

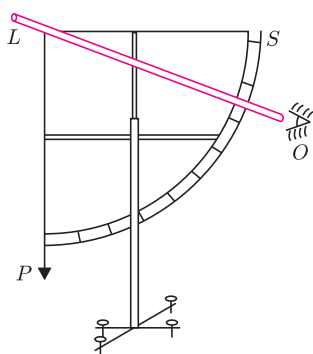
Jak Astronom Królewski z Greenwich, Nevil Maskelyne, zważył Ziemię w 1774 roku

Bronisława ŚREDNIAWA

Na początku był Newton

Izaak Newton (1642–1727), rozważając konsekwencje swojego prawa powszechnego ciężenia, stwierdził, że pion zawieszony w pobliżu góry nie będzie wskazywał dokładnie środka Ziemi, ale zostanie nieco odchyłony w stronę góry przez oddziaływanie grawitacyjne między masą ciężarka pionu a masą góry. Szacował, że to odchylenie dla półkulistej góry o wysokości trzech mil (4,8 km) nie przekroczy dwóch minut kątowych i sceptycznie odnosił się do możliwości pomiaru tak znikomego efektu. Zagadnienie takie zyskało sobie nazwę *Attraction of Mountains* (przyciągania gór) i, pomimo sceptycyzmu Newtona, w XVIII wieku w różnych miejscach na Ziemi przeprowadzano próby pomiaru kąta odchylenia wskazań pionu od kierunku zenitu w pobliżu gór.

Jako pierwsi wyzwanie podjęli w roku 1738 Francuzi, Pierre Bouguer (1698–1758) i Charles Marie de La Condamine (1701–1774), w Ameryce Południowej. Dla szeregu gwiazd wykonali pomiary kąta pomiędzy kierunkiem do gwiazdy a linią wskazywaną przez pion w pobliżu wygasłego wulkanu Chimborazo i w znacznej odległości od niego, dokładnie na zachód, na płaskowyżu Quito. Jednak z powodu zbyt mało dokładnego kwadrantu (rys. 1), nie udało im się zmierzyć kąta odchylenia pionu od prawdziwego kierunku zenitalnego, ale mimo to sam fakt istnienia efektu został potwierdzony.



Rys. 1. Kwadrant astronomiczny.

L – luneta,
S – skala,
O – obserwator,
P – pion.

Pomysł i miejsce

W 34 lata później wielbny Nevil Maskelyne (1732–1811), Astronom Królewski z obserwatorium w Greenwich, wygłosił w Royal Society w Londynie wykład pod tytułem *A Proposal for Measuring the Attraction of Some Hill in this Kingdom by Astronomical Observations*. Sformułował w nim cel doświadczenia jako oszacowanie masy Ziemi oraz jej gęstości w pobliżu powierzchni w porównaniu z gęstością jej głębszych warstw. Zatem doświadczenie miało udzielić, między innymi, odpowiedzi na ówczesne

zadawane pytanie: czy Ziemia jest pustą skorupą, czy wręcz przeciwnie – ma ciężką zawartość?

Wkrótce został powołany komitet w celu przygotowania eksperymentu, w skład którego wchodził, między innymi, Henry Cavendish (1731–1810). Równocześnie przeznaczono fundusze na przygotowanie tego przedsięwzięcia.

Latem 1773 roku Charles Mason (1730–1787) wyszukał w Szkocji odpowiednią górę. Idealna kandydatka miała być możliwie wolno stojąca, o kształcie wydłużonym w kierunku wschód-zachód, wysoka około pół mili (ok. 800 m), bez żlebów, szczelin i jaskiń. Góra Schehallien (1083 m n.p.m.) spełniała najlepiej postawione warunki. Miejsca obserwacji astronomicznych wybrano po stronie północnej i południowej góry w około połowie drogi od podnóża do szczytu, praktycznie na tym samym południku. Warto w tym miejscu zauważyć, że Schehallien w języku Erse (szkocki, należący do grupy języków celtyckich) oznacza nieprzerwaną burzę. Istotnie, kaprysy pogodowe utrudniały znacznie obserwacje i pomiary.

Na tym etapie przygotowań Mason odmówił propozycji kolejnej wyprawy do Szkocji w celu przeprowadzenia planowanego eksperymentu i Maskelyne, choć niechętnie, podjął się wypełnienia tej misji.

