

„Doświadczenia fizyczne świadczące o ruchu obrotowym Ziemi”

Spis treści:

- I. Wstęp.
- II. Rozwój poglądów na budowę Wszechświata.
- III. Ruch obrotowy Ziemi.
- IV. Doświadczenia fizyczne świadczące o ruchu obrotowym Ziemi.
 - A) Wahadło Foucaulta.
 - B) Odchylenie ciał spadających ku wschodowi.
 - C) Siła Coriolisa.
 - D) Zmiana przyspieszenia ziemskiego wraz z szerokością geograficzną
- V. Podsumowanie.
- VI. Literatura.

I. Wstęp.

W starożytności zakładano, że nieruchoma Ziemia zajmuje środek świata. Wielcy starożytni filozofowie starali się tłumaczyć obserwowany ruch słońca, księżyca i planet ruchami sfer koncentrycznych, w środku, których znajdowała się Ziemia.

Geocentryczny pogląd na budowę świata został usankcjonowany przez największego filozofa starożytności Arystotelesa, którego poglądy zapanowały na blisko 2000 lat w nauce.

Zagadnienie ruchu Ziemi podjęte zostało w XVI w. przez Mikołaja Kopernika, który wysunął twierdzenie, że Ziemia jest jedną z planet obiegających słońce. Wysunął on również postulat o ruchu obrotowym Ziemi dookoła własnej osi. Tak więc Mikołaj Kopernik przyczynił się do tego, że teoria geocentryczna została zastąpiona teorią heliocentryczną.

Przez stulecia szukano dowodów fizycznych na istnienie ruchu obrotowego i obiegowego Ziemi.

W pracy tej zostaną przytoczone dowody fizyczne na ruch obrotowy Ziemi dookoła własnej osi.

II. Rozwój poglądów na budowę Wszechświata.

Astronomia należy do najstarszych nauk przyrodniczych. Powstała wraz z formowaniem się społeczeństw i początkowo ściśle była powiązana z takimi potrzebami życia codziennego, jak rachuba czasu oraz orientacja na lądzie i morzu.

W starożytnym Egipcie, a także w Mezopotamii wyznaczono prawidłową długość roku, znano skomplikowane ruchy planet, a nawet zdobyto umiejętność przewidywania zaćmień Słońca.

Szczególnie duży wkład w rozwój astronomii wnieśli filozofowie starożytnej Grecji, tworząc pierwsze – naukowe teorie budowy świata.

Według Talesa z Miletu, żyjącego na przełomie VII i VI w. p.n.e. Ziemia miała przypominać spłaszczony dysk, pływający po niezmiernym oceanie. Wyobrażano sobie, że płaską Ziemię obiegają: Księżyc, Słońce i planety; a wokół nich obraca się sfera gwiazd stałych.

Inny pogląd na kształt Ziemi głosił około 530 r. p.n.e. Pitagoras i jego uczniowie. Według nich Ziemia była kulą otoczoną ośmioma przezroczystymi, koncentrycznymi sferami, na których znajdowały się Księżyc, Słońce i planety. Obserwowane przesuwanie się tych ciał niebieskich na tle gwiazd tłumaczono różną prędkością obrotu sfer.

Pogląd, że Ziemia jest kulą ugruntował Arystoteles żyjący w latach 384 ÷ 322 p.n.e.. kulistość naszej planety uzasadnił m.in. na podstawie cienia Ziemi widocznego w czasie zaćmienia Księżyca, wskazał również na zmiany w położeniach gwiazd.

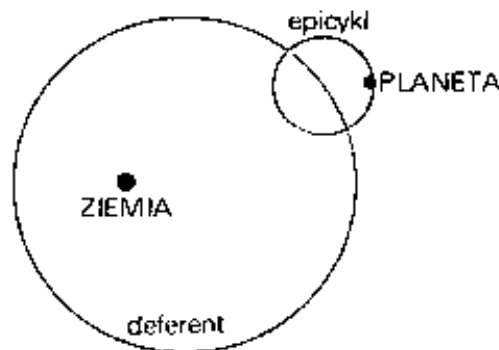
Mimo iż zdecydowana większość uczonych starożytnych uważała, że nieruchoma Ziemia stanowi środek świata, to już wówczas pojawiły się nieliczne poglądy zbliżone do współczesnego spojrzenia na budowę Układu Planetarnego. Przykładowo uczeń Platona, Herakleides z Pontu, uważał, że zmiany dnia i nocy następują wskutek ruchu obrotowego Ziemi. Chociaż nie sądził on, iż Ziemia obiega Słońce, to jednak wyrażał opinie, że obserwowany ruch Merkurego i Wenus jest rezultatem obiegu tych planet wokół Słońca.

