

Mariusz Mroczek

Kurs fizyki
dla maturzystów i kandydatów na wyższe uczelnie

TOM I
MECHANIKA I GRAWITACJA

Mechanika i grawitacja jest tomem I podręcznika: *Kurs fizyki dla maturzystów i kandydatów na wyższe uczelnie*.

Autor

Mariusz Mroczek

Grafiki komputerowe oraz rysunki

Mariusz Mroczek

Skład wersji wstępnej

EDUKARIS - Ośrodek Kształcenia

Konsultacja naukowa

Prof. dr hab. Marek Demiański, Instytut Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego, Katedra Teorii Względności i Grawitacji

Korekta językowa

Tamara Książczak-Przybysz

Projekt okładki

DESIGN PARTNERS

Prawa autorskie

Opracowanie stanowi własność intelektualną autora i jest chronione prawami autorskimi. Wykorzystanie opracowania lub jego części wymaga zacytowania autora i placówki EDUKARIS udostępniającej tę pracę. Autor zabrania wykorzystywania niniejszej pracy, w każdym jej zakresie, podmiotom komercyjnym, chyba, że dokonano innych indywidualnych ustaleń. Autor zezwala na wykorzystywanie tego wykładu, autorskich przykładów i zadań, przez nauczycieli szkół publicznych wyłącznie za wiedzą autora i pod warunkiem wyraźnego oznaczenia autora i placówki EDUKARIS. Wspomniane zezwolenie dotyczy nauczycieli w szkołach publicznych i nauczycieli nauczających na indywidualnych zajęciach.

Opracowanie publikuje

EDUKARIS - Ośrodek Kształcenia

Smolna 13, 00-375 Warszawa

tel. 22 828 01 02

www.edukaris.pl,

kontakt z autorem: mariusz.mroczek@edukaris.pl

6.3	Przykłady i zadania z drgań i fal mechanicznych	355
	Drgania proste (rozwiązane przykłady)	355
	Drgania proste (zadania do rozwiązania)	365
	Fale mechaniczne (rozwiązane przykłady)	368
	Fale mechaniczne (zadania do rozwiązania)	378
7	Mechaniki bryły sztywnej	383
7.1	Pojęcia podstawowe	384
	Ciało sztywne	384
	Środek masy ciała	384
	Ruch ciała sztywnego - podstawowe uwagi	386
	Oś obrotu i kąt obrotu ciała sztywnego	387
	Prędkość kątowna i przyspieszenie kątowe w ruchu obrotowym	388
	Wzory dla ruchu obrotowego ze stałym przyspieszeniem kątowym	391
7.2	Dynamika ruchu obrotowego ciała sztywnego	392
	Moment pędu punktu materialnego	392
	Moment pędu punktu materialnego w ruchu po okręgu	394
	Zachowanie momentu pędu punktu materialnego	395
	Moment pędu ciała sztywnego i moment bezwładności	396
	Moment siły	399
	Równania ruchu ciała sztywnego	400
	Warunki statyki ciała sztywnego	402
7.3	Praca i energia, zasady zachowania	403
	Praca momentu siły	403
	Energia kinetyczna	403
	Twierdzenia o pracy i energii	405
	Zasada Zachowania Momentu Pędu Ciała Sztywnego	407
	Przykłady zachowania momentu pędu	408
7.4	Przykłady i zadania z mechaniki bryły sztywnej	412
	Mechanika bryły sztywnej (rozwiązane przykłady)	412
	Mechanika bryły sztywnej (zadania do rozwiązania)	435
II	Grawitacja	443
8	Od Platona do Newtona	445
8.1	*O kształtowaniu się idei grawitacji	446
	*Zarys Greckiej filozofii natury	447
	*Kopernikanizm	453
	*Galileusz. Grawitacja, mechanika, astronomia, sprawa	456
	*Kepler i nowe oblicze astronomii	462
	Prawa Keplera	464
	*Błędne założenia fizyki kartezjańskiej	468

	*Newton, wzniesiony przez gigantów	471
	*Principia	473
8.2	Matematyczne Zasady Filozofii Przyrody Newtona	474
	O sile docentralnej (wg Księgi I)	474
	O zależności siły od odległości (wg Księgi I)	475
	Dalsze wnioski z Księgi I	476
	O metodzie filozofowania (wg Księgi III)	477
	O zjawiskach niebieskich (wg Księgi III)	478
	O Powszechnym Ciężeniu (wg Księgi III)	479
	O sile grawitacji (wg Księgi III)	483
	„Et hypotheses non fingo”	486
9	Teoria Grawitacji Newtona	489
9.1	Siły grawitacji	489
	Prawo Powszechnego Ciężenia	489
	Obliczanie grawitacji pomiędzy ciałami	492
	Przyciąganie się ciał o sferycznie symetrycznym rozkładzie masy	494
9.2	Pole grawitacyjne	497
	Równoważność ładunku grawitacyjnego i masy bezwładnej	497
	Wprowadzamy pojęcie pola grawitacyjnego	502
	Natężenie pola grawitacyjnego	503
	Statyczne, centralne i sferycznie symetryczne pole grawitacyjne	505
	*Fale pola grawitacyjnego	507
9.3	O ruchach ciał w centralnym polu grawitacyjnym	511
	Ruchy ciał po orbitach kołowych	511
	Wiadomości o elipsie	513
	Prawa Keplera	514
	Energia w centralnym polu grawitacyjnym	518
	Zasady zachowania w centralnym polu grawitacyjnym	520
	*O wyprowadzeniu torów ruchu w centralnym polu grawitacyjnym	522
	O możliwych torach ruchu w centralnym polu grawitacyjnym	523
	Ruchy po torach otwartych	525
	Ruchy po torach zamkniętych	527
	Ruch po torze radialnym	531
	Prędkość ucieczki	531
9.4	*O ruchach względem wspólnego środka masy	535
	*O ruchu dwóch ciał oddziałujących grawitacyjnie	538
9.5	Przykłady i zadania	541
	Przykłady z rozwiązaniami	542
	Zadania do samodzielnego rozwiązania	568

przyczyny podstawowe?

To tylko niektóre pytania dotyczące powszechnych zjawisk naturalnych na niebie i Ziemi. Zjawisk we Wszechświecie tworzących Rzeczywistość. Zjawisk badanych przez człowieka od tysiącleci, a związanych ze światłem oraz grawitacją. W tej części wykładu zajmujemy się właśnie grawitacją.

*Zarys Greckiej filozofii natury

Platon, matematyka, proporcja, idea, przestrzeń Korzenie nauki sięgają filozofii starożytnych Greków. W fizyce takich uczonych, jak Kepler, Galileusz, Newton i Einstein, dostrzega się elementy filozofii Platona (ur. ok 427 r. p.n.e, zm. ok. 347 r. p.n.e.). Platon, podobnie jak jego spadkobiercy, poszukiwał matematycznego porządku w otaczającym go Świecie. Był kontynuatorem myśli pitagorejczyków o tym, że Wszechświat można opisać za pomocą matematyki. Znane Pitagorejczykom proporcje długości napiętych strun, które wydają *harmonijne* dźwięki, miały być inspiracją do poszukiwania w otaczającym Świecie *harmonii*, czyli proporcji, ładu, stosunku wielkości. Harmonia miała być własnością *kosmosu*. *Kosmos oznacza ład, harmonia jest dla pitagorejczyków synonimem piękna*. Piękno jest dla Platona ważnym kryterium w poszukiwaniu prawdy.

W filozofii Platona, czyli w jego metodzie poszukiwania prawdy o świecie, ważne miejsce zajmuje pojęcie *idei* oraz *rozumu*. W dialogu *Timaios* Platon pisze: „ (...) należy przede wszystkim rozróżnić te dwie rzeczy. Coś, co istnieje wiecznie, a powstania nie ma, i coś, co powstaje zawsze, a nie istnieje nigdy. Jedno rozumem, który ujmuje ściśle uchwycić można, jako zawsze takie samo, drugie mniemaniem z pomocą spostrzeżeń nieścislej daje się uchwycić jako coś, co powstaje i ginie (...)” W odwiecznym świecie idei Platon lokuje takie pojęcia, jak prawda, piękno, sprawiedliwość, a także geometrię i niezmienną prawa natury (fizyki). *Idee* są wieczne, człowiek zaś może odkrywać je tylko za pomocą czystego rozumu - a nie postrzeżeniami zmysłowymi. Jako przykłady rozumowego odkrywania idei wiecznych Platon przywołuje naukę geometrii (dialogi: *Menon*, *Fedon*). Rzeczywisty Wszechświat jest według Platona odwzorowaniem ze świata idei. W świecie rzeczywistym nieustannie dokonują się przemiany: coś powstaje, coś się zmienia, coś ginie. To wszystko można uchwycić właśnie na podstawie spostrzeżeń zmysłowych i doświadczenia, jednak sam wzorzec, według którego to się dzieje, jest już ideą uchwyconą czystym rozumem.

Rzeczywistość jest według Platona nie do końca doskonałym odzwierciedleniem świata idei. Na przykład w świecie idei mogą istnieć dwie równoległe do siebie i nieskończone proste, które nigdy się nie przetną, oraz mogą istnieć trójkąty, dla których suma kątów wewnętrznych wynosi idealnie 180°. W odróżnieniu od tego, wskazanie takich idealnych prostych równoległych lub idealnie płaskich trójkątów w świecie rzeczywistym zawsze obarczone będzie błędem, choćby ze względu na krzywiznę powierzchni, na której wykonywalibyśmy takie zadania lub być może nawet ze względu na krzywiznę czasoprzestrzeni. Pomimo tego posługujemy się geometrią Euklidesa, ponieważ z dużą dokładnością opisuje ona relacje przestrzenne. Geometria należy więc do platońskiego świata idei. Także prawa fizyki lub pojęcia fizyczne są pewnymi ideami. Na przykład Zasada Bezwładności Galileusza i pojęcie iner-

cialnego układu odniesienia. W świecie rzeczywistym niemożliwe jest *idealne* przetestowanie Zasady Bezwładności, ponieważ niemożliwe jest wskazanie ciała idealnie izolowanego od jakichkolwiek oddziaływań. Mimo iż doświadczalna weryfikacja Zasady Bezwładności zawsze będzie obciążona jakimś błędem, to przyjmujemy tę idealną zasadę jako fundament mechaniki Galileusza - Newtona.

W koncepcjach platońskich idei odnajdujemy pojęcie modelu teorii fizycznej. W celu zbudowania teorii fizycznej poszukuje się w zjawiskach niezmiennych praw fundamentalnych i ujmuje je w sposób ścisły. Dalej na ich podstawie dowodzi się wszelakich i zgodnych ze zjawiskami twierdzeń. Tak czynili Galileusz, Kepler, w końcu Newton i Einstein. Model danej teorii fizycznej jest w istocie ideą, która poprawnie opisuje Rzeczywistość przy pewnych założeniach, które jednak nie zawsze mogą być spełnione w tej Rzeczywistości. Przewidywania modelu danej teorii mogą się bardziej lub mniej różnić od rzeczywistych wyników doświadczeń fizycznych, ponieważ w Rzeczywistości mogą występować czynniki lub warunki, których dany model nie obejmuje.

