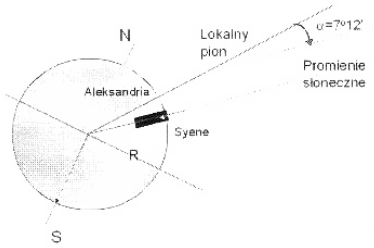
ROZWÓJ POGLĄDÓW NA KSZTAŁT ZIEMI[1]

Jacek Szubiakowski
Olsztyńskie Planetarium i Obserwatorium Astronomiczne

Obserwując ciała niebieskie, które z oczywistych względów nie mogły stanowić części Ziemi, ludzie doszli do wniosku, że Ziemia ma skończone rozmiary. Wczesne kosmologie traktowały Ziemię jako płaski ląd otoczony wodami i przykryty sferą niebieską. Za płaskim kształtem Ziemi przemawiały argumenty zdroworozsądkowe, takie jak wygląd powierzchni Ziemi czy problem antypodów. Łacińskie słowo *antipodes* znaczące tyle co „do góry nogami" i odnosi się do ludów hipotetycznie zamieszkujących przeciwną stronę kulistej Ziemi. Jednakże, w przeciwieństwie do powszechnego przekonania, akceptacja faktu kulistości Ziemi w środowisku naukowym nastąpiła już około I wieku AD. Można więc powiedzieć, że kulisty kształt Ziemi jest pojęciem ugruntowanym w nauce od dwóch tysięcy lat. Pierwszym uczonym, który postulował kulisty kształt nieba i Ziemi był Pitagoras (572–497 lat BC). Pitagorejski Wszechświat złożony był z umieszczonej centralnie sferycznej Ziemi, wirującej dokoła ustalonej osi i otaczających ją ciał niebieskich, znajdujących się na sferach rozmieszczonych w przestrzeni, w odległościach określonych przez bryły regularne. Aby uzasadnić tę ideę, Pitagoras użył argumentów estetycznych, takich jak harmonia i symetria [1]. W podobny sposób argumentował Platon: „Ponieważ sfera jest kształtem doskonałym, Ziemia musi być sferyczna".

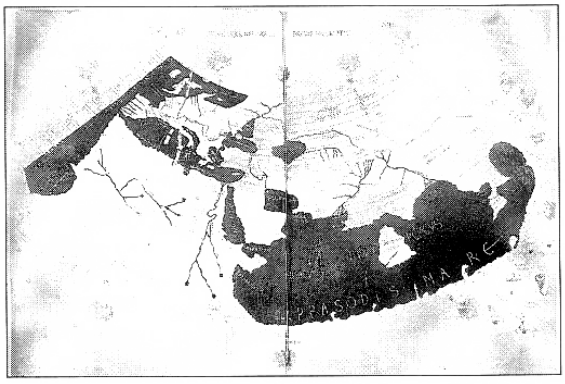
Arystoteles (384–322 BC), najznamienitszy uczeń Platona, dla rozstrzygnięcia kwestii kulistego kształtu Ziemi odwołał się do wyniku obserwacji zaćmienia Księżyca. Według niego Ziemia powinna być sferą, ponieważ rzuca kolisty cień, podczas gdy Księżyc przechodzi przez stożek jej cienia. Sfera jest jedyną bryłą, która zawsze, niezależnie od swej orientacji, rzuca kolisty cień. Arystotelesowi zawdzięczamy także podział globu na pięć stref klimatycznych: strefy zimnego klimatu w pobliżu biegunów, strefę bardzo gorącego klimatu w pobliżu równika i znajdujące się pomiędzy nimi strefy umiarkowanego klimatu, umożliwiającego zamieszkiwanie tam ludzi.

