

## 6.4. Fizyka w naukach o Ziemi<sup>16</sup>

### Kształt Ziemi

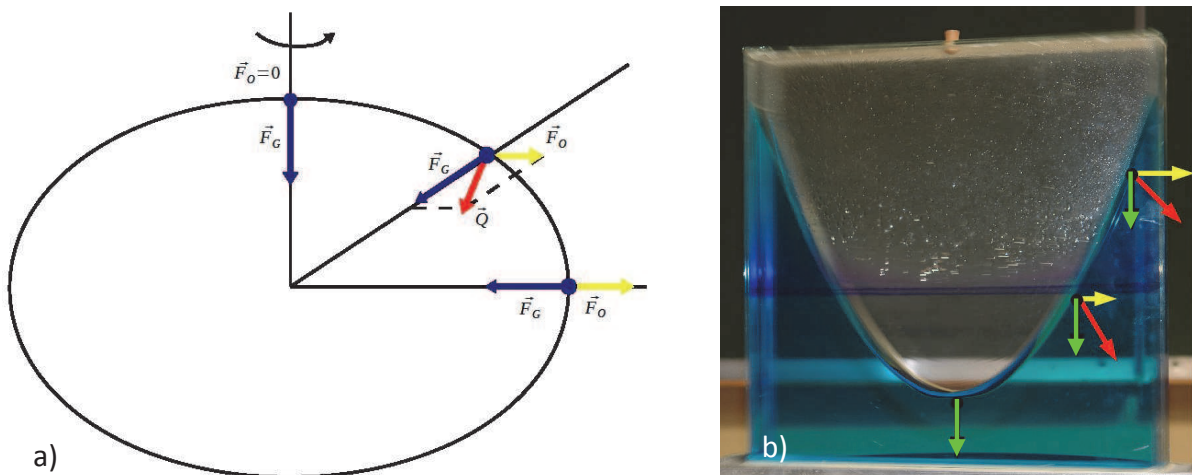
Kształt Ziemi nie jest zagadnieniem prostym. Określamy go często jako *geoida*. Niewiele to określenie jednak mówi: kształt Ziemi to *ziemio-kula*. Od rozważań o kształcie Ziemi zaczyna się dzieło Kopernika: „[...] Chociaż wyraźnej jej kulistości bezpośrednio widzieć nie można, z przyczyn wyniosłości gór i wklęsłości dolin, to przecież nierówności te bynajmniej nie zmieniają ogólnej jej okrągłości, co się daje tak uzasadnić. [...] Także i wody morskie układają się w postaci kulistej, o czym wiedzą żeglarze, dostrzegając z wysokości masztu łód stały, którego z pokładu okrętu jeszcze nie widać”.

Kulisty kształt Ziemi rodził nie byle problem: dlaczego woda nie spływa z takiej kuli? Kopernik, korzystał częściowo z wyjaśnienia Arystoteles, według której ciała ciężkie dążą do środka Ziemi, bo tam jest ich „miejsce naturalne”. A woda? Jest przecież lżejsza niż skała, a lądy nad morza wystają. Kopernik pisze więc, że „[...] jako ląd i woda wspierają się na jednym *środku ciężkości* Ziemi, który jest zarazem *środkiem* jej objętości. Woda, będąc lżejszą, wypełnia rozpadliny ziemskie i dlatego mało jest wody w stosunku do lądu, chociaż może na powierzchni więcej widać wody”.

Jak wiemy, prawo powszechnego ciążenia sformułował dopiero Newton, 150 lat po Koperniku. Ale nasz Rodak był „na właściwym tropie” – kluczem do zrozumienia kształtu Ziemi jest *prawo ciążenia*. Geoida to nie kula geograficzna, ale *fizyczna*.

