffini, Costantino 1960, s. 427-438.
- Schuler M.: Die Störung von Pendel und Kreiselapparaten durch die Beschleunigung des Fahrzeuges, „*Physikalische Zeitschrift*” 24 (1923), s. 16.
- Stuwer R.H.: Physicist-Historians [w:] Positioning the History of Science, ed. K. Gavroglou, J. Renn, Dordrecht: Springer 2007, s. 169-172.
- Thirring H.: Über die Wirkung rotierender ferner Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie, „*Physikalische Zeitschrift*” 19 (1918), s. 33.

— Berichtigung zu meiner Arbeit: „Über die Wirkung rotierender Massen in der Einsteinschen Gravitationstheorie“, „Physikalische Zeitschrift“ 22 (1921): 29.

Vessot R.F.C. [et al.]: Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser, „Physical Review Letters” 45 (1980), s. 2081-2084.

THE EXPERIMENTAL TEST
OF GENERAL THEORY OF RELATIVITY

S u m m a r y

Space-based experiments in fundamental physics are presently capable of uniquely addressing important questions related to the fundamental laws of nature. In this article we discuss the advances in our understanding of fundamental physics that recently proposed space-based gravitational experiment such as Gravity Probe B Space Research Mission. Gravity Probe B is a satellite that will check two predictions of the general theory of relativity: the geodetic effect and so-called frame-dragging or Lense-Thirring effect. The purpose of this article is to describe the results that have been obtained in Gravity Probe B mission from the point of view of the history and philosophy of science. This article discusses also a problem of the financial challenges for the GP-B team.

Translated by Zenon E. Roskal

Słowa kluczowe: Gravity Probe B (GP-B), ogólna teoria względności (OTW), historia nauki, filozofia nauki.

Key words: Gravity Probe B (GP-B), General Theory of Relativity (GTR), history of science, philosophy of science.

Information about Author: Prof. Dr. ZENON E. ROSKAL – Department of Philosophy of Inanimate Nature, Faculty of Philosophy, The John Paul II Catholic University of Lublin; address for correspondence: Al. Raławickie 14, PL 20-950 Lublin; e-mail: kronos@kul.lublin.pl