Inny uczony grecki – Arystrach z wyspy Solmos (220 ÷ 150 r p.n.e.) przyjmował, że obserwowany ruch Słońca jest wynikiem ruchu obrotowego Ziemi wokół własnej osi i ruchu obiegowego wokół Słońca. Poglądy Arystracha, stanowiące podstawę

późniejszej teorii Kopernika, nie zyskały jednak uznania i popadły w zapomnienie na blisko 2000 lat.

Jednym z najwybitniejszych uczonych starożytnych był Ptolemeusz żyjący w latach . 100 ÷ 178 n.e. w Aleksandrii. W myśl teorii Ptolemeusza środkiem świata była nieruchoma Ziemia wokół której krążyły w kolejności: Księżyc, Merkury, Wenus, Słońce, Mars, Jowisz, Saturn, a także sfera gwiazd stałych.

Ptolemeusz przyjmował, że Słońce i Księżyc obiegają kulistą Ziemię po okręgach, których środki znajdowały się nieco poza środkiem Ziemi tzw. deferentach. Dla wytłumaczenia skomplikowanych ruchów Merkurego, Wenus, Marsa, Jowisza, i Saturna Ptolemeusz założył, że wokół Ziemi, po deferencie biegnie ruchem jednostajnym nie planeta, ale środek innego, mniejszego okręgu; zwanego epicyklem i dopiero po epicyklu porusza się planeta (rys 1). [2]



Rys. 1. Deferent i epicykl w teorii Ptolemeusza.

Jednak z biegiem czasu obserwowane położenia ciał niebieskich coraz bardziej różniły się od położen przewidywanych przez teorię Ptolemeusza. Wymagało to wprowadzenia dodatkowych epicykli i uzupełnienia teorii dodatkowymi założeniami. Epokowym momentem w rozwoju poglądów na budowę Wszechświata było opublikowanie w 1543 r. wielkopomnego dzieła Mikołaja Kopernika „De Revolutionibus” (O obrotach...). W księdze tej Kopernik zawarł ostateczną wersję opracowanej przez siebie teorii heliocentrycznej, przyjmującej, że centralnym ciałem w układzie planetarnym jest Słońce.

Wielkie znaczenie teorii Kopernika polega jednak przede wszystkim na stwierdzeniu, że Ziemia nie stanowi żadnego wyróżnionego miejsca we Wszechświecie, lecz jest tylko jedną z planet obiegających Słońce.

Teoria Kopernika znalazła wkrótce wielu zwolenników. Jednym z nich był Galileo Galileusz (1571 – 1642), który jako pierwszy skierował w 1609 r. lunetę w niebo i zaobserwował fazy Wenus oraz odkrył cztery księżycy Jowisza.

Zwolennikiem teorii Kopernika był także Johannes Kepler (1571 – 1630), który mając do dyspozycji zgromadzony przez Tycho Brahe (1546 – 1601) sformułował prawa ruchu planet.

W drugiej połowie XVII w, a także w wieku XVIII i XIX, dzięki stosowaniu coraz bardziej doskonałych teleskopów nastąpił znaczny rozwój metod obserwacyjnych. Umożliwiło to wyznaczenie odległości Słońca i planet, a także najbliższych gwiazd. Z końcem XIX w. wiedza astronomiczna rozszerzyła się tak dalece, że znane były ogólne zarysy budowy naszej Galaktyki.

W latach dwudziestych XX w. amerykański astronom Edwin Hubble (1889 – 1953) dokonał kolejnego ważnego odkrycia na drodze poznawania struktury Wszechświata. Dowiódł on, że zdecydowana większość mgławic, widocznych na fotografiach nieba jest w rzeczywistości odległymi galaktykami skupiającymi setki miliardów gwiazd.

Odkrycie Hubble’a zapoczątkowało burzliwy rozwój kosmologii – nauki, która korzystając z osiągnięć astronomii pozagalaktycznej, fizyki teoretycznej i innych nauk zajmuje się Wszechświatem.