Doszukując się geometrycznych zależności w przyrodzie, Platon na przykład opisywał materię za pomocą wielościanów foremnych (tak zwanych brył platońskich). Platon zakładał, że ciała materialne mogą być zbudowane z czterech pierwiastków: ognia, wody, ziemi i powietrza. Każdy z tych pierwiastków miał się składać z cząsteczek o kształcie określonych wielościanów foremnych. Platon konsekwentnie opisuje interakcje pomiędzy różnymi postaciami materii, a także jej przemiany, za pomocą wspomnianych założeń. Jakkolwiek ocenimy z dzisiejszego punktu widzenia koncepcje Platona, niewątpliwie mamy do czynienia z początkiem *matematycznej metody filozofowania o przyrodzie*. W filozofii Platona dostrzegamy ilościowe prawa (powiedzielibyśmy - wzory). Platon pisze w *Timaiosie*, że pierwiastki (czyli wielkości fizyczne) musi zawsze spajać jakaś *proporcja*. To przecież nic innego, jak stwierdzenie, że pomiędzy wielkościami fizycznymi występują jakieś niezmiennie relacje (czyli prawa ilościowe, wzory). Według Platona matematyka jest niezbędnym narzędziem do uprawiania filozofii. Legenda głosi, że nad wejściem do swojej akademii Platon umieścił napis: „Niech nie wchodzi tutaj nikt, kto nie zna geometrii”.

Posiłkując się argumentem harmonijnej własności Wszechświata, Platon uważał, że ruchy planet są jednostajnymi ruchami kołowymi. Platon zakłada kulistą symetrię Świata z Ziemią w środku. Na przykład z takiej symetrii miała wynikać naturalna własność ciał do opadania ku centrum. Pomimo błędnych założeń o Ziemi w środku Świata, dostrzegamy w tym załączek Prawa Powszechnego Ciężenia. Dalej, co ważne, z rozważań Platona na temat ruchu ciał w kierunku pionowym względem powierzchni Ziemi wynika (dialog *Timaios*), że ruch ciał do dołu lub ku górze zależy od rodzaju materii środowiska, w którym ciała się znajdują (np. w wodzie, w powietrzu) oraz rodzaju materii samych ciał. Platon wydaje się przeczuwać, że gdyby nie było materii środowiska wpływającego na ruch ciał, to wszystkie ciała opadałyby niezależnie od rodzaju ich materii. U Platona dostrzegamy pierwsze intuicje dotyczące sił grawitacji oraz sił wyporu.

Oprócz wymienionych wyżej zagadnień składających się na tradycję platońską, fizyka nowożytna posługuje się pojęciami pojawiającymi się już u Platona: czas, przestrzeń, próżnia materialna. *Pojęcie przestrzeni pojawia się u Platona i to w całkowicie odrębnym kontekście*

od materii, czyli jako odrębny od materii byt. W przestrzeni rzeczy mogą powstawać, w przestrzeni rzeczy zajmują miejsca, w przestrzeni rzeczy mogą zmieniać miejsca a ponadto mogą tam ulegać przemianom (dialog *Timaios*). Przestrzeń jest niezmienna i wieczna. Wszelkie procesy dzieją się w przestrzeni, a także w czasie. Czas według Platona powstał na wzór wieczności i jest odmierzany zjawiskami fizycznymi (np. ruchami planet). W tych poglądach przejawia się newtonowska koncepcja przestrzeni absolutnej, czasu absolutnego, a także próżni materialnej. Platon twierdzi, że istnieje jeden Wszechświat, ponieważ powstał według wzorca wiecznego, najpiękniejszego i najdoskonalszego, a zatem jedyne (dialog *Timaios*). Powstał według wzorca, który daje się uchwycić myślą i rozumem. Bardzo podobne poglądy o tym, że Wszechświat posiada własność bycia określonym rozumowo, wygłosił po ponad dwóch tysiącach lat Einstein.

Arystoteles Arystoteles (ur. 384 r. p.n.e, zm. 322 r. p.n.e.) był uczniem Platona, jednak jego filozofia przyrody różniła się od platońskiej. Filozofia Arystotelesa także miała, jak zobaczymy, wpływ na historię nauki. Przypomnijmy, że grecki filozof Arystoteles jako jeden z pierwszych zajmował się zagadnieniem ruchu ciał. Mieliśmy okazję poznać fałszywe poglądy tego uczonego, zgodnie z którymi do trwania ruchu ze stałą prędkością wzdłuż linii prostej konieczne miało być działanie popychające lub pociągające ciało, gdyby natomiast owo działanie ustało, to ciało rzekomo miało się zatrzymać. Zatrzymywanie się ciała w ruchu miało rzekomo następować samo z siebie. Z tym utrzymującym się przez wieki poglądem ostatecznie rozprawił się Galileusz. Zauważył on, że ciało nie zatrzymuje się samo z siebie, tylko zatrzymuje się w wyniku tarć i oporów działających na poruszające się ciało. W związku z tym do trwania ruchu (w układzie odniesienia, który współcześnie nazywamy inercjalnym) ze stałą prędkością wzdłuż linii prostej, po wyeliminowaniu wszelkich tarć oraz oporów, nie potrzeba żadnego działania popychającego, o którym mówił Arystoteles. Arystoteles tak naprawdę nie wyobrażał sobie ciała uwolnionego od tarć z powierzchniami innych ciał lub od oporów ruchu, jaki stawia powietrze lub inny ośrodek materialny. *Arystoteles nie wprowadził pojęcia ciała izolowanego od oddziaływań, gdyż to wiązałoby się z koncepcją próżni materialnej, której w fizyce arystotelejskiej (a potem kartezjańskiej) być nie mogło!*

Błędne ogólne poglądy Arystotelesa na temat ruchu musiały skutkować błędnymi poglądami na temat zagadnień związanych z ciężeniem ciał. *Opierając się jedynie na obserwacjach ruchu ciał w powietrzu, grecki uczony nie mógł sformułować poprawnych poglądów na temat ruchu tylko pod wpływem ciężenia (grawitacji), ponieważ tego ciężenia (grawitacji) nie wyodrębnił od innych oddziaływań na ciało!* Arystoteles konstruował teorię tylko i wyłącznie na podstawie tego, co zaobserwował, i nie wyodrębniał za pomocą dedukcji zjawisk podstawowych z tych bardziej złożonych. W istocie, *w warunkach ziemskich* można zaobserwować, że ciała spadają na Ziemię z różnymi prędkościami (np. piórko i młotek), a niektóre wręcz się unoszą (np. balony i bańki wypełnione lżejszymi od powietrza gazami, różne pyłki itp.) i to też z różnymi prędkościami. Wiemy dzisiaj, że przyczyną tego są opory powietrza działające na ciało w ruchu oraz siła wyporu aerostatycznego powietrza działająca na ciało. Brak uwzględniania tych istotnych czynników wpływających na ruch opuszczonych ciał pociągał za sobą fakt, że Arystoteles nie zadawał sobie pytań o to, jak wyglądałby ruch ciała opusz-

czonego na ziemię, gdyby owe czynniki były wyeliminowane. W fizyce Arystotelesa czynniki te nawet nie miały możliwości być eliminowane, niedopuszczalne było bowiem pojęcie materialnej próżni, nawet w eksperymencie myślowym. *Innymi słowami w nauce Arystotelesa grawitacja po prostu nie została wyodrębniona spośród innych czynników wpływających na ruch ciała, podobnie jak nie funkcjonowało pojęcie ciała swobodnego oraz materialnej próżni.*

Zarys fizyki Arystotelesa Niniejszym postaramy się właśnie przybliżyć zarys filozofii natury (fizyki) arystoteleskiej oraz jej podstaw pojęciowych i metodologicznych w kontekście interesujących nas problemów, tj. ciężenia, ruchów ciał ziemskich oraz ruchów ciał niebieskich. Arystoteles patrzył na przyrodę i dziejące się zjawiska w sposób skrajnie empiryczny, opierając się na zmysłach. To znaczy nie szukał w przyrodzie jej matematycznych praw ani nie dedukował zjawisk o podstawowym charakterze ze zjawisk złożonych. Zgodnie z taką opozycyjną do platońskiej doktryną, nie istnieją zjawiska ani rzeczy niedostępne ludzkim zmysłom, co jest równoważne temu, że rzeczy i zjawiska są dokładnie takie, jak się je postrzega. Ten pogląd przez wiele wieków kształtował naukę, praktycznie aż po czasy wynalezienia mikroskopu oraz teleskopu. W swojej filozofii Arystoteles posługiwał się także metafizycznymi argumentami, co w owych czasach było powszechne i co ukazuje jego teoria Świata. Twierdzi między innymi, że „niebo posiada ciało okrągłe, które z natury swej porusza się zawsze w kole”, ponieważ taki kształt jest najlepiej dostosowany do jednostajnego obrotowego ruchu nieba. Celem nieba jest właśnie jego wieczny ruch. Kuliste niebo jest całym Światem, poza którym niczego nie ma. Korzystając z astronomicznej teorii Eudoksa, Arystoteles tłumaczy ruch gwiazd, planet i Słońca poprzez obrotowy ruch układu sfer niebieskich. Gwiazdy, Słońce, a także każda planeta z osobna, byłyby unoszone przez własny układ nawet kilku obracających się współśrodkowych sfer. W centrum Świata oraz tych sfer znajdowała się Ziemia. Owe sfery były ułożone ściśle jedna nad drugą, obracały się każda w kierunku odpowiednim do wyjaśniania ruchu planet, a ponadto miały być utworzone z eteru. Pomiędzy sferami nie mogło być żadnych pustych obszarów. *Eter miał być niezniszczalnym boskim budulcem, substancją nieznaną z ziemskich doświadczeń, która w naturalny sposób porusza się ruchem obrotowym.* Koncepcja eteru niejednokrotnie w dziejach fizyki będzie powielana w celu „objaśniania” i interpretowania rozmaitych zjawisk. Ów mityczny eter będzie powracał w różnych zmodyfikowanych formach, niekiedy przypominających eter arystotelesowski, w fizyce kartezjańskiej XVII i XVIII wieku, a także później, w XIX i XX wieku przy okazji prób interpretacji fal elektromagnetycznych. Eter miał wypełniać więc cały Świat. *W związku z tym w fizyce arystotelesowskiej nie było miejsca na pojęcie próżni. W tej fizyce niedopuszczalne jest, aby ciała mogłyby oddziaływać ze sobą na odległość bez pośrednictwa ośrodka materialnego, w tym eteru.*

Ten skomplikowany układ Świata jako sfer eteru i znajdujących się tam planet oraz gwiazd, miał trwać w wiecznym ruchu. Sfera Księżyca miała stanowić granicę obszaru Świata, w którym zachodzi wieczny i niezmienny ruch obrotowy sfer eteru. Pod sferą Księżyca miał znajdować się obszar ziemski, którego budowa opiera się na czterech elementach, jakimi są: ogień, powietrze (elementy lekkie), ziemia, woda (elementy ciężkie). Ciała ziemskie będące pewną mieszaniną tych elementów dzieliły się w związku z tym na lekkie i ciężkie.