**Geoida to idealny kształt (wirującej) Ziemi, który by przyjęła oblana w całości wodą.**

Problem komplikuje fakt, że Ziemia wiruje, i to z dużą prędkością (kątową). Na wodę na kuli ziemskiej działa więc nie tylko siła ciężkości (skierowana do środka kuli) ale i siła odśrodkowa bezwładności (zob. par 1.5), skierowana „poziomo” na rys. 6.10. Woda nie przyjmuje kształtu kuli, ale jak to pokazujemy na rys. 6.10, kształt elipsoidy. Dla takiej elipsoidy, siła wypadkowa będąca sumą siły ciężkości i siły odśrodkowej jest zawsze *prostopadła* do powierzchni elipsoidy. Tak jak powierzchnia wody w talerzu jest prostopadła do (lokalnego) kierunku siły grawitacji.



**Ryc.6.10. a)** Rozkład sił na obracającej się Ziemi; elipsoida obrotowa jest „idealną” powierzchnią Ziemi - tylko w tym przypadku wektor siły nie ma składowej stycznej do powierzchni Ziemi; **b)** na wodę w wirującym akwarium działa siła grawitacji (pionowo w dół) i siła odśrodkowa (poziomo); powierzchnia wody jest prostopadła do wypadkowej z tych sił i przyjmuje kształt paraboli (fot. JCh).

<sup>16</sup> Współpraca mgr Justyna Chojnacka. Materiał został szczegółowo omówiony w „Geografii w Szkole”, nr 3/2012, str. 28

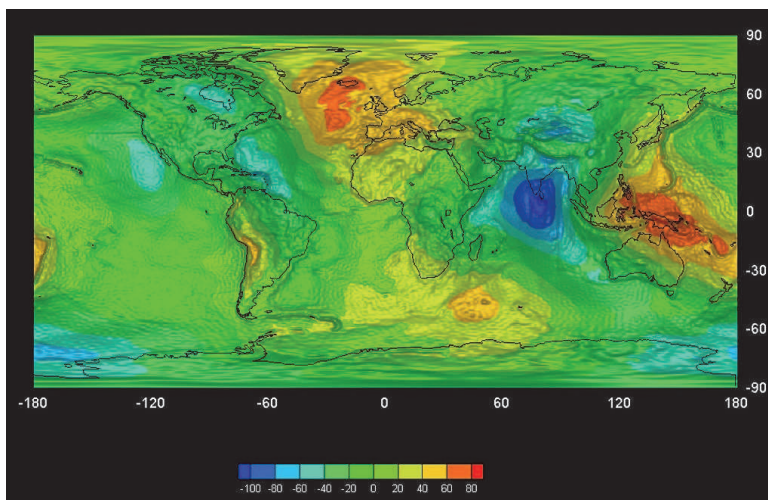
Różnice w gęstości poszczególnych sfer Ziemi a także rowy oceaniczne, wysokie pasma górskie i złoża surowców sprawiają jednak, że masa elipsoidy ziemskiej nie jest rozłożona równomiernie w całej jej objętości. Nie bez wpływu to pozostaje na pole grawitacyjne Ziemi. Konstrukcja mapy pola grawitacyjnego, pozwala na otworzenie prawdziwego kształtu geoidy. Geoida jest bryłą o powierzchni prostopadłej w każdym punkcie do (wypadkowego) wektora siły grawitacji. W fizyce taka powierzchnię nazywamy powierzchnią stałego potencjału grawitacyjnego. Nie wprowadzaliśmy tego pojęcia do tej pory, ale byliśmy blisko w równaniu (1.32). Potencjał grawitacyjny  $V$  w odległości  $R$  od masy punktowej  $M$  obliczamy ze wzoru

$$V(R) = -\frac{GM}{R} \quad (6.3)$$

Jak widzisz, wyznaczenie kształtu Ziemi nie jest proste. W dobie lotów kosmicznych mamy na to jednak nowe sposoby: sztuczny satelita Ziemi, który lata na niskiej wysokości (150 km) i mierzy precyzyjnie pole grawitacyjne, fot. 6.11a. W ten sposób powierzchnia geoidy została wyznaczona z dokładnością do kilkudziesięciu centymetrów, zob. ryc. 6.11b.