III. Ruch obrotowy Ziemi.

Ziemia jest niemal doskonałą kulą o średnicy 12756 km. Wykonuje bardzo precyzyjny ruch obrotowy wokół osi, którą możemy sobie wyobrazić jako prostą linię łączącą biegun północny z południowym. Jest to ruch bardzo szybki. Dla przykładu w okolicy równika każdy punkt powierzchni Ziemi porusza się z prędkością 1669 km/h. Nie zdajemy sobie z tego sprawy, ponieważ w ruchu tym biorą udział nie tylko lądy, lecz także oceany, powietrze i całe nasze otoczenie.

W ciągu 24 godzin Ziemia wykonuje jeden obrót dookoła swej osi. Fakt ten jest naturalną podstawą naszej rachuby czasu. Ziemia obraca się z zachodu na wschód. Ruch obrotowy Ziemi byłoby bardzo trudno wykryć, gdyby daleko poza obrębem atmosfery ziemskiej nie było żadnych ciał niebieskich. W odróżnieniu od Ziemi, ciała te pozostają w ciągu doby nieruchome. Obracając się wraz z Ziemią obserwujemy jednak ich pozorną wędrówkę poprzez nieboskłon w kierunku przeciwnym do kierunku obrotu Ziemi, czyli ze wschodu na zachód.

Wschody Słońca, Księżyca, gwiazd i innych ciał niebieskich po wschodniej stronie nieba i ich zachody po zachodniej stronie są jedynie odbiciem ruchu obrotowego Ziemi. [5]

IV. Doświadczenia fizyczne świadczące o ruchu obrotowym Ziemi.

A) Wahadło Foucaulta.

Od XVII wieku szukano dowodów fizycznych na istnienie ruchu obrotowego Ziemi. Viviani we Florencji, dokonał w tym celu w roku 1661 prób z wahadłem, które mogło wahać się w dowolnej płaszczyźnie.

Najlepszym dowodem ruchu obrotowego Ziemi było zademonstrowanie przez francuskiego uczonego, Jeana Poula Foucault’a jego słynne doświadczenie wykonane po raz pierwszy publicznie w roku 1851. Foucault zawiesił u szczytu kopuły paryskiego Panteonu na długim drucie (67 m.) ciężką kulę metalową, która mogła wykonać ruchy wahadłowe w płaszczyźnie dowolnego koła wierzchołkowego.

Cóż takiego pokazał Foucault? Otóż uwidoczniał publiczności, że Ziemia wykonuje ruch obrotowy wokół własnej osi. Idea jego pokazu była prosta i zarazem genialna. Wykorzystał on znany w fizyce fakt, że swobodnie zawieszony w przestrzeni wahadło wychylone z położenia równowagi, będzie się starało – jak każdy układ fizyczny – powrócić do stanu pierwotnego, czyli równowagowego, wymagającego minimum energii.

Ważną cechą wahadła jest jego duża bezwładność – czyli masa kuli. Skoro wahadło jest swobodne, to waha się po pewnej niezmiennej w przestrzeni płaszczyźnie.

Zasada działania wahadła Foucault’a.

Wyobraźmy sobie wahadło w postaci kuli przyczepionej do stalowej linki, zawieszony swobodnie nad nieruchomą płaszczyzną (dodatkowo założmy, że na tej nieruchomej powierzchni narysowana jest kreska). W przypadku fromborskiego wahadła są to dwie listwy. Kąt zawarty między nimi wahadło pokonuje w ciągu jednej godziny. Wahadło zawieszony jest swobodnie tzn. w taki sposób, że można je uruchomić w dowolnym kierunku. Linka jest zaczepiona w pewnym punkcie, aby wprowadzić wahadło w ruch; chwytamy kulę, odciągamy ją nieco w bok tzn. wychylamy z położenia równowagi i puszczone.

We Fromborku rozwiązanie jest następujące. Na powierzchni kuli znajduje się haczyk, do którego przyczepia się sznurek. Jego drugi koniec mocuje się do uchwytu

na obrzeżu okręgu, wewnątrz którego waha się wahadło, a następnie sznurek zostaje przepalony.