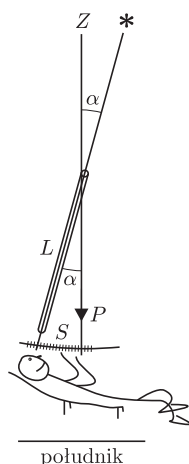
Metoda

Metoda zaproponowana przez Maskelyne'a polegała na bardzo dokładnym wyznaczeniu różnicy szerokości geograficznej dwóch miejsc po północnej (obserwatorium A) i południowej stronie góry (obserwatorium B) leżących praktycznie na linii północ-południe. Pomiary wykonano dwoma sposobami, geodezyjnym i astronomicznym. Metodą geodezyjną znaleziono poprawną różnicę szerokości geograficznych obu punktów obserwacyjnych A i B. W tym celu wyznaczono dokładną odległość tych punktów, a w tablicach Bouguera znaleziono odległość odpowiadającą jednemu stopniowi szerokości geograficznej na szerokości geograficznej Schehallien ($56^{\circ}40'$). Natomiast szerokość geograficzna wyznaczona z metody astronomicznej, opartej na pomiarze odległości zenitalnej gwiazdy w chwili jej przejścia przez południk, była zaburzona przez fakt, że pion nie wskazywał dokładnie środka Ziemi, czyli nie wskazywał na niebie zenitu (Rys. 3 i 4). Następnie należało wyliczyć różnicę tej zaburzonej szerokości geograficznej punktów A i B.

Dla punktów A i B różnice szerokości geograficznej, obliczone sposobem geodezyjnym i astronomicznym, nie były sobie równe. Ich różnica stanowiła podwojony kąt odchylenia wskazania pionu od kierunku do prawdziwego zenitu. Obliczywszy masę góry, można było wyznaczyć masę i gęstość Ziemi.

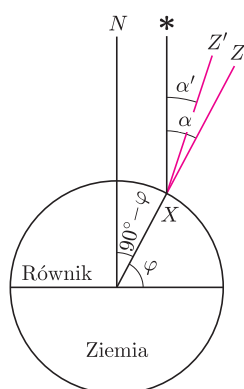
Doświadczenie

Asystent Maskelyne'a, Reuben Burrow, pojawił się pierwszy na miejscu doświadczenia pod Schehallien. Przygotował zakwaterowanie dla astronoma, obserwatorium w płóciennie-drewnianym namiocie



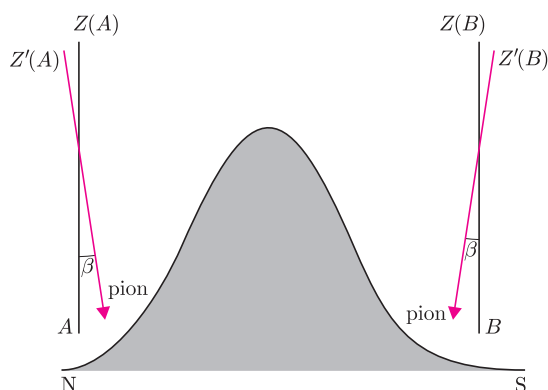
Rys. 2. Urządzenie do pomiaru odległości zenitalnej gwiazdy.

Z – zenit,
 α – odległość zenitalna gwiazdy,
 P – pion,
 L – luneta,
 S – skala ze śrubą mikrometryczną.



Rys. 3. Odległości zenitalne gwiazdy.

α – odległość zenitalna gwiazdy bez zaburzenia wskazań pionu w punkcie A oraz
 α' – przy zaburzeniu wskazań pionu spowodowanym przyciąganiem góry,
 Z – zenit,
 Z' – wskazanie pionu w sąsiedztwie góry,
 N – północ,
 φ – szerokość geograficzna.



Rys. 4. Wskazania pionów $Z'(A)$ i $Z'(B)$ w obserwatoriach A i B w pobliżu góry. $Z(A)$, $Z(B)$ – linie od miejsc obserwacji do ich zenitów, kąt β – kąt pomiędzy wskazaniem pionu a linią do zenitu.

oraz przyrządy astronomiczne, z których najważniejsze były: luneta o długości 3,1 m zaopatrzona w pion, 30,5-centymetrowy kwadrant astronomiczny i zegar astronomiczny.