Tak jak według Arystotelesa naturalnym ruchem eteru ponad sferą Księżyca jest ruch obrotowy, tak naturalnym ruchem ciał ziemskich jest ruch wzdłuż pionowej linii prostej. Ciała lekkie miały same z siebie unosić się ku sferze Księżyca wzdłuż pionowej linii prostej, ciała ciężkie natomiast miały opadać wzdłuż pionowej linii prostej ku centrum Świata, którym miał być środek Ziemi. Ponadto tendencja do opadania ciała ku centrum jest tym większa, im bliżej niego ciało się znajduje. To ostatnie możemy akurat uznać za „pierwsze jaskółki” Prawa Powszechnego Ciężenia Newtona. Pojawia się także na horyzoncie, nieco zniekształcony, ale jednak, zarys pojęcia ciężaru ciała.

Wielka jest zasługa Arystotelesa dla nauki, niemniej wskaźmy na ślepe zaułki fizyki arystotelesowskiej. Uczynimy to nie dla samego ich wytykania, ale aby uświadomić potężny wpływ arystoteleizmu na historię fizyki nowożytnej. Odrzucanie koncepcji arystotelesowskich przez Kopernika, Keplera, Galileusza czy Newtona nigdy nie odbywało się bez wielkich sporów naukowych czy nawet teologicznych. Niektóre fałszywe koncepcje fizyki arystotelesowskiej, które przez wieki mają wpływ na wielkich uczonych, można dzisiaj ująć w kilku punktach. **1)** *Prawa fizyki zostają wyraźnie oddzielone granicą sfery Księżyca (podczas gdy prawa fizyki są identyczne w całym Wszechświecie).* **2)** *Zjawisko ciężenia ma dotyczyć jedynie ciał obszaru ziemskiego (Newton wykaże, że ciężenie jest powszechne i dotyczy wszystkich ciał we Wszechświecie).* **3)** *Swobodny ruch ciał ciężkich lub lekkich ma zależeć od ich własności (Galileusz wykaże, że ruch spowodowany jedynie ciężeniem, przy pominięciu innych czynników, nie zależy od własności materii ciał).* **4)** *Nie istnieje materialna próżnia (istnieje próżnia materialna).* **5)** *Ciała działają na siebie tylko poprzez wzajemny kontakt lub za pośrednictwem ośrodka bądź eteru, w którym się znajdują (gravitacja Newtona, Einsteina, a także teoria elektromagnetyzmu nauczają, że oddziaływanie może przenosić się w próżni, bez pośrednictwa żadnego ośrodka; po Newtonie zostanie wprowadzone pojęcie pola, które przenosi oddziaływania i które może być wytwarzane w próżni materialnej przez ciała.)* **6)** *Centrum Świata stanowi Ziemia (Ziemia nie jest wyróżnionym układem odniesienia).*

Euklides i *Elementy* Wielki wkład w rozwój nauki miał Euklides (ur. ok. 365 r. p.n.e, zm. ok. 300 r. p.n.e.). Euklides jest autorem wielkiego dzieła, jakim są *Elementy*. Zawiera ono fundamentalny wykład matematyki, szczególnie geometrii i teorii proporcji. Z *Elementów* Euklidesa czerpali później wszyscy uczeni. Euklides wyprowadza swoją geometrię z pięciu aksjomatów. Aksjomaty geometrii Euklidesa omówiliśmy na początku podręcznika. Geometria Euklidesa jest wyprowadzona w sposób syntetyczny i w zasadzie, jak nauczają matematycy, prezentowane w dowodach diagramy, na których rysujemy linie proste, okręgi, trójkąty powinny być traktowane jako *symbole* euklidesowych pojęć i konstrukcji.

Formalne podejście do geometrii Euklidesa jest na tyle trudne, że nie byłoby możliwe jej powszechne nauczanie od wczesnych lat szkolnych. Okazuje się szczęśliwie, że formalna geometria Euklidesa świetnie opisuje relacje pomiędzy obiektami i wielkościami, które można wyznaczać w przestrzeni za pomocą ciał sztywnych oraz cyrkla. Geometria Euklidesa ma więc swoją reprezentację w Rzeczywistości. Podstawowe konstrukcje formalne, na przykład pozwalające określać takie same odcinki i kąty do zadanych, ale w różnych miejscach przestrzeni, wprowadzają pojęcie odległości w przestrzeni. To formalne pojęcie odległości

możemy w Rzeczywistości utożsamić z długością jakiegoś ciała sztywnego. Dzięki temu formalne pojęcie okręgu możemy reprezentować w Rzeczywistości. Dlatego rozumiemy takie pojęcia, jak równoległość prostych i prostopadłość prostych. Twierdzenia geometrii Euklidesa zgadzają się z ogromną dokładnością z konstrukcjami i pomiarami, jakie można wykonać za pomocą sztywnego pręta i cyrkla w przestrzeni fizycznej, ponieważ właśnie możemy realizować w Rzeczywistości dozwolone formalne konstrukcje Euklidesa. Możemy więc określać figury przystające, figury podobne, sprawdzić słuszność twierdzenia Pitagorasa lub twierdzenia Talesa. Możemy obliczać pola figur, zależności pomiędzy odcinkami w okręgu, określać figury wpisane i opisane na okręgu i wiele innych. Geometria euklidesowa jest modelem matematycznym opisującym z wielką dokładnością lokalne własności geometryczne przestrzeni, w której żyjemy.

Abstrakcyjne aksjomaty swojej geometrii Euklides mógł postawić na bazie pewnego rodzaju intuicji, popartej obserwacją lokalnych geometrycznych własności ciał sztywnych. Następne zaś twierdzenia geometrii Euklidesa wynikają w drodze logicznej dedukcji tylko z samych aksjomatów. Dedukowanie twierdzeń z aksjomatów nazywa się w nauce metodą aksjomatyczno-dedukcyjną. Odrzucenie piątego aksjomatu Euklidesa prowadzi do geometrii, jakiej używa się w Ogólnej Teorii Względności.

Ptolemeusz i *Almagest* Pomnikiem antycznej nauki stojącym obok *Elementów* Euklidesa jest niewątpliwie *Almagest* Ptolemeusza (ur. ok. 100 r., zm. 168 r.). *Almagest jest wykładem astronomii, której podstawę stanowi geometria. Almagest jest zwieńczeniem teorii astronomicznej Greków, której głównym założeniem jest geocentryzm. Początki greckiej astronomii sięgają pierwszych platońskich koncepcji o kołowych i jednostajnych ruchach planet oraz koncepcji arystotelesowskich o sferach niebieskich. W teorii Ptolemeusza Ziemia jest centrum Świata, natomiast planety poruszają się dookoła Ziemi po dwóch kołach i to w sposób jednostajny po każdym kole: większym (dyferencie) i mniejszym (epicyklu). Ułożenia tych wszystkich kół, ich wielkości, szybkości obrotowe i tym podobne zależności, stanowiły geometryczny model Świata. Za kołem wielkim Saturna miała znajdować się sfera gwiazd stałych. Gwiazdy na sztywno związane z tą sferą miały wykonywać razem z nią dobowy ruch obrotowy ze wschodu na zachód. Teoria Ptolemeusza pozwalała obliczać dosyć dokładnie położenia planet na niebie dla zadanej daty i godziny oraz pozwalała przewidywać zaćmienia Słońca. Zaznaczmy przy tym, iż teoria Ptolemeusza była niezmiernie skomplikowana i bazowała na dosyć sztucznych założeniach.*

Ptolemeusz był już nowożytnym greckim uczonym, który stworzył model matematyczny dla pewnej kategorii zjawisk. Model ten dawał poprawne liczbowo wyniki. Był więc użyteczny. Ptolemeusz jako pierwszy użył matematyki do wyznaczania położenia ciał niebieskich. Ptolemejska „maszyna” zagościła jako teoria opisująca świat na prawie półtora tysiąca lat. Rewolucyjne poglądy na temat ruchów planet miał sformułować Kopernik. Koncepcje kopernikańskie były potem inspiracją dla Keplera oraz Galileusza. System Keplera poprowadził Newtona do odkrycia Prawa Powszechnego Ciężenia. Wszyscy ci uczeni korzystali z geometrii Euklidesa. Czy byłby Newton bez Keplera i Euklidesa? Czy byłby Kepler i Galileusz bez Kopernika i Euklidesa? Czy byłby Kopernik bez Ptolemeusza i Euklidesa?

Czy byłby Ptolemeusz bez Platona i Euklidesa? Czy byłoby Platon i Euklides, gdyby nie Pitagoras i Tales? Czy byłby Einstein bez nich wszystkich?

Inne wzmianki W pracach greckiego filozofa Plutarcha (ur. ok. 50 r., zm. 125 r.) istnieją wzmianki świadczące o zadziwiająco trafnych hipotezach ówczesnych uczonych na temat sił przyciągania się planet. Oto zdumiewający swoją trafnością fragment z Plutarcha, w którym przejawia się zarówno prawo bezwładności, jak i koncepcja siły centralnej utrzymująca ciała na orbitach.

„Wszelako Księżyc zachowuje od upadku sam ruch oraz gwałtowność wirowania, tak jak pociskom włożonym do procy przeszkadza spaść w dół wirowanie w kółko. Bo każde ciało idzie za własnym naturalnym ruchem, jeśli nic innego go nie odwraca, i dlatego ciężar nie ściąga Księżyca w dół, zahamowany rozpędem obrotu. Być może należałoby raczej się dziwić, gdyby był on całkiem nieruchomy i tkwiący w miejscu jak Ziemia (...) środek. Jest to bowiem miejsce (to jest fragment o sile ciężenia działającej na Księżyc) dokąd zbiegają wszystkie siły ciężenia, tam dążą i tam się zbiegają ze wszystkich stron.”

Ponadto istnieją źródła greckie (w tym także anonimowe), w których ruch planety po orbicie przedstawiony jest jako złożenie dwóch rodzajów ruchów następujących po sobie raz po raz i odbywających się na bardzo krótkich odcinkach. Jeden z tych ruchów planety miałby być jej naturalnym ruchem ze stałą szybkością i wzdłuż linii prostej w kierunku stycznym do orbity, natomiast następujący tuż po nim ruch miał się odbywać na podobieństwo opadania w kierunku punktu centralnego (np. Słońca) pod wpływem siły ściągającej planetę. Nie sposób nie zauważyć tu pierwowzoru zasady bezwładności oraz koncepcji siły centralnej, a nawet II Zasady Dynamiki.