W skutek tego, że kula ma pewną masę (czyli jest bezwładna) wahadło zaczyna się wahać – najpierw w kierunku przeciwnym do tego, w którym odciągnęliśmy kulę z położenia równowagi (czyli najpierw „od nas”), a potem wraca „do nas”.

Wahadło będzie się wahać tylko wzdłuż namalowanej kreski. Jeżeli nieruchoma do tej pory płaszczyzna np. koło zaczyna się obracać, tor ruchu wahadła nie będzie już linią prostą, ale zacznie opisywać figurę geometryczną w kształcie rozety. Dzieje się tak ponieważ, gdy kula przemieszcza się wzdłuż średnicy koła w kierunku jego krawędzi, to w tym czasie koło wciąż się obracając zmienia swoje położenie względem wahadła. Kiedy kula dotrze do krawędzi i zacznie „wracać” w przeciwnym kierunku, to zanim osiągnie przeciwległą krawędź, koło znów zdąży wykonać fragment obrotu.

Wniosek:

Skoro wahadło jest zawieszona swobodnie, a obserwujemy odchylenie, to oznacza to tyle, że Ziemia wykonała pod wahadłem obrót o kilka stopni.

Dzięki temu wiemy, że „jednak się kręci”.

Czas, jaki potrzebuje wahadło na dokonanie pełnego obrotu, jest zależny od szerokości geograficznej i jest opisany prostym wzorem:

$$T = \frac{23^h 56^m}{\sin x}$$

gdzie: x – oznacza szerokość geograficzną,

Łatwo stąd wyliczyć, że np. we Fromborku ($x = 54,35^\circ$), czas T wynosi niecałe 29,5 godziny, zaś na biegunach geograficznych $23^h 56^m$ (doba gwiazdowa).

Na równiku doświadczenie nic nie wykaże – wahadło będzie się wahać w stałej płaszczyźnie. [5]

B) Odchylenie ciał spadających ku wschodowi.

W końcu XVIII wieku Guglielmini w Boloni wykonał doświadczenie z odchyłaniem spadających swobodnie ciał od pionu ku wschodowi. Odchylenie jest spowodowane tym, że wierzchołek wieży, skąd spada ciało, ma liniową prędkość obrotową większą niż podstawa wieży.

Na skutek prawa bezwładności ciało puszczone swobodnie z wieży zachowuje większą liniową prędkość obrotową niż grunt u podstawy wieży, wskutek czego upadnie ono nieco na wschód od pionu przechodzącego przez miejsce, skąd ciało zostało spuszczone w dół.

Pomiaru Guglielminiego, a potem innych eksperymentatorów odchylenie takie potwierdzały. [5]

C) Siła Coriolisa.

Siła Coriolisa – jedna z sił bezwładności, której dodanie do sił faktycznie działających na punkt materialny uwzględnia wpływ obrotu ruchomego układu odniesienia na względny ruch punktu.

Siła Coriolisa (F_{cor}) jest liczbowo równa iloczynowi masy m punktu przez jego przyspieszenie Coriolisa i ma zwrot przeciwny do tego przyspieszenia:

$$F_{\text{cor}} = -2m\omega_{\text{un}} \times v_{\text{wz}}$$

gdzie: ω_{un} – prędkość kątowna obrotu ruchomego układu odniesienia względem nieruchomego;

v_{wz} – prędkość punktu względem układu ruchomego;

Efekt siły Coriolisa sprowadza się do tego, że w obracającym się układzie odniesienia poruszający się punkt materialny będzie wywierał nacisk na więzy przeciwdziałające temu odchyleniu. Na ciała poruszające się w pobliżu powierzchni Ziemi działa siła Coriolisa wywołana dobowym obrotem Ziemi. Jej wartość jest równa iloczynowi podwojonej prędkości kątowej Ziemi przez liczbową wartość rzutu

prędkości poruszającej się cząstki na płaszczyznę równika. Dla ruchu płaskiego wartość siły Coriolisa na równiku jest więc równa zero, a maksymalny efekt występuje na biegunach. Siła Coriolisa powoduje, że ciała spadające pionowo odchylają się na wschód, natomiast ciała poruszające się po powierzchni Ziemi odchylają się: na półkuli północnej w prawo, a na półkuli południowej w lewo względem kierunku ich ruchu. Prowadzi to między innymi do podmywania odpowiednich brzegów rzek oraz występowania niektórych prądów morskich i powietrznych. [4]

D) Zmiana przyśpieszenia ziemskiego wraz z szerokością geograficzną.