Eratostenes (276–196 BC), grecki astronom i matematyk pracujący w Bibliotece Aleksandryjskiej, jako pierwszy w historii nauki oszacował rozmiary Ziemi, porównując w dniu przesilenia letniego wysokość Słońca w dwu miejscowościach: Aleksandrii i Syene (Rys. 1). W dniu przesilenia letniego w Syene Słońce góruje w zenicie, podczas gdy w znajdującej się dalej na północ Aleksandrii Słońce góruje odchylone 1/50 kąta pełnego od zenitu (α=7°12'). Eratostenes oszacował odległość między tymi miastami na d = 5 tys. stadiów. A więc wędrując na północ obserwowalibyśmy zmniejszanie się wysokości górowania Słońca o około 1° na 700 stadiów. Korzystając z prostej proporcji: $D/d = 2\pi/\alpha$, Eratostenes oszacował długość obwodu Ziemi na D=250 tys. stadionów. Dokonał tego z nadzwyczajną dokładnością, chociaż wartość jednostki miary użytej przez Eratostenesa jest często poddawana w wątpliwość. Długość najczęściej stosowanego attycznego stadionu wynosiła około 185 m, co dawałoby obwód Ziemi równy 46250 km, a więc zbyt duży, różniący się o 16% od wyników dzisiejszych pomiarów. Natomiast jeśli Eratostenes użył wymiaru egipskiego stadionu o długości jedynie 157,5 m, to obwód Ziemi wyniósłby 39375 km, a więc błąd byłby mniejszy niż 1% [2]. Pomiary rozmiarów Ziemi powtarzane były jeszcze wielokrotnie.



Rys. 1. Idea pomiaru promienia Ziemi wykorzystana przez Eratostenesa

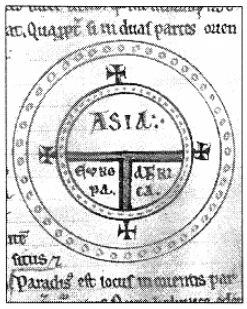
Klaudiusz Ptolemeusz (90–168 AD), wybitny matematyk, geograf i astronom starożytności, podsumował dokonania starożytnych w zakresie astronomii i geografii. W swym dziele zatytułowanym „Geographike Hyphegesis" (Rys. 2), prezentuje wiele map świata. Mapy te wykonano na bocznej powierzchni stożka, co wskazuje na akceptację przez Ptolemeusza idei sferycznej Ziemi. Ptolemeusz jako pierwszy zastosował linie współrzędnych geograficznych. Szerokość geograficzna była, tak jak i dzisiaj, mierzona od równika, lecz Ptolemeusz wyrażał ją nie w stopniach miary kątowej, a poprzez długość dnia przesilenia letniego występującą na danym równoleżniku. Wzrasta ona od 12 godzin na równiku do 24 godzin na kręgu polarnym. Południk o długości zero Ptolemeusz ulokował na jednej z Wysp Kanaryjskich – położonego najdalej na zachód lądu znanego w starożytności [3].



Rys. 2. Rekonstrukcja mapy świata z *Geographia* Ptolemeusza (ok. 150 roku)

[1] Od Redakcji: Wykład ten został wygłoszony również w ramach Narodowego Seminarium projektu HIPST, które odbyło się w dniu 11.09.2009 r. w Olsztyńskim Planetarium.

Wiedza o sferycznym kształcie Ziemi była także akceptowana w okresie wczesnego średniowiecza. Ówczesny obraz świata był prezentowany w formie map T i O (Rys. 3). Po raz pierwszy taka struktura Ziemi opisana została w VII w. przez Izydora z Sewilli w dziele „Etymologiae". W rozdziale 14, „De terra et partibus" pisze on *„The [inhabitated] mass of solid land is called round after the roundness of a circle, because it is like a wheel [...] Because of this, the Ocean flowing around it is contained in a circular limit, and it is divided in three parts, one part being called Asia, the second Europe, and the third Africa."* Mapa typu T i O przedstawia jedynie północną połowę sferycznej Ziemi. Średniowieczne dysputy koncentrowały się na kwestii, czy wszystkie części świata są zamieszkiwane. Izydor dopuszczał możliwość zamieszkiwania ludzi na antypodach, lecz jednocześnie stwierdzał, że nie ma na to dowodów.



Rys. 3. Mapa typu T i O z *Etymologiae* Izydora z Sewilli (ok. 560–636), wydanie Guntherus Ziner, Augsburg, 1472 rok

Święty Augustyn (354–430 AD) twierdził, że antypody nie są lądem zamieszkałym i uzasadniał to następująco: *„But as to the fable that there are Antipodes, that is to say, men on the opposite side of the earth, where the sun rises when it sets to us, men who walk with their feet opposite ours, that is on no ground credible. [...] it is too absurd to say, that some men might have taken ship and traversed the whole wide ocean, and crossed from this side of the world to the other, and that thus even the inhabitants of that distant region are descended from that one first man.* [4]"