*Kopernikanizm

Źródłem rewolucji naukowej wieku XVII jest dzieło polskiego uczonego, Mikołaja Kopernika (ur. 1473 r., zm. 1543 r.), *De revolutionibus orbium coelestium* (*O obrotach sfer niebieskich*). Kopernik w swojej pracy naukowej opierał się na *Almageście* Ptolemeusza i ponadczasowych *Elementach* Euklidesa. Kopernika we wczesnym okresie życia inspirowały prace wielkich ówczesnych astronomów: Regiomontanusa i Peurbacha. Wtedy u Kopernika pojawiło się sceptyczne nastawienie do teorii Ptolemeusza. Wyjaśnienia wszelkich subtelności ruchów planet oraz gwiazd wydały mu się zbyt sztuczne. Sam, całkowicie w pojedynkę, Kopernik podejmuje się dzieła wielkiego. Postanawia odkryć prawdziwą symetrię Świata, postanawia odkryć prawdziwy obraz ruchów ciał niebieskich. Temu zagadnieniu naukowemu poświęca całe swoje życie. Tworzy wielkie dzieło, które o mały włos nie ujrzałoby światła dziennego. Dzięki staraniom i pomocy Retyka, młodego człowieka który był zafascynowany Kopernikiem, uczonej jeszcze przed śmiercią doczekał się wydania *De revolutionibus orbium coelestium*. Narodziło się dzieło przełomowe, dzieło, które za kilkadziesiąt lat zapłodni umysły Galileusza i Keplera.

Teoria Kopernika zawiera już cechy współczesnej teorii naukowej. Oparta była na obserwacjach oraz dowodach matematycznych. Jej zasady były niezmiennie. To znaczy, że założenia były raz ustalone i nie były dopasowywane „na bieżąco” do różnych zjawisk. *Założenia teorii Kopernika są obiektywnymi prawdami fizycznymi, niezależnymi od układu odniesienia, w którym się je opisuje.* Najważniejsze idee teorii Kopernika, oparte na dowodach matematycznych wykorzystujących wielkości z obserwacji, są następujące. **1) Ziemia oraz inne planety obiegają Słońce. Ziemia jest jedną z planet.** **2) Jedyńm ciałem obiegającym Ziemię jest Księżyc.** **3) Ziemia wiruje dookoła własnej osi wykonując jeden obrót w ciągu doby. Oznacza to, że Ziemia obraca się względem gwiazd, nie zaś to, że sfera gwiazd obraca się względem Ziemi.** **4) Obiegi planet dookoła Słońca zabierają więcej czasu, niż wynikałoby to z teorii Ptolemeusza. Ponadto czasy te rosną wraz z odległością planet od Słońca. Kolejność planet licząc od Słońca przedstawia się następująco: Merkury, Wenus, Ziemia, Mars, Jowisz, Saturn.** **5) Wszechświat jest dużo większy niż sądzono. Odległość Ziemi od Słońca jest nieporównywalnie mniejsza od odległości Ziemi do gwiazd.**

W systemie Ptolemeusza ciała niebieskie miały krążyć dookoła nieruchomej Ziemi, w systemie Kopernika natomiast ciała niebieskie, nie wyłączając Ziemi, miały krążyć dookoła nieruchomego Słońca. Na obie teorie niektórzy mogą formalnie spoglądać bez stwierdzania o ruchu Ziemi lub Słońca, gdy interesuje ich wyłącznie opis ruchu planet: w systemie Kopernika ruch planet opisywany jest z punktu widzenia obserwatora na Słońcu, a w systemie Ptolemeusza ruch planet opisywany jest z punktu widzenia obserwatora na Ziemi. W sensie matematycznym Teoria Kopernika była podobna do modelu, jakim byłby widziany ze Słońca system Ptolemeusza. Obie teorie były matematycznie równoważne i dawały bardzo podobne wyniki. *Teoria Kopernika była matematycznie prostsza i bazowała na mniejszej liczbie sztucznych założeń niż teoria Ptolemeusza; jawiła się jakby możliwe uproszczenie teorii Ptolemeusza, jakby jej najprostszą z możliwych symetrią. Była praktyczna i bardziej wygodna do rachunków.* Dla tych astronomów, którzy nie rozważali teorii Kopernika z fizycznego punktu widzenia, a traktowali ją jedynie jak fikcyjny opis ruchu planet widzianych z pozycji Słońca, teoria Kopernika była po prostu użytecznym narzędziem rachunkowym do obliczania pozycji na niebie gwiazd, planet i Księżyca. Dzieło Kopernika było tak praktyczne, że nawet Święte Oficjum doceniało ten fakt i przy okazji późniejszych procesów Galileusza nie wprowadziło go od razu na indeks ksiąg zakazanych, tylko ograniczyło się do poprawek w przedmowie dzieła. Później jednak Inkwizycja zakazała dzieł Kopernika. Kopernik przyniósł bowiem nie tyle wygodną maszynkę rachunkową, ile nowe idee. *Kopernik twierdził, że Ziemia porusza się dookoła Słońca. Taka miała być obiektywna, niezależna od obserwatora prawda fizyczna, a nie li tylko wnioski związane z względnością ruchów obserwowanych przez hipotetycznego obserwatora na Słońcu.* Warto wspomnieć o skandalu, jaki wybuchł w związku z drukiem dzieła. Otóż osoba wykonująca poprawki edytorskie rękopisu, niejaki Osiander, całkowicie na własną rękę i bez porozumienia z Kopernikiem oraz nadzorującym wydanie Retykiem, potajemnie podmienił wstęp Kopernika na własną „Przedmowę do czytelnika”. Owa przedmowa miała właśnie relatywizować dzieło Kopernika i przedstawiać je jako wyłącznie użyteczną hipotezę matematyczną. Podkreślamy, że Kopernik nie zgadzał się z takimi ustaleniami. Swoją teorię traktował w kategoriach prawdy fizycznej. Temu poświęcił całe życie, a nie zaś

zadaniu na przekształcanie ruchów.

Prawdy niezależne od układu odniesienia Podkreślamy, że Mikołaj Kopernik nie traktował swojej teorii jedynie w kategoriach zadania na przekształcania opisu ruchów planet z układu odniesienia Ziemi do opisu ruchów w układzie odniesienia Słońca. Kopernik wyraźnie zaznaczał fizyczny charakter swojej rewolucyjnej teorii. Podkreślał absolutne prawdy fizyczne, to znaczy fakty niezależne od przyjętego do opisu ruchów układu odniesienia. Takimi właśnie faktami są bezwzględne ruchy planet dookoła Słońca. Na taką prawdę fizyczną wskazywały wielkości opisujące ruch planet, a także relacje pomiędzy tymi wielkościami. Owe wielkości, jak na przykład odległość planety od Słońca albo jej okres obiegu dookoła Słońca, a także związki pomiędzy nimi, były niezależne od tego, jaki układ odniesienia przyjmując do opisu ruchu ciał niebieskich. W każdym układzie odniesienia te obiektywne wielkości opisujące ruch danej planety względem Słońca można określić. Przecież sam Kopernik wykonywał obserwacje nie skądinąd, tylko z Ziemi. W układzie odniesienia Ziemi określał przecież wielkości opisujące ruch ciał niebieskich. Nie wyszło jednak uczonemu, że ruchy ciał niebieskich względem Ziemi posiadają jakieś absolutne, szczególne cechy, tylko zaobserwował i obliczył, że to ruchy planet względem Słońca posiadają cechy absolutne. Tymi cechami są choćby właśnie ustalona odległość planety od Słońca oraz ustalony okres obiegu dookoła Słońca. A także stwierdzona relacja, że ów okres obiegu planety dookoła Słońca rośnie wraz z jej odległością od Słońca. (Tę ścisłą relację, oraz wiele innych rzeczy, doprecyzuje dopiero Kepler.) Takie absolutne cechy ruchu planet w odniesieniu do Słońca odkryłby nasz Kopernik, gdyby wykonywał obserwacje z Merkurego lub Wenus lub Marsa lub Jowisza lub Saturna. W związku z tym, absolutne cechy ruchu planet względem Słońca wskazują na obiektywny ruch planet właśnie względem Słońca. Dlatego opis ruchu planet w układzie odniesienia Słońca jest najwygodniejszy, niemniej wcale nie chodzi o sam opis ruchu planet. Podkreślamy - chodzi o fizykę, chodzi o obiektywne cechy tego ruchu.

Kopernikanizm katalizatorem nauki Teoria Kopernika zmusza do stawiania pytań związanych z fizyką nieba. *1) System Kopernikański wyróżnia rolę Słońca poprzez umieszczenie go w centrum ówczesnego Wszechświata. Czy w związku z tym Słońce wpływa w jakiś sposób na ruchy planet? 2) Planety okrążając Słońce znajdują się podczas ruchu w określonej dla każdej z nich odległości od Słońca. Odległości te różnią się od siebie znacząco. W związku z tym sfery niebieskie, do których przynależały te planety, musiały być oddzielone od siebie wielkimi pustymi przestrzeniami. Co zatem znajduje się pomiędzy tymi sferami? Czy może jest to próżnia materialna (niemożliwa według Arystotelesa i innych)? Dlaczego planety znajdują się w takiej, a nie innej odległości od Słońca? 3) W teorii Kopernika istnieje zależność pomiędzy okresem obiegu planety dookoła Słońca a odległością danej planety od Słońca. Stwierdza się tam, że okresy obiegu rosną wraz z odległością od Słońca. Jaka jest ścisła matematyczna/geometryczna zależność pomiędzy nimi? Jaka jest tego fizyczna przyczyna? 4) Sfera gwiazd stałych jest bardzo daleko, w odległości dużo większej od Słońca niż odległość planet od Słońca. Gwiazdy są tak daleko, że obserwacje gwiazd wykonywane w różnych porach roku (przy różnych położeniach Ziemi na orbicie okołosłonecznej) nie wy-*

kazywały żadnych różnic w kątach ich obserwacji. Skoro gwiazdy są aż tak daleko, to może jest coś dalej? Czy kosmos jest skończony?

To są pytania natury fizycznej dotyczące niebios, które przyniósł ze sobą Kopernikanizm. Zauważmy, że astronomia i fizyka były w ówczesnych czasach odrębnymi dziedzinami. Astronomia zajmowała się jedynie (i aż) matematycznym wyznaczaniem położenia ciał niebieskich, fizyka natomiast miała wyjaśniać zjawiska ziemskie. Kopernikanizm zmusił do postawienia zasadniczych pytań dotyczących fizyki ruchu ciał niebieskich, w tym Ziemi. Ziemia przestawała być wyróżnionym centrum Świata, a stawała się jedną z planet, mającą podlegać takim samym prawom fizyki jak inne planety.

Podkreślamy, iż w oficjalnej nauce i doktrynie światopoglądowej uznawano filozofię Arystotelesa oraz system Ptolemeusza z Ziemią w centrum Świata. Niezmienne prawa niebios miały być doktrynalnie owiane boską tajemnicą, miały odróżniać się od praw ziemskich, Ziemia zaś miała spoczywać. Kopernikanizm obalał te doktryny. Wygłaszanie poglądów Kopernika mogło być w niektórych częściach Europy bardzo niebezpieczne.