Dalszym zadaniem jego oraz Williama Menziesia, lokalnego mierniczego, było wykonanie żmudnych pomiarów geodezyjnych, w celu dokładnego wyznaczenia kształtu góry, potrzebnego do wyliczenia jej objętości oraz wyznaczenia prawdziwej różnicy szerokości geograficznej punktów A i B. Te pomiary prowadzono do nastania pierwszych mrozów w listopadzie 1774 roku, a potem na wiosnę następnego roku.

Sam Nevil Maskelyne dotarł pod Schehallien już 30 czerwca 1774 roku i zajął się obserwacjami nieba. Używając lunety zaopatrzonej w pion i dokładną skalę ze śrubą mikrometryczną do pomiaru kąta pomiędzy lunetą a pionem (rys. 2), mierzył kąt pomiędzy wskazywanym zenitem a gwiazdą będącą w najwyższym swoim położeniu tej nocy, czyli w momencie jej przejścia przez linię południka. Kierunek południka wyznaczył w pierwszym obozie za pomocą obserwacji Słońca kwadrantem, a w drugim obozie z powodu braku widocznego Słońca, najpierw z pomiarów astronomicznych, znał bowiem z tablic czas pomiędzy przejściem dwóch gwiazd przez południk, a następnie tak długo ustawiał aparaturę, aż czas z tablic zgadzał się ze zmierzonym w obserwatorium. W kilka dni później, gdy warunki meteo na to pozwoliły, sprawdził ustawienie aparatury pomiarowej na południku za pomocą pomiaru wysokości Słońca kwadrantem. Sprawdzenie kolimacji przeprowadził, prowadząc w obu miejscach A i B obserwacje zarówno przed, jak i po obrocie urządzenia o 180° wokół pionu.

Odległość zenitalną odczytywał ze skali i z podziałki śruby mikrometrycznej z dokładnością do 0,1 sekundy kątowej. W pierwszym obserwatorium, w punkcie B, na południowym zboczu góry pomiary po 3 tygodniach oczekiwania na odpowiednią pogodę zaczęto 20 lipca i trwały one do 19 sierpnia, z tym że 1 sierpnia astronom dokonał obrotu urządzenia pomiarowego o 180° i z tak ustawioną aparaturą powtórzył obserwacje tych samych gwiazd i dodatkowo jeszcze wielu innych. Następnie w ciągu tygodnia przeniesiono się na północną stronę góry do punktu A. Tam pomiary prowadzono od 4 września z przerwami powodowanymi brakiem dobrych warunków atmosferycznych do 24 października.

W sumie Maskelyne wykonał 337 obserwacji 43 gwiazd znajdujących się w granicach $8,5^\circ$ od zenitu i powrócił do Londynu pod koniec października tego samego roku.

Skrzypce

Do legendy przeszła następująca anegdota. Po zakończeniu pomiarów Maskelyne dziękował miejscowym pomocnikom za współpracę, organizując przyjęcie z nieodzwonną beczulką whisky. Wówczas niepostrzeżenie dla biesiadników wybuchł pożar, w wyniku którego spaliły się skrzypce, własność Duncana Robertsona, który swoją muzyką umilał ekipie doświadczalnej wieczory na pustkowiu. Zmartwiony i wzruszony Maskelyne wkrótce przysłał mu sprawny

instrument z Londynu. W podziękowaniu Duncan skomponował pieśń o tych skrzypcach, które, jak legenda niesie, miały być „Stradivariusem” i pewnie zostały później podmienione przez naprawiającego je nieuczciwego lutnika w XIX wieku na instrument miejscowej roboty, ponieważ skrzypce dziś znajdujące się w posiadaniu spadkobierców Duncana zaopatrzone są w napis „Edinburgh 1840”.

Pierwsze wyniki

W rok po przeprowadzeniu doświadczenia opublikowano wstępne wyniki z obliczeń dla 10 gwiazd. Różnica szerokości geograficznej punktów O i P , wyznaczona sposobem astronomicznym (tzn. z zaburzeniem „przyciągania góry”), wynosiła $54,6''$, a prawdziwa różnica szerokości geograficznej tych miejsc wynosiła $42,94''$. Zatem kąt odchylenia pionu od kierunku prawdziwego zenitu w pobliżu góry wyniósł $5,8''$. Kontynuując Maskelyne stwierdzał, że średnia gęstość Ziemi jest co najmniej 2 razy większa niż gęstość jej powierzchniowej warstwy.