Jako przedstawiciela poglądów z okresu przełomu średniowiecza i czasów nowożytnych przywołać można Mikołaja Kopernika (1473–1543), który uczynił Ziemię jedną z planet. Powtórzył on za Arystotelesem, że „Ziemia wraz z otaczającymi ją wodami powinna mieć taki kształt [sferyczny] jaki ujawnia jej cień, kiedy zaćmiewa ona Księżyc łukiem doskonałego koła" [5]. Obecnie może budzić zdziwienie przywoływanie argumentów starożytnego filozofa, po wynalezieniu teleskopu i po odkryciach Galileusza. Powszechnie dziś wiadomo, że planety są sferyczne. Spłaszczenie Jowisza wynoszące 1/16, a Saturna prawie 1/10 można dostrzec nawet niewielkim teleskopem jakiego używał Galileusz, lecz w czasach Kopernika nie można było użyć podobnego argumentu. Dlatego Kopernik posługując się fizyką Arystotelesa w następujący sposób uzasadniał sferyczność Ziemi: „Ziemia jest także sferyczna, ponieważ naciska ona na swój środek z każdego kierunku"[5]. Ściśle rzecz biorąc, takie stwierdzenie stwarzało problem w przypadku modelu heliocentrycznego, ponieważ Ziemia nie stanowiła już centrum świata, więc dlaczego wszystkie elementy materii miałyby ciążyć ku niej?

Henryk Żeglarz (1394–1460) – infant portugalski, gubernator prowincji Algrave (Rys. 4). Ustanowił on pierwszą szkołę dla żeglarzy, w której nauczano nawigacji, kartografii i budowy okrętów. Patronował pracom nad innowacjami technicznymi dotyczącymi żeglugi, dzięki nim opracowano nowy typ statku – karawelę, która umożliwiła szybsze i dalsze podróże morskie.

Rys. 4. Henryk Żeglarz (1394–1460) – patron rozwoju floty portugalskiej, założyciel uniwersytetu w Lizbonie oraz szkoły kartografii i astronomii w Sagres, uznawanej za pierwszą akademię morską na świecie

Organizował morskie wyprawy odkrywcze wzdłuż zachodnich wybrzeży Afryki, które dotarły m.in. do Azorów, Madery, Wysp Zielonego Przylądka. W roku 1486 portugalski żeglarz Bartolomeu Dias płynąc wzdłuż wybrzeży Afryki odkrył Przylądek Dobrej Nadziei, a następnie odkrył morską drogę do Indii. Działalność Henryka Żeglarza zapoczątkowała portugalską ekspansję morską oraz erę wielkich odkryć geograficznych. Pod koniec XV w. poznany świat znacznie się poszerzył. Naiwne przekonanie Kolumba, że Ziemia podzielona jest na dwie równe części: ocean i kontynent stanowiło inspirację do zorganizowania ekspedycji do Indii, do których zamierzał dotrzeć poprzez Ocean Atlantycki, żeglując wzdłuż równoleżnika i pewnie by mu się to udało, gdyby na jego drodze nie znalazła się Ameryka. W ten sposób zamiast nowej drogi do Indii w roku 1492 Kolumb odkrył Nowy Świat.

W 1519 roku z portu San Lucar wypłynęła flotylla pięciu statków pod wodzą Ferdynanda Magellana. Z pięciu statków, które wyruszyły w podróż, po prawie trzech latach żeglugi powrócił tylko jeden z 18-osobową załogą i bez Magellana. Podróż Magellana dała ostateczny dowód na kulistość Ziemi oraz zmieniła wyobrażenia na temat jej rozmiarów. [6] Wyczyn Magellana opłynięcia Ziemi powtórzyli – Francis Drake, Thomas Cavendish, Simon de Cordes i wielu innych. Co ciekawe, najłatwiejszym sposobem opłynięcia świata jest żegluga z wiatrem z zachodu na wschód, podczas gdy pierwsze wyprawy wyruszały w kierunku zachodnim wokół Ameryki Południowej.