***Galileusz. Grawitacja, mechanika, astronomia, sprawa**

Einstein powiedział, że ojcem nowożytnej nauki jest Galileusz. Galileo Galilei (ur. 1564 r., zm. 1642 r.) był włoskim matematykiem, fizykiem, filozofem i astronomem. Galileusz to człowiek o wszechstronnych uzdolnieniach: utalentowany plastycznie, muzycznie, a także wielki erudyta. Newton w *Principiach* przypisuje Galileuszowi swoje dwa pierwsze Prawa Ruchu, pisząc: „(...) Za pomocą dwóch pierwszych praw [ruchu] (...) Galileusz odkrył, że wysokość spadku ciężkich ciał jest proporcjonalna do kwadratu czasu (...)”. Fundamentalne prawa mechaniki postulowane przez Galileusza: Zasada Bezwładności i Względności, oraz odkryte lokalne własności grawitacji, stanowią wprost podstawy Ogólnej Teorii Względności. Galileusz uważa, że matematyka jest kluczowa w opisie zjawisk fizycznych, a w szczególności ruchu. Do geometrii przestrzeni włącza czas. Ciałom przypisuje ciężar. Rozważa zjawiska wyidealizowane. Zwalcza poglądy Arystotelesa. Galileusz był wielkim obrońcą Kopernikanizmu. Razem z Keplerelem przyczynili się do rozwoju wielkich idei wynikających z nauki Kopernika. W imię nauki Galileusz stoczył heroiczną, ale ostatecznie zwycięską batalię z Inkwizycją. Był uczonym, który zapłacił osobistą tragedią za głoszenie prawdy naukowej.

Wyodrębnienie oddziaływania grawitacyjnego Od Galileusza pochodzi metoda naukowa stosowana we współczesnej fizyce. Aby znaleźć podstawowe prawa fizyki, należy spośród zjawisk fizycznych wyodrębnić lub wyizolować takie zjawiska, które są możliwie najprostsze. Zazwyczaj jednak nie udaje się w rzeczywistym doświadczeniu odtworzyć takich warunków, aby wyodrębnić zjawisko podstawowe. Wyobraźmy sobie na przykład, że chcemy poznać własności ruchu ciała w najprostszej sytuacji - gdy na ciało nie jest wywierane żadne działanie. Z oczywistych względów takiego eksperymentu idealnego nie można przeprowadzić w warunkach ziemskich. Można jednak przeprowadzać eksperymenty w warunkach możliwie zbliżonych do sytuacji idealnej i na ich podstawie dedukować wnioski. Podkreślamy, że wydedukowane wnioski będą już dotyczyły zjawiska podstawowego, czyli zjawiska dziejącego się

w warunkach idealnych. Wyidealizowane (wyodrębnione, wyizolowane) zjawisko podstawowe uznajemy za podstawowe prawo fizyki. Z praw podstawowych konstruuje się model matematyczny teorii fizycznej. Taki model stanowi idealizację zjawisk fizycznych danej kategorii, np. zjawisk mechanicznych lub zjawisk optycznych.

Galileusz zdawał sobie sprawę, że na ruch ciał w warunkach ziemskich ma wpływ tarcie, opory powietrza, siła wyporu aerostaticznego oraz coś, co ściąga ciała w dół. Uczony zastanawiał się nad tym, jak wyglądałyby ruch ciał w sytuacjach idealnych. Według Galileusza ruchy ciał ujawniłyby swoje prawdziwe własności, gdyby odbywały się w próżni i nie były zakłócone innymi czynnikami. Uczony wyobrażał sobie ruchy opadających na Ziemię ciał w próżni materialnej, jedynie pod wpływem przyczyny ściągającej ciała w dół, czyli jakby nie było powietrza. Uczony rozważał także takie ruchy, w których kontakt jednych ciał z innymi pozbawiony byłby tarcia. *Galileusz przypisuje wszystkim ciałom ciężar, czyli siłę, z jaką ciała przyciągane są przez Ziemię. Powiemy, że ciała ciężką, grawitują ku Ziemi.* Wyodrębniona zostaje grawitacja, jako jedno z oddziaływań na ciało. Dalej pozostaje uczonemu zbadać unikalne własności tej grawitacji, poprzez badanie własności ruchów odbywających się tylko pod jej wpływem, czyli w sytuacjach idealnych (platońskich). *Takie ruchy uczony będzie uważał za ruchy naturalne.*

Prawo spadków swobodnych Galileusza Aby zbadać własności ruchów pod wpływem grawitacji należy w doświadczeniu ograniczyć wpływ tarć, oporów powietrza i wyporu aerostaticznego tak bardzo, jak tylko to możliwe. W tym celu Galileusz przeprowadza szereg pomysłowych eksperymentów ze staczaniem się małych kulek z równi pochyłych oraz eksperymentów z wahadłami. Wprawdzie oprócz grawitacji dochodzą tam siły reakcji (równi, nici), jednak ich wpływ na ruch jest przewidywalny i uwzględniony w doświadczeniach. W doświadczeniach Galileusza można było uznać, iż wpływ tarć, oporów powietrza i wyporu aerostaticznego na ruch ciał był zaniedbywalnie mały. *Doświadczenia z równiami wykazały, że czasy staczania się z równi pochyłej kul o różnych masach i z takiej samej wysokości, są identyczne. Doświadczenia z wahadłami wykazywały, że okresy wahań ciał, zawieszonych na niciach o tej samej długości i wychylonych z położenia równowagi o ustaloną amplitudę, są zawsze takie same i nie zależą od mas ciał.* Na podstawie tych przesłanek Galileusz stwierdza, że przy pominięciu wpływów oporów powietrza i wyporu aerostaticznego, czas trwania spadku swobodnego różnych ciał z danej wysokości jest taki sam i nie zależy od ich masy. Ponadto krąży popularyzowana przez uczniów Galileusza historia, że Galileusz przeprowadził demonstracyjny eksperyment, polegający na zrzucaniu ciał o różnych masach z Krzywej Wieży w Pizie. Ten eksperyment miał bezpośrednio i ostatecznie dowodzić *niezależności czasu trwania spadku swobodnego od masy spadającego ciała.* Wszystkie opuszczone z wieży ciała o różnych masach miały upadać na Ziemię po tym samym czasie.

To wszystko oznacza, że *ruch ciała tylko i wyłącznie pod wpływem działania grawitacji nie zależy od masy tego ciała, a jedynie od prędkości nadanej ciału na początku ruchu i położenia początkowego.* Te zasadę nazywamy w naszym wykładzie Zasadą Równoważności ruchu różnych mas w polu grawitacyjnym. Z tą zasadą spotkaliśmy się już podczas tego wykładu. Widzimy, że Galileusz rewiduje filozofię Arystotelesa i nawiązuje do filozofii Platona,

ponieważ odkrycia Galileusza wymagają choćby założeń, jak próżnia materialna w przestrzeni, a także odnoszą się do sytuacji *idealnych*, których nie sposób zrealizować dokładnie w warunkach ziemskich.

Zasada Bezwładności Galileusza Doświadczenia mechaniczne, oprócz odkrycia prawa spadków swobodnych, doprowadziły Galileusza do odkrycia Zasady Bezwładności. Rozważając między innymi ruch kulki po idealnie gładkiej, płaskiej i poziomej powierzchni, w próżni materialnej, uczony stwierdza, że ruch taki będzie odbywał się po linii prostej, a jego szybkość nie będzie malała. W związku z tym ciało izolowane od wszelkich oddziaływań będzie poruszało się w przestrzeni ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Później Galileusz będzie słusznie twierdził, *co absolutnie nie jest sprzeczne z Zasadą Bezwładności*, że takie niekończące się w czasie ruchy ciał ze stałą szybkością wzdłuż prostej nieskończonej, nie mogą odbywać się w kosmosie. Podkreślamy, że to nie jest sprzeczne z Zasadą Bezwładności. Po pierwsze, powiedzieliśmy, że Zasada Bezwładności dotyczy sytuacji idealnej, gdy ciało jest izolowane od oddziaływań. Galileusz wcale nie stwierdzał, że ciało w kosmosie będzie izolowane od oddziaływań. Znane są jego eksperymenty myślowe z planetami spadającymi ruchem przyspieszonym prostoliniowym na Słońce. Po drugie, wydaje się, że Galileusz podkreślał lokalny charakter swoich praw mechaniki i grawitacji, co odzwierciedla tytuł jego dzieła: *Rozmowy i dowodzenia matematyczne w zakresie dwóch nowych umiejętności dotyczących mechaniki i ruchów miejscowych*. Być może uczony, wiedziony jakąś głęboką intuicją, pozostawia pole dla newtonowskiej idei powszechnego ciężenia lub wręcz einsteinowskiej idei zakrzywionej czasoprzestrzeni, gdzie ruch „naturalny” (jedynie pod wpływem grawitacji) w przestrzeni można lokalnie uznać za jednostajny i prostoliniowy względem pewnych „naturalnych” układów odniesienia.

Zasada Względności Galileusza Galileusz był wielkim zwolennikiem też Kopernika. Jedną z rewolucyjnych tez kopernikańskich był ruch Ziemi dookoła Słońca. Przeciwnicy koncepcji ruchu Ziemi podawali kontrargument na to stwierdzenie. Twierdzili oni, że ruch Ziemi jest niemożliwy, ponieważ gdyby Ziemia się poruszała, to można byłoby obserwować spektakularne przejawy tego faktu. Między innymi ciała nie mogłyby spadać w linii pionowej, tylko po krzywej odchylonej w stronę przeciwną do ruchu Ziemi. Wszystkie ciała oraz powietrze miałyby wykazywać rzekomą tendencję do ruchu w stronę przeciwną niż kierunek ruchu Ziemi. Rozmyślenia związane z tymi kwestiami doprowadziły Galileusza do odkrycia Zasady Względności dla zjawisk mechanicznych.

Przypomnijmy z wykładów mechaniki, iż zgodnie z tą zasadą, zjawiska mechaniczne dziejące się w inercjalnych układach odniesienia przebiegają według takich samych praw. Przypominamy, że inercjalny układ odniesienia to taki, w którym spełniona jest Zasada Bezwładności. Jeżeli przyjąć Ziemię za inercjalny układ odniesienia, to Zasada Względności oznacza, że za pomocą doświadczeń wykonywanych w układzie odniesienia poruszającym się ruchem jednostajnym wzdłuż linii prostej względem Ziemi, nie wykryje się ruchu tego układu odniesienia. Galileusz demonstruje rzut pionowy w górę wykonany na statku poruszającym się ruchem jednostajnym. Ciało upadło w tym miejscu statku, z którego zostało wyrzucone

pionowo do góry, mimo że statek w tym czasie przemieścił się względem Ziemi. W wykładach podstaw mechaniki przytoczyliśmy galileuszowy opis zjawisk mechanicznych dziejących się w kabinie statku poruszającego się ruchem jednostajnym. Pamiętamy także przykład autora, dotyczący zjawisk dziejących się w windzie jadącej pionowo do góry ruchem jednostajnym. Stwierdzaliśmy, że obserwowane tam zjawiska mechaniczne nie wskazują na ruch układu odniesienia. Ponieważ właśnie ruch jednostajny prostoliniowy układu odniesienia nie wpływa w żaden sposób na przebieg zjawisk w takim układzie odniesienia. Gdyby wpływał, to by się go wykryło.

Według Kopernika Ziemia miała poruszać się dookoła Słońca ruchem jednostajnym po okręgu z okresem 365 dni. Ów okrąg jest tak olbrzymi, że ruch postępowy Ziemi, nawet w dziennej skali czasowej, można z powodzeniem uznać za lokalny ruch ze stałą szybkością po odcinku prostym, przybliżającym łuk stanowiący tylko 365. część okręgu. Dlatego, zgodnie z Zasadą Względności, nie można wykryć ruchu postępowego Ziemi odnosząc się do ziemskich zjawisk trwających nawet cały dzień, nie mówiąc już zjawiskach trwających jeszcze krócej. Dlatego na przykład ciała spadają pionowo w dół i nie są odchylane w kierunku przeciwnym do ruchu Ziemi.