**Fot. 6.11. a)** Satelita do pomiarów grawitacji (GOCE) lata na niskiej orbicie (150 km) i używa silników jonowych na ksenon do korekty trajektorii lotu (Źródło: ESA)



**Ryc. 6.11. b)** Powierzchnia geoidy to powierzchnia stałego potencjału grawitacyjnego, z uwzględnieniem siły odśrodkowej; powierzchnia ta jest *pod* elipsoidą, np. w rejonie Himalajów. (Źródło: ESA)

W obszarze Himalajów teoretyczna, tj. określona przez potencjał grawitacji, powierzchnia geoidy wypada *pod* powierzchnią matematycznej elipsoidy. Himalaje zbudowane są bowiem z lekkich skał osadowych spoczywających niegdyś (100 mln lat temu) na dnie ciepłego morza. Powierzchnia geoidy „wybrzusza się” w górę w rejonie Islandii.

## Tektonika płyt

Skorupa ziemska pozostaje w stałym ruchu, którego przyczyną jest „wewnętrzny ogień”. Znany jest fakt, że temperatura w miarę wzrostu głębokości rośnie. Przyczyny, że Ziemia jest gorąca wewnątrz (przypuszczalna temperatura w jej środku wynosi ok. 5000°C) są co najmniej dwie. Po pierwsze, Ziemia nie zdążyła wystygnąć – **4,567 mld lat** od jej uformowania się to w astronomicznej skali czasu zaledwie 1/3 czasu od Big Bangu, przewodność cieplna skał jest niska a ich ciepło właściwe duże. Po drugie, we wnętrzu Ziemi cały czas zachodzą rozpady promieniotwórcze, które wytwarzają duże ilości energii.

Uran, którego zawartość w skorupie ziemskiej, szacuje się na 0,0002 % rozpada się z okresem połowicznego zaniku 4,51 mld lat, porównywalnym z wiekiem Ziemi (mówimy o izotopie  $^{238}\text{U}$ , którego zawartość w naturalnym uranie wynosi 99 %). Ciepło uzyskane w

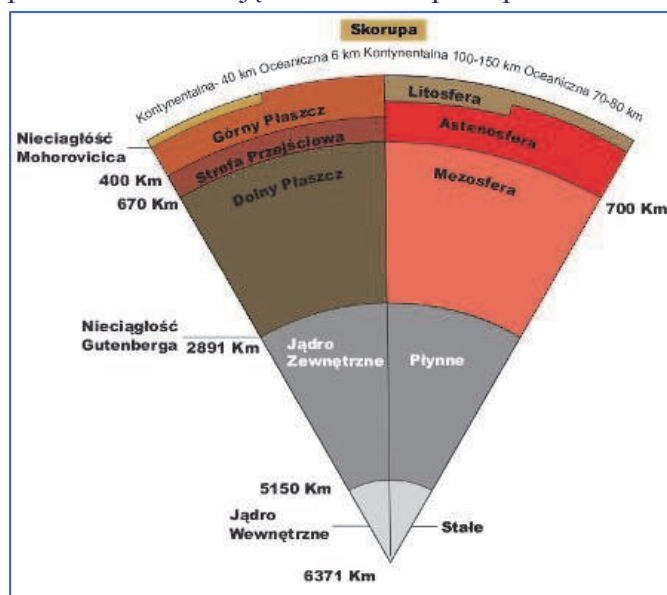
reakcji rozpadu 1 g uranu, poprzez długi szereg radioaktywny aż do ołowiu ( $^{238}\text{U} \rightarrow ^{234}\text{Th} \rightarrow \dots \rightarrow ^{206}\text{Pb}$ ) dostarcza łącznie mocy rzędu 100 tys. kWh. Sumarycznie, jak wykazały ostatnio badania przeprowadzone przez japońskich fizyków zajmujących się cząstkami elementarnymi, neutronami, połowa bilansu cieplnego pochodzącego z wnętrza Ziemi pochodzi z rozpadów promieniotwórczych; druga połowa to stygnięcie wnętrza. Dokładniej, w skorupie i płaszczu Ziemi wydziela się około 8 TW (terawat) energii z rozpadów uranu ( $^{238}\text{U}$ ), kolejne 8 TW z rozpadu toru ( $^{232}\text{Th}$ ) i 4 TW z rozpadu potasu ( $^{40}\text{K}$ ). Dla porównania, cała produkcja energii elektrycznej na Ziemi ze wszystkich źródeł to około 10 TW.