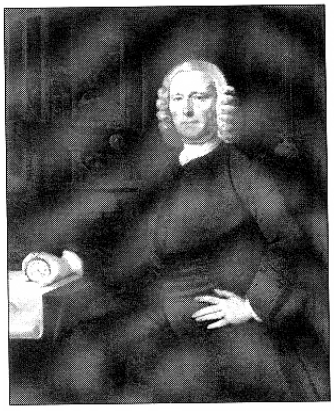
W następstwie intensywnego rozwoju żeglugi, będącego skutkiem rozwoju handlu egzotycznymi przyprawami, w XVI wieku pojawiły się dwa praktyczne problemy, które wymagały pilnego rozwiązania. Pierwszym była konieczność opracowania metod sporządzania dokładnych map, drugim niezawodne metody nawigacji oceanicznej. Postęp w obydwu tych dziedzinach uzależniony był od umiejętności wyznaczenia z odpowiednią dokładnością pary współrzędnych: szerokości i długości geograficznej dla dowolnego punktu na powierzchni Ziemi. Określenie szerokości geograficznej jest stosunkowo proste, wystarczy zmierzyć wysokość Gwiazdy Polarnej lub innego ciała niebieskiego. Natomiast wyznaczenie długości geograficznej, czyli odległości w kierunku wschód – zachód, jest znacznie bardziej złożonym problemem, szczególnie na oceanie. W zależności od długości geograficznej w tym samym momencie czasu obserwator będzie widział inny fragment sfery niebieskiej. W chwili gdy wybija godzina 18 w Londynie, w Kalkucie znajdującej się 90° na wschód jest północ, a u wybrzeży Ameryki leżących 90° na zachód jest właśnie południe. Kluczem do rozwiązania problemu długości geograficznej jest więc znajomość dokładnego czasu. Mając na pokładzie zegar, który jest w stanie przechować dokładny

czas obowiązujący w porcie macierzystym i potrafiąc z położenia słońca i gwiazd wyznaczyć czas lokalny można obliczyć długość geograficzną miejsca obserwacji. Jak dokładny powinien być taki zegar? Zauważmy, że jednej godzinie odpowiada 1668,39 km obwodu Ziemi, a jednej minucie 27,81 km. Zegar powinien więc zachowywać sekundową dokładność w przeciągu miesięcy, niezależnie od kołysania statku i pogody. Niestety, do XVI w. zegary mechaniczne nie były dostatecznie precyzyjne, a co gorsze nie nadawały się do morskich podróży.

Władcy państw pretendujących do panowania na morzach i oceanach rozpisywali konkursy, mające na celu rozwiązanie tego problemu. Kiedy król Hiszpanii Filip III zaoferował nagrodę za znalezienie metody wyznaczania długości geograficznej okrętu, znajdującego się z dala od brzegu, Galileo zaproponował metodę określania czasu, opartą na obserwacjach momentów zaćmień księżyców jowiszowych (Rys. 5). Galileusz obserwował ruch księżyców Jowisza od stycznia 1610 roku. Przez dwa kolejne lata sporządzał on tabele położeń tych satelitów i doszedł do wniosku, że księżyce Jowisza mogłyby posłużyć jako dokładny astronomiczny zegar, mogący rozwiązać problem wyznaczania długości geograficznej.

Systematyczne obserwacje ruchu Io, najbliższego Jowiszowi księżyca galileuszowego, przeprowadzone w roku 1676 przez duńskiego astronoma Ole Römera w Obserwatorium Paryskim wykazały, że z miesiąca na miesiąc momenty zaćmień Io opóźniały się coraz bardziej w porównaniu z przewidywanymi, a w drugiej połowie roku zaczęły ponownie przyśpieszać i w końcu powróciły do sytuacji wyjściowej. Na podstawie tych wyników, Römer doszedł do wniosku, że zjawisko to spowodowane było skończoną prędkością światła, które potrzebuje około 22 minut na przebycie odległości równej średnicy orbity ziemskiej. Odkrycie to stanowiło uboczny rezultat tych obserwacji.

W roku 1656 Christiaan Huygens opatentował zegar wahadłowy, który znacznie poprawił dokładność pomiarów czasu. On również zainteresował się problemem wyznaczania długości geograficznej. Był przekonany, że horologiczne podejście (horologia – nauka o badaniu czasu i budowie przyrządów do mierzenia czasu) polegające na zbudowaniu morskiego zegara, którego chód byłby na tyle regularny, że utrzymywałby on przez wiele miesięcy dokładny czas, niezależnie od pogody i ruchu okrętu, jest najlepszym rozwiązaniem problemu wyznaczania długości geograficznej. W latach 1662–1687 Huygens budował zegary morskie różnych konstrukcji, które były następnie poddawane próbom na morzu.