Zasada Względności miała być jednym z argumentów w obronie heliocentrycznego systemu kopernikańskiego. Ta Zasada stała się dla współczesnej fizyki czymś więcej - wskazała sposób uprawiania fizyki teoretycznej. We współczesnych teoriach poszukuje się symetrii zjawisk fizycznych po to, aby w przebiegu zjawisk wyodrębnić obiektywne, bezwzględne relacje pomiędzy wielkościami fizycznymi, relacje niezależne od obserwatora.

Modele matematyczne zjawisk mechanicznych Do opisu ruchu Galileusz wprowadza zależność położenia ciała w przestrzeni od czasu. Jest więc prekursorem geometrii czasu i przestrzeni - geometrii czasoprzestrzeni. W doświadczeniach uczony wyznaczał zależności wielkości przestrzennych opisujących ruch ciała, jak np. wysokość, z jakiej spada ciało, od czasu trwania ruchu. Galileusz jako pierwszy, wcale nie bez początkowych trudności i potknięć, definiuje ruch przyspieszony jednostajnie wzdłuż linii prostej. Określa, że przyrost prędkości w takim ruchu jest wprost proporcjonalny do czasu, w którym ten przyrost nastąpił:

$$\Delta v \propto \Delta t.$$

Uczony oblicza drogę w takim ruchu i stwierdza między innymi, iż wysokość, z jakiej spada swobodnie bez prędkości początkowej (przy pominięciu oporów powietrza) jest wprost proporcjonalna do kwadratu czasu trwania spadku.

$$h \propto t^2.$$

Galileusz korzysta z geometrii Euklidesa. Między innymi w celu obliczenia drogi przebytej w ruchu przyspieszonym jednostajnie wzdłuż prostej, oblicza pola pod wykresem zależności szybkości od czasu. Są to pierwsze przejawy rachunku całkowego. Uczony zajmuje się także rzutami: poziomym i ukośnym. Dowodzi, czego dowiedzieliśmy się w rozdziale z kinematyki, że rzuty są złożeniami ruchu jednostajnego wzdłuż prostej w poziomie i ruchu

przyspieszonego/opóźnionego w pionie, odbywającego się pod wpływem grawitacji. Dowodzi, że tor rzutu poziomego jest parabolą.

Swoje wielkie odkrycia w dziedzinie mechaniki i ich zastosowania do analizy ruchów opisał Galileusz pod koniec swojego życia w dziele *Rozmowy i dowodzenia matematyczne w zakresie dwóch nowych umiejętności dotyczących mechaniki i ruchów miejscowych*. Dzieło to można uznać za pierwszy traktat nauki nowożytnej w dziedzinie mechaniki. Z tych osiągnięć Galileusza będzie korzystał Newton.

Argumenty kopernikańskie Galileusz zasłynął docześnie nie tyle z powodu swoich odkryć w dziedzinie mechaniki, ile głównie jako niezłomny obrońca Kopernikanizmu. Pod koniec pierwszej dekady XVII wieku w Europie popularność zyskiwał wynalazek oparty na zastosowaniu soczewek i pozwalający widzieć w powiększeniu odległe przedmioty. Galileusz na jego podstawie zbudował teleskop i jako pierwszy zastosował go do obserwacji astronomicznych. Zaznaczmy, iż do tej pory pomiary położenia ciał niebieskich na nieboskłonie dokonywane były za pomocą rozmaitych przyrządów mechanicznych określających położenia względne ciał, lecz same obserwacje czynione były gołym okiem! Największy w ówczesnym czasie zbiór obserwacji, które były pomnikiem całego życia wielkiego pasjonata astronomii Tychona Brahe, na podstawie których Kepler stworzył swój system, czynione były bez użycia jakichkolwiek przyrządów optycznych. Do tego wszystkiego Galileusz zbudował teleskop metodą prób i błędów, bez dokładnej znajomości praw optyki. Zasadę działania teleskopu Galileusza miał wyjaśnić później nie kto inny jak Kepler. Za pomocą teleskopu Galileusz odkrywa na niebie niesamowite rzeczy, niewidoczne z Ziemi gołym okiem. Zdając sobie sprawę z rangi odkryć, natychmiast wydaje małą książeczkę *Sidereus nuncius* (*Gwiazdny posłaniec*), w której opisuje swoje odkrycia.

Galileusz opisuje tam odkrycie księżyców Jowisza, znanych dzisiaj jako: Io, Europa, Kalisto, Ganimedes. Analizując ich ruch, stwierdza, że te obiekty orbitują dookoła Jowisza. Oznaczało to, że Jowisz jest centrum ruchu dla swoich księżyców, podobnie jak Ziemia jest centrum ruchu dla Księżyca. Potwierdzona więc została jedna z Kopernikańskich tez, że w kosmosie mogą istnieć różne centra ruchu. To obalało ptolemejski dogmat o tym, że jedynym centrum ruchu miała być Ziemia. System kopernikański właśnie dopuszczał różne centra ruchów: Słońca dla planet, planet dla ich księżyców. Galileusz opisuje zaobserwowaną teleskopem powierzchnię Księżyca, wykazując tym samym, że Księżyc zbudowany jest z podobnej materii co Ziemia. Obala to mit, że ciała niebieskie zbudowane są z jakiejś doskonałej, idealnie gładkiej substancji. Innym ważnym odkryciem opisanym w *Sidereus nuncius* był fakt istnienia tak dalekich gwiazd, że człowiek nie dostrzega ich gołym okiem. Istniały więc zjawiska niedostępne ludzkim zmysłom, co było sprzeczne z przyjętym arystotelizmem. Odkrycie niewidocznych gołym okiem gwiazd zmuszało ponadto do rewizji poglądów na temat rozmiarów Świata. Świat miał być niewyobrażalnie wielki. W związku z tym nasuwało się nawet pytanie, czy Świat jest skończony? Czy istnieją układy planet okrążające inne gwiazdy? Ta możliwość istnienia nieskończonego Świata oraz układów planetarnych poza Słonecznym niepokoiła nawet samego wielkiego Keplera. Odkrycia Galileusza niosły ze sobą idee jeszcze bardziej radykalne niż Kopernikanizm. Między innymi głoszenie hipotez o wielu

Światach, stało się kilka lat przed *Sidereus nuncius* jedną z przyczyn spalenia Giordana Bruna na inkwizycyjnym stosie.

Ranga odkryć opisanych w *Sidereus nuncius* sprawiła, że stały się one największą sensacją XVII wieku. Dzięki zabiegom Galileusza książeczka podbija całą Europę, trafia na dwory królewskie, w tym do Polski, a także do wielu miast europejskich. Fragmenty *Sidereus nuncius* są odczytywane na gorąco tuż po przybyciu do miast i to w atmosferze niezwyklej sensacji. Od tego momentu rozpoczyna się prawdziwa batalia Galileusza o Kopernikanizm. Galileuszowski *Sidereus nuncius* zbiega się praktycznie w czasie z wydaną nieco wcześniej przez Keplera *Astronomia nova*. W dziele tym Kepler opisuje swoje pierwsze wielkie rewolucyjne odkrycia na temat ruchu planet (o czym w następnej sekcji), całkowicie w duchu kopernikańskim, ale jakże nowe. Kilka miesięcy później Galileusz prowadzi obserwacje ruchu planety Wenus oraz jej faz. Występowanie faz Wenus dowodzi niezbicie jej ruchu dookoła Słońca i uprawdopodobnia fakt, że podobnie czynią inne planety. Ruch innych planet dookoła Słońca potwierdzały obserwacje Tychoona. W kolejnych latach Galileusz przedstawia następne argumenty przemawiające za Kopernikanizmem. Wskazuje choćby na fakt, że gwiazdy świecą z różną jasnością. To może dowodzić, że gwiazdy leżą w różnej odległości od Ziemi, a nie zaś na ostatniej sferze niebieskiej Ptolemeusza. Na gruncie Kopernikanizmu Galileusz w prosty sposób wyjaśnia obserwowane przez astronomów ruchy plam na Słońcu. Galileusz twierdzi także, że kosmos nie jest niezmienny, tylko posiada swoją dynamikę. Oznacza to po prostu, że w kosmosie zachodzą różne zjawiska fizyczne.

Koncepcja Galileusza planet ciężących ku Słońcu Na uwagę i podkreślenie zasługuje fakt, że Galileusz uważał Słońce za przyczynę ruchu planet. Uczony opisuje na przykład eksperymenty myślowe, w których początkowo nieruchome planety spadają ruchem przyspieszonym na Słońce, niczym ciała opuszczone na Ziemię, a następnie kierunek ich ruchu jest w jakiś sposób zamieniany, po czym planety dalej orbitują dookoła Słońca. Dostrzegamy w tym wyraźnie pierwsze przejawy Prawa Powszechnego Ciężenia. W eksperymencie myślowym Galileusza planety najwyraźniej ciążyły ku Słońcu.

Sprawa Galileusza Odkrycia Galileusza wydawały się ostatecznie podważyć wizję świata Ptolemeusza na rzecz Kopernikanizmu. Pod koniec pierwszej dekady XVII wieku Galileusz uważał Kopernikanizm za udowodniony. Przez kilkanaście lat uczony pracuje nad dziełem *Dialog o dwu najważniejszych układach świata: ptolemeuszowym i kopernikowym*, w którym przedstawia owoce swojej pracy. Zgodnie z zaleceniami władz kościelnych, uznających system Ptolemeusza, Galileusz jako autor i pod groźbą herezji musi przedstawić Kopernikanizm jedynie jako matematyczną hipotezę, ułatwiającą rachunki astronomom. Galileusz nie ma prawa rozstrzygnąć ostatecznie, który z systemów jest słuszny, natomiast ma formalne prawo do podawania argumentów matematycznych za teorią Kopernika. Aby jednak czytelnik dzieła nie został zwiedziony „argumentami pitagorejskimi” na rzecz Kopernikanizmu, autor ma obowiązek zamieścić na końcu dzieła receptę na to. Tą receptą dla czytelnika ma być wymyślony przez ówczesnego papieża Urbana VIII, wcześniejszego sympatyka Galileusza, pewien teologiczny argument, zgodnie z którym żadna z teorii nie jest absolutnie

prawdziwa. Ponadto początek książki musi zawierać odpowiednio napisany wstęp, relatywizujący Kopernikanizm (to już znamy). Taki wstęp, przejawskrawiony do skrajnej postaci, z którego wręcz można uczyć się sztuki sarkazmu, zamieszcza pokornie Galileusz. Dzieło, po ukończeniu i przed wydaniem jest przez rok studiowane przez cenzorów Inkwizycji. Cenzorzy Inkwizycji ostatecznie dopuszczają dzieło do druku, uznając, że autor wypełnił wszystkie ich zalecenia. Podkreślamy, że Galileusz cały czas współpracował z władzami kościelnymi. Traktat zostaje wydany i natychmiast wynika z tego skandal. Okazuje się między innymi i w szczególności, że papieski argument, o którym mowa wyżej, wypadł blado, autor zaś włożył go w usta niejakiego Simplicio. Simplicio był jednym z trzech bohaterów dzieła, utrzymanego w konwencji dialogu trzech osób. Był postacią odporną na wszelkie logiczne argumenty i broniącą poglądów Arystotelesa, postacią w istocie wykpioną piórem Galileusza i przedstawioną jako niezbyt rozgarnięta. Jednak tego faktu cenzorzy nie wyłapali. Galileusz zostaje pociągnięty do odpowiedzialności, pomimo wcześniejszych ustaleń. Papież wydaje się być osobiście urażony i nieustępliwy aż do samej śmierci uczonego. Inkwizycja łamie wszelkie obopólne ustalenia i zaczyna się przysłowiowe „szukanie dziury w całym”. Rozpoczyna się kuriozalny proces, podczas którego uczonego straszony jest nawet torturami. Galileusz jest postacią znaną, dlatego proces wzbudza oburzenie na północy Italii oraz w Europie. Autor ostatecznie zostaje skazany jako podejrzany o herezję, nie zaś za herezję. Gdyby ową herezję udowodniono Galileuszowi, to podzieliłby los Giordana Bruna. Linia obrony Galileusza ukazuje wielkość jego intelektu. Uczony pozostaje w areszcie domowym do końca życia i nie ma prawa zajmować się więcej astronomią. Jego książki oraz dzieło Kopernika na wiele, wiele lat trafiają do indeksu ksiąg zakazanych.