Przyśpieszenie, z jakim spadają ciała w próżni, zwane ziemskimi i oznaczone literą g różni się nieco od przyśpieszenia grawitacyjnego, którego wartość można obliczyć ze wzoru:

$$a_g = \frac{GM}{R_{\oplus}^2} \quad \oplus - \text{dla Ziemi}$$

gdzie: $M_{\oplus} = (5,976 \pm 0,004) \cdot 10^{24} \text{ kg}$

$$R_{\oplus} = 6\,378,164 \pm 0,003 \text{ km}$$

Przyśpieszenie ziemskie ma na ogół inny kierunek niż linie natężenia pola grawitacyjnego Ziemi, a jego wartość zależy od szerokości geograficznej. Siłę z jaką masa M Ziemi przyciąga element masy m na jej powierzchni, można obliczyć stosując wzór grawitacyjny Newtona:

$$F = \frac{G \cdot M_{\oplus} \cdot m}{R_{\oplus}^2} = g \cdot m$$

stąd:

$$g = \frac{G \cdot M_{\oplus}}{R_{\oplus}^2}$$

gdzie: G – przyśpieszenie siły przyciągania grawitacyjnego na powierzchni Ziemi;

$$G = 667 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m}^3}{\text{J}^8 \text{kg}}$$

$$\text{Standardowo } g = 980,665 \frac{\text{cm}}{\text{s}^2} = 9,80665 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}. \quad [1]$$

Zależność wartości przyspieszenia ziemskiego g (mierzonego na poziomie morza) od szerokości geograficznej przedstawia tabela 1.

TABELA 1. Zależność wartości przyspieszenia ziemskiego g od szerokości geograficznej.

SZEROKOŚĆ GEOGRAFICZNA φ [°]	$g \left[\frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right]$
0	9,7804
30	9,7933
45	9,8061
60	9,8192
90	9,8322

Jak widać z tabeli 1, różnica wartości g na biegunie i na równiku wynosi około $0,05 \text{ m/s}^2 = 5 \text{ cm/s}^2$. Główną przyczyną tego faktu jest ruch obrotowy Ziemi wokół własnej osi. Niemniej ważną, ale istotną przyczyną jest również spłaszczenie Ziemi. Jeżeli weźmiemy pod uwagę wpływ ruchu obrotowego Ziemi to z punktu widzenia obserwatora w układzie nie inercjalnym, związanym z obracającą się Ziemią; na każde ciało (z wyjątkiem ciał znajdujących się na biegunach), prócz siły grawitacji \vec{F}_g , działa siła odśrodkowa bezwładności \vec{F}_b .

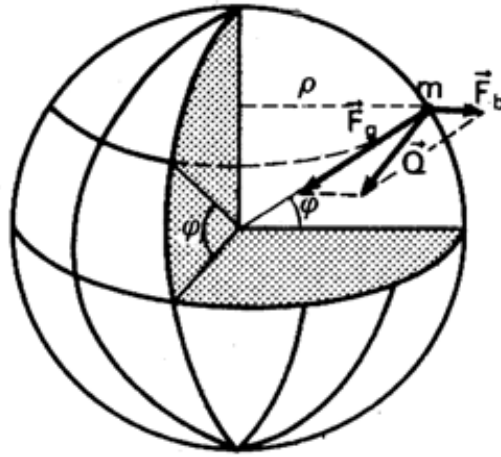
$$\vec{F}_b = m \cdot \omega^2 \cdot \rho$$

gdzie: m – masa ciała;

ω – prędkość kątowna Ziemi;

ρ – promień okręgu po którym ciało się porusza wraz z danym punktem Ziemi (tzn. promień odpowiedniego równoleżnika);

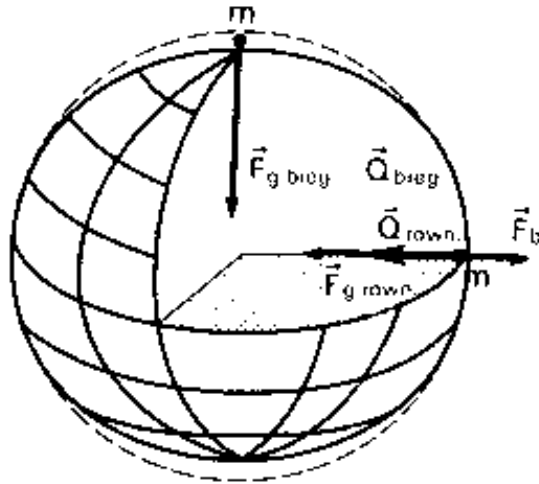
W efekcie obserwujemy przyspieszenie ciała nadawane przez siłę wypadkową.