Rys. 6. John Harrison (1693–1776) zegarmistrz samouk, zdobywca nagrody wyznaczonej przez parlament brytyjski dla autora, dającej się zastosować w nawigacji, metody określania długości geograficznej

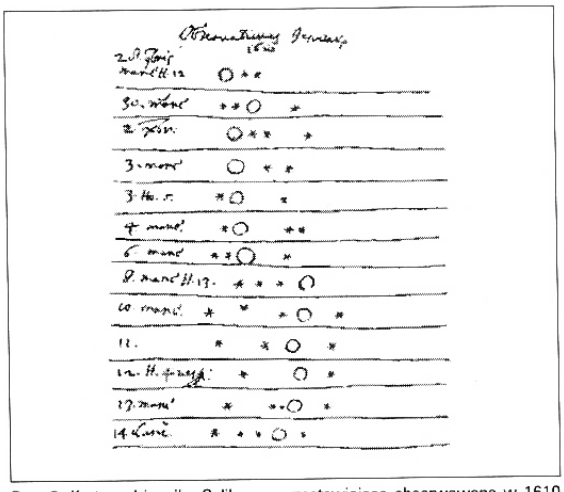
„The Art of Navigation is to be perfected by the Solution of this Problem. To find, at any Time, the Longitude of a Place at Sea. A Public Reward is promised for the Discovery. Let him obtain it who is able.", Bernhard Varenius („Geographia Generalis", 1650).

W roku 1714 brytyjski parlament ustanowił nagrodę tzw. „Longitude Act" dla wynalazcy prostej i praktycznej metody określania długości geograficznej statku. Suma nagrody zależała od dokładności zaproponowanej metody. W najbardziej rygorystycznym przypadku nagroda wynosiła 20 tys. funtów, a warunki konkursu dopuszczały błąd wskazań zegara nie większy niż 2 minuty. Odpowiada to lokalizacji statku z dokładnością 30 mil morskich, czyli 56 km. John Harrison (1693–1776) zegarmistrz samouk wziął udział w tym konkursie (Rys. 6).

Pierwszy zbudowany przez niego chronometr ważył 34 kg i miał rozmiary szafy. Dopiero czwarty model zegara morskiego miał rozmiary dużego zegarka kieszonkowego Zegar ten pod koniec roku 1761 na pokładzie okrętu HMS Deptford wyruszył w rejs z Portsmouth do Kingston na Jamajce, celem tego rejsu było przetestowanie przydatności zegara do pomiaru długości geograficznej. Maksymalny błąd chronometru w czasie rejsu nie przekroczył 1 minuty i 15 sekund. Mimo takiego rezultatu Harrison otrzymał jedynie połowę nagrody. Dopiero w roku 1773, po interwencji króla Jerzego III otrzymał drugą jej połowę [7].

Zapoczątkowana przez Kopernika rewolucja naukowa sprawiła, że nauka stała się częścią infrastruktury nowoczesnego państwa. Pod koniec XVI w. uprawianie nauki zostało bardziej sformalizowane, powstały towarzystwa naukowe, w Londynie The Royal Society, a w Paryżu L'Academie Royale des Sciences. Obserwatoria astronomiczne w Paryżu i w Greenwich stały się centrami intensywnych działań mających na celu sporządzanie dokładnych map ziemskiego globu i dokładnych pomiarów jego powierzchni. Obserwatorium Astronomiczne w Greenwich zbudowane zostało przez króla Karola II w 1675 roku. W późniejszych latach kierowali nim John Flamsteed, a następnie Edmond Halley (w 1720 r.). Obserwatorium to służyło wówczas do pomiarów astrometrycznych, przydatnych w nawigacji oceanicznej.

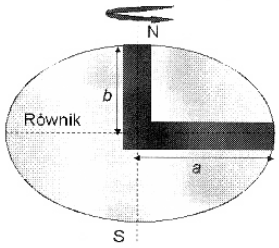
W roku 1634, Cardinal-Duc de Richelieu posługując się podobnymi jak Ptolemeusz argumentami zadecydował, że –



Rys. 5. Karta z dziennika Galileusza przestawiająca obserwowane w 1610 roku zmiany położeń czterech największych księżyców Jowisza: Io, Europy, Ganimedesa i Calisto