*Kepler i nowe oblicze astronomii

Johannes Kepler Niewiele młodszy od Galileusza był niemiecki astronom i matematyk Johannes Kepler (ur. 1571 r., zm. 1630 r.). Odkrycia tego uczonego miały wielki wpływ na rozwój nauki, a tym samym na rozwój cywilizacji zachodniej. Fascynacja pitagorejską *harmonią* i astronomią Kopernika wyznaczyły kierunek misji naukowej Keplera, jego *idée fixe*, którą konsekwentnie i z niesamowitą energią realizował całe życie. Pasją, powołaniem i misją Keplera było odnalezienie geometrycznego planu Świata oraz poznanie boskich zamysłów w jego przejawach. Kepler poszukiwał w kosmosie doskonałego ładu i porządku nadanego przez Stwórcę. Inspiracją dla Keplera był system kopernikański, bryły platońskie oraz pitagorejska *harmonia*. Na ich fundamencie Kepler tworzył własną kosmologię. W pracy Keplera mistycyzm przeplata się z niezwykle rzetelnym podejściem naukowym. Kepler był głęboko przekonany o matematyczności praw przyrody. *Matematyczność przyrody miała być przejawem harmonii Świata, do której Kepler pragnął ze wszystkich sił zajrzeć*. Wielkim wkładem Keplera w rozwój nowożytnej nauki są trzy kinematyczne prawa ruchu planet. Na ich bazie Newton rozwinął teorię grawitacji.

Odkrycie zasad dotyczących ruchu planet było pokłosiem wieloletniej i mozolnej pracy Keplera nad obserwacjami. Ówczesna astronomia, poza Kopernikanizmem, ograniczała się do wyznaczania położenia ciał niebieskich na niebie i nie zajmowała się znajdowaniem zwią-

ków pomiędzy: wielkościami opisującymi kształty orbit planet, wielkościami opisującymi ruch kątowy bądź postępowy planet, okresami w ruchu planet. *To właśnie Kepler, po Koperniku, rozwija nowoczesną astronomię, w której po pierwsze definiuje się wielkości związane z ruchem ciał na niebie i po drugie – poszukuje się relacji pomiędzy tymi wielkościami. Kepler poszukuje związków liczbowych i zależności geometrycznych pomiędzy różnymi wielkościami fizycznymi związanymi z ruchem planet. Ta pionierska praca doprowadzi Keplera do odkrycia praw kinematyki ruchu planet.* Należy tutaj wyraźnie podkreślić, że wykonanie takiego zadania na podstawie obserwacji położenia planet na niebie wiązało się z herkulesową pracą. Ilość danych obserwacyjnych, które należało przeanalizować, ilość rachunków, które należało wykonać (bez maszyn liczących), a także dbałość o dokładność obserwacji (przeprowadzanych bez teleskopu) było zadaniem przekraczającym możliwości zwykłego śmiertelnika. W dzisiejszych czasach niejako wstydliwie pomija się mistycyzm Keplera. Dla nas prawa Keplera wydają się zwieńczeniem jego pracy naukowej, natomiast dla Keplera były środkiem realizacji wyższych celów, którymi było odnalezienie harmonii Świata oraz poznanie boskiego zamysłu. Głębokie przekonanie Keplera o matematyczności praw przyrody, a także mistyczne uniesienie, stanowiły źródło niewyczerpalnej energii, niezbędnej do jego niezłomnej i tytanicznej pracy. Z drugiej strony, gdy Kepler nie oddawał się spekulacjom, tylko zajmował się poszukiwaniem w danych doświadczalnych związków liczbowych i geometrycznych, stawał się rasowym uczonym, używającym w swojej filozofii metod matematycznych i eksperymentalnych. Wtedy miejsca dla spekulacji już nie było. Kepler miał szacunek do faktów doświadczalnych. Nauka Keplera to zarówno metafizyczne spekulacje, jak i *matematyczna oraz doświadczalna metoda*. To wszystko sprawia, że ów mistycyzm zostaje osadzony na liczbach i wielkościach, które są rzeczywiste, prawdziwe i opisują realny ruch planet. Newton będzie uczonym, który będzie już oddzielał filozofowanie oparte na matematyce i doświadczeniu od rozważań mistycznych. Należy podkreślić fakt, że nawet spekulacja musiała mieć u Keplera podstawy matematyczne.

Największym obserwatorium astronomicznym w tamtym czasie było obserwatorium Tychona Brahe. Obserwatorium Tychona było przedsięwzięciem tego uczonego arystokraty oraz pasjonata astronomii, wspieranym początkowo przez duńskich władców. Obserwatorium dysponowało najbardziej dokładnymi obserwacjami w historii oraz posiadało największą ich liczbę. Tychon tworzył swój własny system astronomiczny, zwany później systemem Tychona, którego główne założenia wywodziły się z układu ptolemeuszowego. W swoim wielkim obserwatorium zatrudniał asystentów do obserwacji i do rachunków. Kepler zaś miał swoją własną wizję astronomii, dla rozwoju której łąknął obserwacji Tychona. Z korzyścią dla nauki i pomimo tego, że Tychon „wyznawał” ptolemeizm, Kepler zaś Kopernikanizm, drogi obu wizjonerów splotły się na zawsze: Kepler trafił do obserwatorium Tychona jako asystent, gdzie pracował do śmierci swojego mistrza. Po śmierci Tychona, już jako cesarski matematyk i astronom, objął pieczę nad pozostawionymi przez Tychona obserwacjami. Prawdziwa przygoda z astronomią rozpoczęła się dla Keplera u Tychona, w związku z obserwacjami Marsa. Obserwacje Marsa trwały przez kilka lat i stworzyły podwaliny nowożytnej nauki.

Prawa Keplera

Prawa Keplera omówimy tutaj w kontekście ich odkrywania, przy czym powrócimy do nich niezależnie w technicznej części wykładu. Na podstawie wieloletnich analiz obserwacji Marsa Kepler odkrywa kinematyczne zasady ruchu planet, które dzisiaj znamy jako I i II Prawo Keplera. III Prawo Keplera zostanie odkryte w późniejszym okresie życia uczonego.

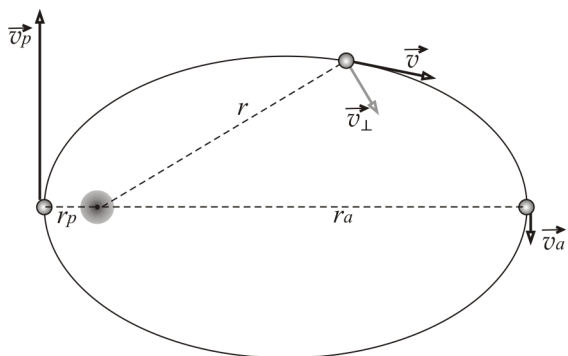
1) Założenia fizyczne. Pojęcie orbity. Kepler opisuje ruch planet w układzie odniesienia nieruchomego Słońca. Zakłada, że Słońce w jakiś sposób jest źródłem ruchu planet. Wszystkie planety są traktowane równoważnie. Ziemia nie jest w żaden sposób wyróżniona pośród nich i podlega tym samym prawom co inne planety. Planety okrążają Słońce. Każda z planet porusza się po orbicie dookoła Słońca. Każda planeta ma swoją ustaloną orbitę. Tor ruchu danej planety (jej orbita) leży w pewnej płaszczyźnie. Płaszczyzna orbity dowolnej planety zawiera Słońce. *Kepler wprowadza do astronomii pojęcie orbity planety. Od tego momentu w astronomii przestaje obowiązywać pojęcie sfery niebieskiej.* Słońce znajduje się w punkcie przecięcia płaszczyzn orbit wszystkich planet.

Już na początku swoich analiz Kepler zauważa, że niejednostajny ruch Marsa po orbicie nie może być wyjaśniony, nawet w teorii Kopernika, jednostajnymi ruchami po okręgach względem tak zwanego punktu wyrównawczego, leżącego w pobliżu Słońca. Kepler wysuwa śmiała tezę, że orbity są owalami, zaś szybkość planety wzdłuż orbity nie jest stała. Na początku jeszcze nie wie, że te owale są dokładnie elipsami, nie każdy bowiem owal jest elipsą. Mamy więc rewolucyjne, nawet jak na Kopernikanizm, tezy: **1) planety poruszają się po orbitach, a nie po sferach niebieskich; 2) planety poruszają się wzdłuż orbity ze zmienną szybkością; 3) orbity są owalami, a nie krzywymi zakreślonymi w wyniku złożonego ruchu po okręgach.** Podkreślamy, Kepler właśnie odrzuca ideę ruchu jednostajnego po okręgu, uważanego od wieków za ruch doskonały.

2) Prawo odległości. Niejednostajny ruch planet wzdłuż orbity był zgodny z Keplerowską koncepcją, że Słońce jest źródłem ruchu planet, cokolwiek miałyby to oznaczać. Obserwacje wykazywały, że planeta *na swojej orbicie* porusza się szybciej w tych miejscach orbity, gdzie jest bliżej Słońca, wolniej natomiast porusza się w tych miejscach orbity, gdzie jest dalej od Słońca. W związku z tym Kepler postuluje tak zwane prawo odległości: *czas (Δt) przebycia ustalonego małego odcinka (Δl) orbity jest proporcjonalny do odległości planety od Słońca na jej orbicie.* Równoważnie można wyrazić to prawo tak, iż szybkość chwilowa planety na orbicie (czyli $\Delta l/\Delta t$) ma być odwrotnie proporcjonalna do jej odległości od Słońca na jej orbicie. Kepler zdawał sobie sprawę z tego, iż to prawo jest słuszne jedynie w przybliżeniu. W istocie, w sensie ścisłym nie chodzi o szybkość (v) planety zmierzoną w kierunku stycznym do jej orbity, ale o szybkość planety zmierzoną w kierunku zakreślanego przez promień wodzący kąta, czyli o szybkość (v_{\perp}) zmierzoną w kierunku prostopadłym do promienia łączącego planetę ze środkiem Słońca (zobacz rys. poniżej). Prawo odległości postulowane przez Keplera zapiszemy w sposób ścisły tak:

$$v_{\perp} \propto \frac{1}{r}, \quad \text{równoważnie} \quad v_{\perp} \cdot r = l,$$

gdzie l jest pewną wartością, która musi być zachowana w ruchu danej planety po orbicie.