Ciepło wydzielone wewnątrz Ziemi powoduje wznoszenie się części materiału, czyli *konwekcję*. Konwekcja to ruch cieczy wskutek jej podgrzewania od dołu i wynikająca z tego podgrzewania różnica gęstości. Wykorzystuje się ją np: w kolorowych lampach, gdzie podgrzewana od spodu ciecz formuje bąble poruszające się do góry a po ostygnięciu spadające w dół (Fot.6.12a.).



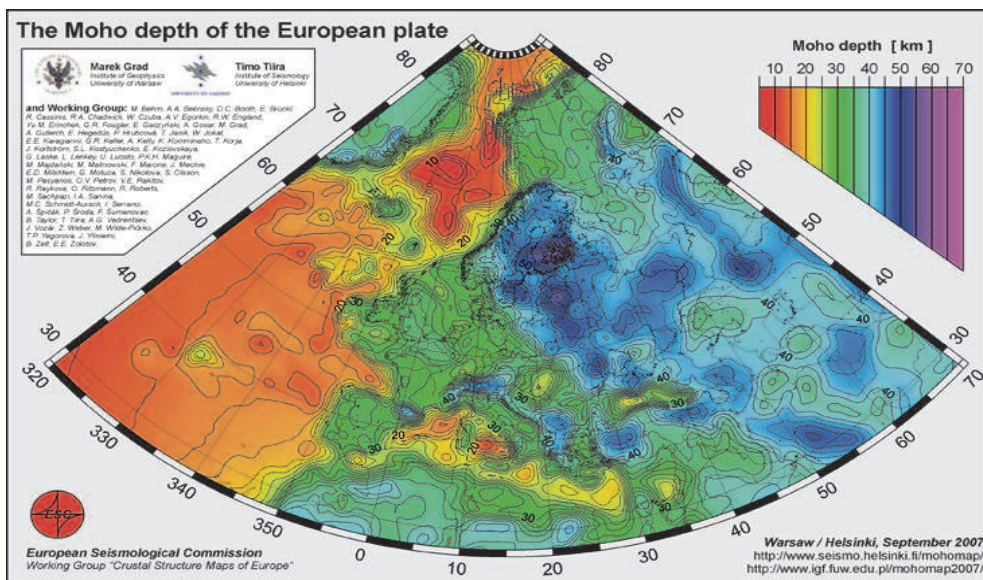
**Fot. 6.12. a)** Lampa typu „lawa”. Proces konwekcji wymusza ruch żółtej cieczy. Znajdujące się u dołu lampy źródło ciepła ogrzewa ciecz. Podczas podgrzewania objętość bąbli leżących na dnie rośnie, czyli maleje ich gęstość. Na skutek działania siły *wyporu* żółta ciecz wypychana jest ku górze. Bąble wędrując ku górze oddalają się od źródła ciepła – stają się chłodniejsze, ich gęstość rośnie i opadają na dno. Wznoszenie się i opadanie cieczy przypomina konwekcję materiału pod powierzchnią Ziemi.

**Ryc. 6.12. b)** Przekrój przez planetę Ziemię. Żelazowo - niklowe jądro sięga mniej więcej do połowy promienia, w zewnętrznej swej części jest płynne; płaszcz składa się z krzemu, tlenu i innych lekkich pierwiastków chemicznych; zawiera również uran