El Hierro – najdalej na południowy zachód wysunięta wyspa archipelagu Kanaryjskiego na oceanie Atlantyckim – powinna być używana w kartografii jako południk odniesienia (Ferro's meridian). W roku 1669, francuski astronom Jean Picard (1620–82) wykonał pierwsze pomiary długości południka. Jako pierwszy do wyznaczenia szerokości geograficznej, a także do pomiaru kątów w triangulacji posłużył się teleskopem wyposażonym w krzyż nitek i śrubę mikrometryczną. Wykonane przez niego pomiary południka paryskiego składały się z 13 trójkątów i rozciągały się od Paryża do wieży zegarowej w Sourdon, w pobliżu Amiens znajdującej się 1.2° na północ. Zmierzona przez Picarda długość łuku na globie ziemskim odpowiadająca 1° pozwoliła wyznaczyć promień Ziemi r=6328.9 km [8]. Wynik ten miał ogromne znaczenie dla rozwoju nauki. Tę właśnie wartość Newton wykorzystał w swojej teorii grawitacji, a francuscy kartografowie przez ponad 200 lat używali jako odniesienia wyznaczonego przez Picarda paryskiego południka: w służbie czasu do roku 1911, a na potrzeby nawigacji aż do roku 1914. Siatki geograficzne starych map na kontynencie europejskim posiadały na górze oznaczenia oparte na południku paryskim, na dole nawiązując do południka Ferro oznaczenia siatki były przesunięte o ok. 20 stopni.

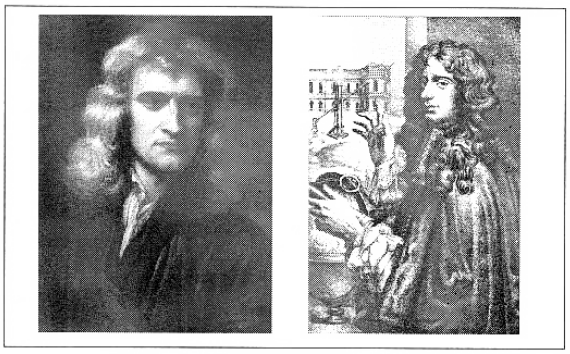
Rozważając siłę grawitacji i siłę odśrodkową działające na element bryły Ziemi, Newton (1642–1727) doszedł do wniosku, że Ziemia nie jest doskonale sferyczna (Rys. 7). W dziele „Philosophiae Naturalis Principia Mathematica" (1687) twierdził, że glob ziemski, posiada zgrubienie wokół równika, jak spłaszczona elipsoida obrotowa. Kształt taki powstaje w wyniku obrotu elipsy wokół jej krótszej osi. A więc, podobnie jak dla pomarańczy, biegunowy promień Ziemi b powinien być krótszy niż promień a mierzony w płaszczyźnie równika. Przy założeniu jednorodności globu ziemskiego, wedle Newtona spłaszczenie zdefiniowane jako $\varepsilon=(a-b)/a$ powinno mieć wartość $\varepsilon\approx1/230$ [9].



Rys. 7. Przedstawiony przez Newtona mechanizm powstawania spłaszczenia globu ziemskiego na skutek działania siły odśrodkowej

Huygens również był zwolennikiem teorii o „spaczającym" działaniu siły odśrodkowej na bryłę Ziemi. Jednakże francuscy uczeni pozostawali sceptyczni. Poza Voltairem, Newton (Rys. 8a) nie miał zbyt wielu zwolenników we Francji. Dominowały tu nadal teorie fizyczne autorstwa René Descartes'a. Ich zwolennicy utrzymywali, że planety są pociągane w ich ruchu dookoła Słońca przez wiry materii, a nie przez siłę newtonowskiej grawitacji, która była przez nich uważana za pojęcie z pogranicza magii, ponieważ miała działać na odległość poprzez pustą przestrzeń.

Zaininicjowane przez Picarda pomiaru południka paryskiego kontynuowane były przez astronomów francuskich: Gian Domenico Cassiniego i jego syna Jacques'a Cassiniego



Rys. 8 a i b. Izaak Newton (1642–1727) i Jacques J. Cassini (1677–1756), adwersarze w sporze o kształt Ziemi

(Rys. 8b), którzy rozciągnęli je od strony północnej aż po Dunkierkę, a od strony południowej do granicy z Hiszpanią. Opublikowane w roku 1720 wyniki tych pomiarów wskazywały, że długość 1° południka mierzona na północ od Paryża jest o 265 m krótsza niż odpowiadająca mu długość mierzona na południe od Paryża. Taki wynik sugerował, że Ziemia jest elipsoidą obrotową wydłużoną w kierunku biegunów, zgodnie z czym równikowy promień Ziemi powinien być krótszy od biegunowego. Twierdzenie to było w całkowitej sprzeczności z wnioskami płynącymi z pracy Newtona [10].