Opracowanie danych

Całościowym opracowaniem wszystkich danych zajęł się Charles Hutton (1737–1823) – nauczyciel, matematyk, profesor wojskowej akademii w Woolwich. Jego sprawozdanie ukazało się w *Philosophical Transactions* w 1778 roku. Aby wyliczyć gęstość Ziemi, trzeba było wcześniej wyznaczyć masę góry, a w tym celu poznać jej objętość i gęstość. Przy okazji wykonania koniecznych do tego celu dokładnych rysunków kształtu góry Hutton wynalazł poziomice. Gęstość góry oszacował jako 2,5 raza większą niż gęstość wody i na tej podstawie po

długich obliczeniach otrzymał wartość gęstości Ziemi równą 4,5 gęstości wody. Przyjmując znaną wówczas wielkość promienia kuli ziemskiej – 6500 km, otrzymał masę Ziemi nieco ponad $5 \cdot 10^{21}$ ton.

Z drugiej jednak strony Cavendish w 1798 roku otrzymał ze sławnego doświadczenia z wahadłem torsyjnym gęstość Ziemi równą 5,45 gęstości wody. Hutton jeszcze później dwukrotnie modyfikował w górę swój wynik. Po raz pierwszy po ponownym przeglądzie w 1811 roku danych związanych z budową Schehallien, a drugi raz mając 84 lata w 1821 roku, kiedy ostatecznie zdecydował się podać wartość 4,95 gęstości wody. Nadmienmy tutaj, że zdaniem Newtona Ziemia miała mieć gęstość między 5 a 6 gęstości wody. Co ciekawe, jest to zgodne z naszą obecną wiedzą na ten temat – wartość tę dziś przyjmujemy jako $5,52 \text{ g/cm}^3$ i daje ona masę Ziemi równą $5,974 \cdot 10^{21}$ ton.

Słabą stroną zastosowanej przez Maskelyne’a metody była trudność oszacowania gęstości góry i bardzo mały kąt, który należało wyznaczyć. Jednakże sposób podejścia do zagadnienia, skrupulatność w przeprowadzeniu pomiarów, zebraniu danych, solidne opracowanie wyników, spowodowały, że rezultaty pracy astronoma – pomysłodawcy, matematyka opracowującego dane i całej ekipy doświadczalnej zapisały się chlubnie na kartach dziejów nauki.

Literatura:

1. D. Howse, *Nevil Maskelyne, The Seaman's Astronomer*, Cambridge University Press 1989.
2. G.S. Leadstone, *Maskelyne's Schehallien experiment of 1774*, *Physics Education* 1974, vol. 9, s. 452–458.



Zadania

Redaguje Ewa CZUCHRY

F 709. W naczyniu przykrytym płaską przylegającą pokrywką znajduje się odłamek lodu o masie $m = 100 \text{ g}$. Oszacować siłę potrzebną do oderwania całej pokrywki naraz, po stopnieniu lodu.

Rozwiązanie na str. 12

F 710. Oszacować siłę potrzebną do oderwania od pleców dobrze postawionej bańki (lekarzkiej).

Rozwiązanie na str. 16

Redaguje Waldemar POMPE

M 1195. Wyznaczyć wszystkie ciągi p_1, p_2, \dots, p_{100} liczb pierwszych, dla których spełnione są podzielności

$$p_1 \mid p_2^2 - 1, \quad p_2 \mid p_3^2 - 1, \quad \dots, \quad p_{100} \mid p_1^2 - 1.$$

Rozwiązanie na str. 13

M 1196. W czworokącie wypukłym $ABCD$ spełnione są równości (rysunek)

$$\sphericalangle BAC = 44^\circ, \quad \sphericalangle BCA = 17^\circ, \quad \sphericalangle CAD = \sphericalangle ACD = 29^\circ.$$

Wyznaczyć miarę kąta ABD .

Rozwiązanie na str. 17

M 1197. Danych jest $n \geq 3$ punktów na płaszczyźnie, nieleżących na jednej prostej. Każdemu z tych punktów przyporządkowano pewną liczbę rzeczywistą. Wiadomo, że dla każdej prostej przechodzącej przez co najmniej dwa dane punkty suma liczb przyporządkowanych punktom leżącym na tej prostej wynosi 0. Wykazać, że każdemu punktowi przyporządkowano liczbę 0.

Rozwiązanie na str. 24