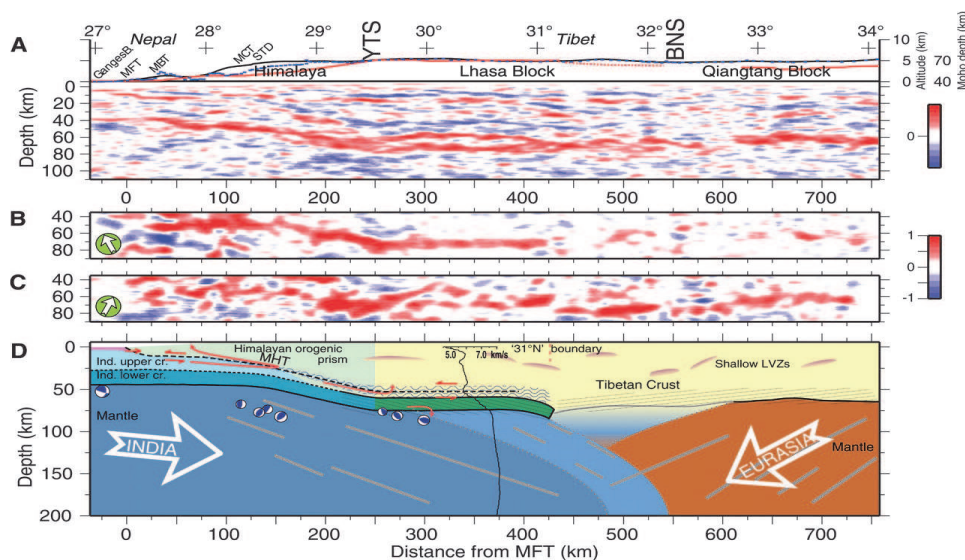
Proces konwekcji dotyczy również Ziemi. Za jej sprawą a także różnic w składzie chemicznym i właściwościach fizycznych poszczególnych sfer Ziemi dochodzi do trzęsień ziemi, wybuchów wulkanów, a także szeregu innych procesów. Ziemia nie jest bowiem jednorodna. W jej strukturze możemy wyróżnić trzy zasadnicze części. Pierwsza – zewnętrzna, składa się ze stosunkowo lekkich skał, zawierających głównie krzem i tlen, druga - wewnętrzna złożona prawdopodobnie z żelaza, niklu z domieszką innych pierwiastków.

Odkrycie bardziej subtelnych różnic w budowie Ziemi stało się możliwe dzięki badaniom nad rozchodzeniem się fal sejsmicznych powstających chociażby wskutek trzęsień Ziemi. Pomiar amplitud i czasów dojścia fal sejsmicznych w różnych punktach pomiarowych na całym świecie pozwoliły wyznaczyć głębokość, na jakiej znajduje się tzw. nieciągłość Mohorovičicia, a tym samym wyznaczyć grubość skorupy – najbardziej zewnętrznej części kuli ziemskiej. Skorupa ta ma grubość od 10 km w rejonie Islandii, gdzie ciągle powstaje na nowo, aż to 60-70 km w rejonie Finlandii, gdzie powstała 3-3,5 mld lat temu, zob. ryc. 6.13.



**Rys. 6.13.** Głębokość, na jakiej znajduje się nieciągłość Moho dla płyty europejskiej. Na najmniejszej głębokości znajduje się ona w obrębie oceanów (kolor czerwony, pomarańczowy), najgłębiej zaś położona jest w rejonie Finlandii i Estonii (za zgodą autorów<sup>17</sup>)

Zewnętrzna warstwa Ziemi, tzw. litosfera nie stanowi jednej całości, ale składa się z gigantycznych kawałków - płyt tektonicznych, obejmujących swoim zasięgiem zarówno kontynenty jak i dno oceaniczne. Płyty te unoszą się na powierzchni płaszcza a dryfujące ku sobie kontynenty wcześniej czy później się zderzą. Ogólnie, linie zderzeń płyt to pasma wzmożonej aktywności wulkanicznej i sejsmicznej. Szczegółowe mechanizmy zderzeń płyt (i obserwowane krajobrazy) zależą zasadniczo od dwóch czynników. Po pierwsze od rodzaju zderzających się płyt: kontynentalne, grube, ale zbudowane ze stosunkowo lekkich skał czy oceaniczne: cienkie ale zbudowane ze stosunkowo ciężkich bazaltów. Po drugie, od kierunku zanurzania się (subdukcji) brzegów płyt: ze wschodu na zachód lub odwrotnie.