Pomiędzy Akademią a Towarzystwem Królewskim wywiązała się zażarta dyskusja nad problemem, czy odstępstwo Ziemi od kształtu kulistego jest zbliżone do cytryny czy też pomarańczy? Francuzi optowali za kształtem elipsoidy wydłużonej w kierunku biegunów jak cytryna (prolate). Anglicy, posługując się mechaniką newtonowską i prawem powszechnej grawitacji byli zdania, że glob ziemski jest spłaszczony przy biegunach jak pomarańcza (oblate). Chcąc przekonać swoich adwersarzy Newton zaproponował następujący „thought experiment" (eksperyment myślowy): *„Imagined two wells going down to the center of the Earth: one drilled from the North Pole, and one drilled from the equator, both filled with water. The water in the equatorial well is subject to the centrifugal force, and the water in the Polar well is not. For the two columns of water to be in equilibrium, it follows that the equatorial well must be longer."* Francuz Jean Richter (1696), podczas ekspedycji do Cayenne, w Gujanie Francuskiej zauważył, że zegar wahadłowy, który był wyregulowany w Paryżu co do sekundy, w Cayenne spóźniał się około 2,5 minuty dziennie. Zgodnie z teorią Newtona zjawisko to potwierdzało hipotezę o wpływie rotacji Ziemi na lokalną wartość pola grawitacyjnego.

Jednakże definitywne rozstrzygnięcie tej kontrowersji można było osiągnąć jedynie poprzez wykonanie pomiarów długości wybranego południka w różnych miejscach ziemskiego globu. Jacques J. Cassini (1677–1756), będący wówczas pierwszym dyrektorem Obserwatorium Paryskiego będąc przekonanym, że Ziemia, podobnie jak cytryna, ma kształt wydłużony w kierunku biegunów, zaproponował, aby wykonać dwa pomiary łuku tego samego południka o mierze jednego stopnia. Jeden z pomiarów należało wykonać w pobliżu bieguna, a drugi w pobliżu równika. Punkty końcowe obu jednostopniowych odcinków łuku południka powinny być wyznaczone metodą astronomiczną, a ich długości miały być określone metodą triangulacji. Jeśli Ziemia jest rzeczywiście spłaszczona u biegunów, łuk mierzony w pobliżu bie-

Rys. 9 a i b. Bouguer i Pierre Louis Moreau de Maupertuis dowodzący wyprawami badawczymi do Peru i do Laponii, które miały rozstrzygnąć spór o kształt Ziemi

gunów powinien być dłuższy niż jego odpowiednik mierzony w pobliżu równika.

W 1735 roku Francuska Akademia Nauk wysłała pierwszą wyprawę badawczą w okolice równikowe Real Audiencia de Quito (obecnie jest to Ekwador). W skład wyprawy wchodzili: astronom Louis Godin, Pierre Bouguer (Rys. 9a) i Charles Marie de la Condamine. Ich zadaniem było zmierzenie łuku w okolicach 37°. Następnego roku, w okolice północnego koła podbiegunowego w Laponii (w pobliżu granicy Szwecji i Finlandii), wyruszyła druga wyprawa. Wyprawą kierował matematyk Pierre Louis Moreau de Maupertuis (Rys. 9b), a jej zadaniem było dokonanie pomiaru jednostopniowego łuku na szerokości 57°.

Maupertuis w sierpniu 1737 powrócił do Paryża jako pierwszy i ogłosił wyniki pomiaru dokonanego w Laponii. Wedle nich, jednostopniowy odcinek południka zmierzony w Laponii miał długość 111946,47 m i był o 736,53 m dłuższy w porównaniu z odpowiednim odcinkiem południka zmierzonego wcześniej w pobliżu Paryża 111209,94 m. Wynik ten przemawiał za hipotezą postawioną przez Newtona o spłaszczeniu Ziemi przy biegunach i został przyjęty z niedowierzaniem. Doszukiwano się błędów w pomiarach Maupertuis'a i w końcu znaleziono je, jednak ich uwzględnienie sprawiło, że różnica jeszcze bardziej się powiększyła.