Rys. 2. Ciężar ciała \vec{Q} jest (z punktu widzenia obserwatora związanego z obracającą się Ziemią) wypadkową sił: grawitacji \vec{F}_g i odśrodkowej bezwładności \vec{F}_b .

Z rysunku 2 widać, że siła wypadkowa \vec{Q} ma nieco inną wartość niż siła grawitacji \vec{F}_g i (poza równikiem) także inny kierunek – nie jest ona zwrócona do środka Ziemi. Tę wypadkową siłę w odróżnieniu od siły grawitacji nazywamy ciężarem ciała.

Siła odśrodkowa bezwładności nie występuje na biegunach. Tam więc przyspieszenie ziemskie jest „czystym” przyspieszeniem grawitacyjnym. Dla ciała umieszczonego na równiku działająca na nie siła odśrodkowa bezwładności będzie miała największą wartość (największa odległość od osi obrotu). W dodatku jej zwrot jest przeciwny niż zwrot siły grawitacji, dlatego ciężar jest tam najmniejszy, zatem najmniejsze jest także przyspieszenie ziemskie.



Rys. 3. Ciężar ciała na biegunie i na równiku.

$$Q_{\text{równ.}} = F_{g \text{ równ.}} - m \omega^2 R_{\text{równ.}}$$

Dzieląc obie strony tego równania przez masę ciała, otrzymujemy związek między przyspieszeniami. Różnica między wartościami przyspieszeń: grawitacyjnego i ziemskiego jest równa wartości przyspieszenia odśrodkowego a_r :

$$a_r = \omega^2 R_{\text{równ.}} = \frac{4\pi^2}{T^2} R_{\text{równ.}}$$

Po podstawieniu odpowiednich wartości liczbowych otrzymujemy:

$$a_r = 0,034 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} = 3,4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$$

Jest to wartość przyspieszenia odśrodkowego, jakie nadawałoby wszystkim ciałom na równiku siła odśrodkowa. Gdyby ruch obrotowy Ziemi stanowił jedyną przyczynę zależności przyspieszenia ziemskiego od szerokości geograficznej, różnica $g_{\text{bieg}} - g_{\text{równ}}$ wynosiłaby $3,4 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-2}$. Pozostała część różnicy jest wynikiem spłaszczenia Ziemi. [2]
[3]

V. Podsumowanie.

Ruch obrotowy Ziemi było bardzo trudno udowodnić. Początkowo ruch obrotowy Ziemi tłumaczono za pomocą obserwacji kosmosu. Jednak brak precyzyjnych urządzeń pomiarowych powodował trudności z wytłumaczeniem tego zjawiska. Od XVII w. szukano dowodów fizycznych na istnienie ruchu obrotowego Ziemi dookoła osi.

Opisane doświadczenia związane z: wahadłem Foucaulta, odchyleniem ciał spadających ku wschodowi, siłą Coriolisa, zmianą g wraz z φ dostarczyły ostatecznych dowodów na to, że obserwowany ruch sfery niebieskiej ze wschodu na zachód jest tylko odzwierciedleniem ruchu obrotowego Ziemi z zachodu na wschód.

Obrót Ziemi sprawia, że na powierzchni planety następują po sobie kolejno: światło i mrok, dzień i noc. Skutkiem ruchu obrotowego Ziemi są wschody i zachody gwiazd.

VI. Literatura.

1. Jan Mietelski: „*Astronomia w geografii*”.
2. Jadwiga Salach, Barbara Sagnowska, Jerzy M. Kreiner: „*Fizyka z astronomią*”.
3. Maksymilian Piłat: „*Fizyka z astronomią*”.
4. A. Piekara: „*Encyklopedia fizyki współczesnej*”.
5. „*Internet*”.