**Ryc. 6.14.** Kolizja kry indyjskiej z euroazjatycką jest bezpośrednią przyczyną wypiętrzenia się Himalajów. Materiał, z którego składają się Himalaje został „zeskrobany” ze skorupy indyjskiej (kolor niebieski) przez twardszy klin skorupy tybetańskiej (kolor rdzawy). Strefa Moho leży na głębokości ok. 40 km pod deltą Gangesu i 70 km osiąga w okolicach Lhasy (Tybet). W rejonie zderzenia górny płaszcz płyty indyjskiej i płyty azjatyckiej zanurzają się w głąb Ziemi (Źródło: Science<sup>18</sup>)

<sup>17</sup> M. Grad i in. The Moho depth map of the European Plate, Geophys. J. Int. 176 (2009) 279

<sup>18</sup> John Nábělek et al., Underplating in the Himalaya-Tibet Collision Zone Revealed by the Hi CLIMB Experiment, Science, vol. 325 no. 5946, 11 September 2009

Współczesne kontynenty przypuszczalnie kilkakrotnie w dziejach Ziemi łączyły się w ogromne superkontynenty, a następnie rozpadały się na pojedyncze masy kontynentalne. Prawdopodobnie oprócz Pangei 200 mln lat temu istniał inny supekontynent, zwany Rodinią. Jego rozpad na mniejsze kry pływające w okolicy równika, rys.6.15. prawdopodobnie przyczyniło się do globalnego zlodowacenia, jakie ogarnęło naszą planetę jakieś 600 mln lat temu. Jak przewidują geofizycy, obecne kontynenty zderzą się za jakieś 100 mln lat w rejonie bieguna północnego.



**Rys.6.15.** Współczesne kontynenty, przypuszczalnie kilkakrotnie w historii Ziemi łączyły się w ogromne superkontynenty by następnie rozpaść się na pojedyncze masy kontynentalne. Tu przedstawiamy hipotezę jak wyglądała powierzchnia Ziemi 600 mln lat temu (rys. Katarzyna Konieczna wg. Hoffman P. F., Schrag D. P., *Snowball Earth*, Scientific American, January 2000)

## 6.5 Polacy w fizyce współczesnej

Zaczęliśmy opowieść o fizyce od Mikołaja Kopernika (1473-1543) nie bez powodu. Postawił on szereg istotnych pytań, nie tylko o trzy rodzaje ruchu Ziemi ale także w zakresie fizyki: o grawitację, o ruch względny, o granice Wszechświata. Jego dzieło *De revolutionibus* jest warte przewertowania: jest to pierwszy traktat pisany w nowoczesny, empiryczny sposób. Już nie założenia i wnioski, jak u Euklidesa, ale obserwacje, hipotezy, dalsze obserwacje i wreszcie kompletna *teoria heliocentryczna*.

Oczywiście, Włosi zaczynają podręczniki od Galileusza (1564-1642), Francuzi od Kartezjusza (1596-1650), Anglicy od Newtona (1643-1727). Każdy z nich miał wielki wkład, ale rewolucji dokonał (i tu są wszyscy zgodni) tylko Kopernik. Wynik uzyskał po dwunastu latach studiów uniwersyteckich w zakresie prawa, greki, łaciny, medycyny i astronomii w Krakowie, Bolonii i Padwie i po dziesięcioleciach mozolnych obserwacji astronomicznych.

Tytanem pracy była również Maria Skłodowska, która w obcym kraju spędzała miesiące w nieogrzewanym laboratorium, separując chemicznie, po 20 g na raz, ponad tonę radioaktywnej rudy uranowej. Później służyła jako ochotniczka na froncie, dokonując prześwietleń rentgenowskich rannych żołnierzy. Z powodów narodowo – politycznych nie została wybrana do Francuskiej Akademii Nauk a i w Polsce nie „zadomowiła się”.

Historii uczonych, którzy mimo trudności dokonali rzeczy wielkich, jest więcej. Tu opisujemy kilka z odkryć dokonanych przez Polaków w fizyce współczesnej. Zacniemy od życiorysu założyciela Instytutu Fizyki na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, Aleksandra Jabłońskiego.