W tym czasie nie powróciła jeszcze wysłana wcześniej wyprawa do Peru, która zajęła prawie 8 lat i powróciła zdekompletowana. Wyniki pomiarów południka pomiędzy Quito i Cuenca zostały opublikowane przez Bouguera w roku 1749 w dziele „Figure de la Terre Determine" według Bouguera jego długość wyniosła 110611,6 m. Zebrane rezultaty obu ekspedycji wskazywały, że promień polarny Ziemi (b=6363806,3 m) powinien być krótszy niż równikowy (a=6397300 m), a wynikające stąd spłaszczenie globu ziemskiego ε = 1/216,8 [11]. Wynik ten w sposób ostateczny potwierdził hipotezę Newtona, co Voltair skomentował w następująco:

„Vous avez confirmé dans les lieux pleins d'ennui
Ce que Newton connut sans sortir de chez lui." [9]

Podczas Rewolucji Francuskiej, powołana przez Akademię komisja w składzie: Jean-Charles de Borda, Joseph Louis Lagrange i Gaspard Monge opracowała w roku 1793 projekt nowego systemu miar i wag. Jako miarę długości zaproponowali metr (ścislej provisional meter). Nazwa ta pochodzi od greckiego słowa μετρον (métron) oznaczającego miarę. Długość metra zdefiniowano jako jedną dziesięciomilionową część długości południka biegnącego od równika przez Paryż po biegun. Twórcy definicji metra oparli się na pomiarach wykonanych w przeszłości przez Lacaille'ego i Cassiniego. W roku 1795, były królewski jubiler wykonał wzorce metra mające formę platynowych sztabek o grubości 4 mm, szerokości 25.3 mm i długości jednego metra. Jeden z nich zdeponowano w Archiwum Państwowym. W latach 1792–98 Jean Baptiste Delambre i Pierre Méchain ponownie wyznaczyli długość łuku południka pomiędzy Dunkierką i Barceloną [12]. Pomiary te wraz z przeanalizowanymi ponownie pomiarami wcześniejszych ekspedycji dały wartość spłaszczenia ε=1/311.5.

W czasach dzisiejszych pomiar długości południka może być z łatwością dokonany za pomocą satelitów. Pomiary takie określają spłaszczenie Ziemi z ogromną dokładnością ε=1/298.257223563. Odpowiada ono różnicy promieni a-b=21,385 km. Pomiary te pokazują także, że metr w rzeczywistości jest o około 1/5 milimetra krótszy niż jedna dziesięciomilionowa ćwiartki ziemskiego południka, a więc błąd względny jego wyznaczenia jest rzędu 0,02% [13, 14]. Tym bardziej zadziwiający jest fakt, że XVIII-wieczni mierniczowie byli w stanie otrzymać tak dokładny wynik.

Literatura

[1] Jean-Claude Becker, Understanding the Heavens, Springer-Verlag Berlin, 2001.
[2] http://en.wikipedia.org/wiki/Eratosthenes
[3] http://www.ibiblio.org/expo/vatican.exhibit/exhibit/d-mathematics/Ptolemy_geo.html
[4] De Civitate Dei, Book XVI, Chapter 9 - Whether We are to Believe in the Antipodes, translated by Rev. Marcus Dods, D.D.; from the Christian Classics Ethereal Library at Calvin College: http://www.ccel.org/ccel/schaff/npnf102.iv.XVI.9.html
[5] http://www.fordham.edu/halsall/mod/1543copernicus2.html
[6] Laurence Bergreen: Poza krawędź świata, Dom Wydawniczy Rebis, Poznań 2005.
[7] Dava Sobel, W poszukiwaniu długości geograficznej, Zysk i S-ska, Poznań 1998.
[8] http://en.wikisource.org/wiki/Catholic_Encyclopedia_%281913%29/Jean_Picard
[9] S. Chandrasekhar, Ellipsoidal Figurek of Equilibrium, New Haven and London, Yale University Press, 1969.
[10] http://www.britannica.com
[11] http://pl.wikipedia.org/wiki/Pierre_Bouguer
[12] http://en.wikipedia.org/wiki/Jean_Baptiste_Joseph_Delambre
[13] http://www.sizes.com/units/meter.htm
[14] David A. Vallado,Wayne D. McClain, Fundamentals of astrodynamics and applications, STL, 2004.