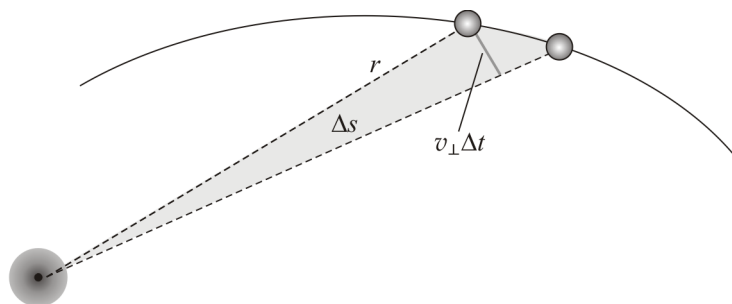


Równość
 $r_p v_p = r_a v_a = r v_{\perp} = l$
 wyraża prawo odległości
 Keplera.

3) Prawo pól. Korzyścią wynikającą z prawa odległości jest możliwość powiązania czasu przebycia krótkiego odcinka orbity z polem zakreślonym przez jej promień wodzący w tym krótkim czasie:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta S = \frac{1}{2} \cdot r \cdot (v_{\perp} \cdot \Delta t) = \frac{1}{2} \cdot (r \cdot v_{\perp}) \cdot \Delta t = \frac{1}{2} \cdot l \cdot \Delta t, \quad (8.1)$$

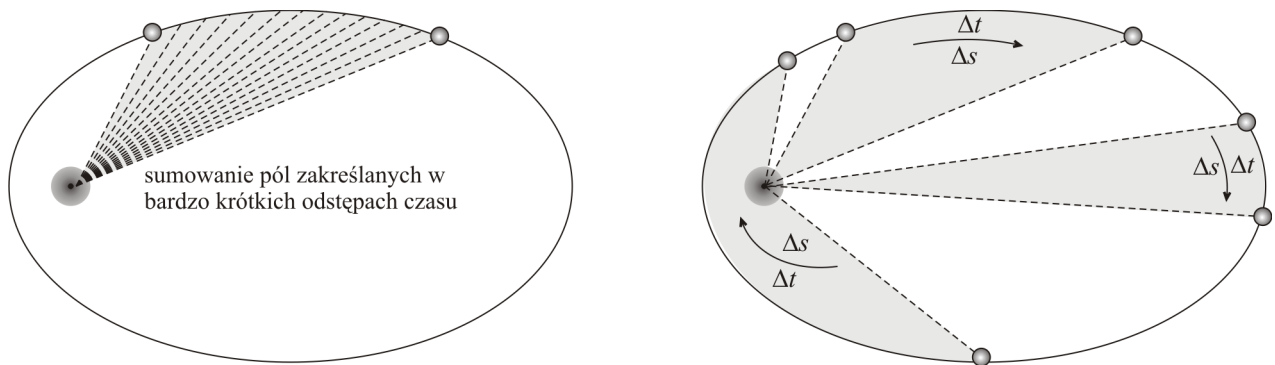
przy czym zapis $\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Delta S$ oznacza wartość przyrostu pola (ΔS) w nieskończenie krótkim czasie (Δt). Zgodnie z prawem odległości, co ma dalej znaczenie, wielkość l jest stała.



Następnie, na podstawie zależności 8.1 można łatwo obliczyć sumę wielu nieskończenie małych przyrostów pól w nieskończenie krótkich czasach. Tak właśnie postąpił Kepler. W ten sposób obliczamy pole powierzchni zakreślonej w skończonym czasie Δt przez promień wodzący planety. Obliczenia prowadzą do wzorów dla skończonych wielkości (to znaczy Δt może być teraz dowolnie duże):

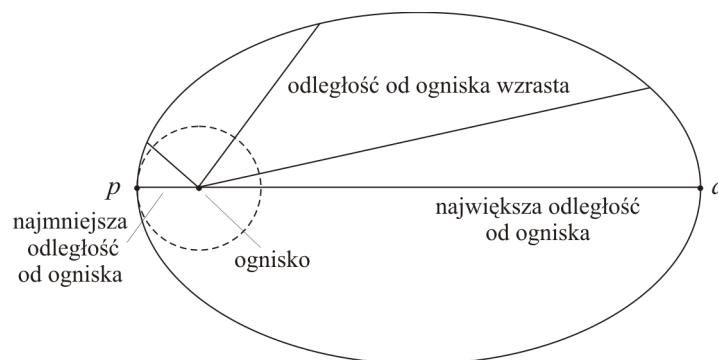
$$\Delta S = \frac{l}{2} \cdot \Delta t, \quad \text{równoważnie:} \quad S = \frac{l}{2} \cdot t \quad (\text{gd}y \ t_0 = 0 \ \text{i} \ S_0 = 0).$$

Wielkość $l/2$ jest stała i możemy ją uznać za szybkość polową - szybkość, z jaką przybywa pola powierzchni zakreślonej promieniem wodzącym (nie należy pomylić tego z szybkością zakreślania kąta). Otrzymany rezultat oznacza, że: *pola powierzchni zakreślane w jednakowych odstępach czasu przez promień łączący planetę ze środkiem Słońca, są sobie równe.* Równoważne sformułowanie podaje Newton w *Principiach*: *planety promieniami wodzącymi zaczepionymi w środku Słońca zakreślają pola proporcjonalne do czasów.*



Otrzymana właśnie zasada, nazywana prawem pól, jest treścią II Prawa Keplera. Na jej podstawie Newton wydedukuje później centralny charakter siły grawitacji. Proszę zauważyć, iż Kepler najpierw odkrył prawo odległości, co dzisiaj kojarzymy z zasadą zachowania momentu pędu punktu materialnego. Następnie na podstawie prawa odległości wyprowadził swoje prawo pól, tak jak dzisiaj dowodzi się tego prawa z zasady zachowania momentu pędu. Nadmienmy jeszcze, iż sumując nieskończenie małe przyrosty czasów, Kepler w istocie dokonywał operacji matematycznej, którą dzisiaj nazywamy całkowaniem. W czasach Keplera rachunek różniczkowy nie istniał. Kepler korzystał z matematyki Euklidesa.

4) Elipsa. Odkryte przez Keplera prawo pól uświadomiło uczonemu, iż orbita Marsa nie może być okręgiem, lecz owalem. Ował jednak to bardzo ogólne pojęcie, okrąg można spłaszczać na różne sposoby, dlatego odgadnięcie geometrycznego kształtu owalu pasującego do obserwacji orbity Marsa nie było łatwe. Dopiero po około trzech latach po sformułowaniu prawa pól Kepler odkrywa, że orbita Marsa musi być elipsą. Z obserwacji Keplera wynikało także, że Słońce musi leżeć w jednym z ognisk takiej elipsy. Te własności orbit planet nazywamy I Prawem Keplera. O matematycznych własnościach elipsy opowiemy w technicznej części wykładu. Tymczasem jedynie spójrzmy na rysunek i zauważmy, iż na elipsie można wyróżnić punkt p (perycentrum) położony najbliżej jednego z ognisk oraz punkt a (apocentrum) położony najdalej od danego ogniska. Choćby ta prosta, ale ważna własność wyróżnia elipsę spośród innych owali.



5) Dokładność. Osiem minut kątowych Kepler dokonywał swoich odkryć, analizując dane obserwacyjne Tychońa z niebywałą dokładnością. Obserwacje pochodzące od Tychońa obarczone były małym jak na owe czasy błędem około 2 minut kątowych (to jest kąt, pod jakim widać ok. 1/16 średnicy Księżyca). W związku z tym Kepler żądał od samego siebie, aby obliczenia wykonane na podstawie jego teorii były zgodne z obserwacjami Tychońa z taką właśnie dokładnością.

Ówczesna teoria opisująca ruch Marsa, tak zwana teoria punktu z ekwantem, dawała rozbieżności rzędu 8 minut kątowych dla kierunku linii Mars-Słońce. W ówczesnej astronomii taki stan był akceptowalny, ale nie dla Keplera.

„Skoro łaska Boża dała nam w osobie Tychońa Brahe obserwatora tak starannego, iż jego obserwacje ujawniają błąd osiem minut kątowych popełniony przez Ptolemeusza, to wypada nam z wdzięczności przyjąć ten dar od Boga i zrobić z niego użytek. To znaczy musimy podjąć wysiłek odkrycia wreszcie prawdziwej natury ruchów niebieskich.”

Mocna determinacja ścisłego trzymania się obserwacji doprowadziła Keplera do odkryć. Już same dwa omówione prawa Keplera były potężnym narzędziem rachunkowym, lepszym od innych używanych w owym czasie. Za pomocą prawa pól oraz eliptyczności orbit Kepler obliczał położenia planet z niebywałą dokładnością. Była to dokładność równa dokładności obserwacji Tychońa, dokładność, z jaką ani Ptolemeusz, ani Kopernik, ani Tychoń nie obliczali położenia planet. To była już nowa astronomia. Właśnie dzieło o nazwie *Astronomia nova* wychodzi w 1609 roku i zawiera dwa pierwsze Prawa Keplera.

6) III Prawo Keplera. Po wielu latach Kepler powraca do młodzieńczych fascynacji pitagorejską harmonią i do prac nad *Harmonią świata*. Wtedy odkrywa zależność, że *stosunki kwadratów okresów obiegu planet po ich orbitach do sześciątów długości wielkich półosi tych orbit są identyczne dla każdej z planet*. Tę zależność nazywamy III Prawem Keplera i zapisujemy tak:

$$\frac{T^2}{A^3} = \text{const}$$

(długość A wielkiej półosi elipsy jest równa długości połowy odcinka pa z rysunku powyżej).

Podsumowanie Jednym z najważniejszych dzieł Keplera, które wieńczyło jego wieloletnią pracę badawczą i w którym metodycznie zostały wyłożone wszystkie trzy prawa ruchu planet, był podręcznik astronomii *Epitome astronomiae Copernicanae*. Wkrótce po śmierci Keplera *Epitome astronomiae Copernicanae* stała się głównym i uznanym podręcznikiem astronomii. Podręcznik ten wykładał Keplerowski model Wszechświata oparty na trzech prawach ruchów planet dookoła Słońca. Jednak stosunkowo szybkie uznanie przez świat uczonych teorii Keplera zawdzięczamy dziełu o całkiem innym charakterze. Dziełu o charakterze praktycznego katalogu astronomicznego, które Kepler opracowywał z niemałym ociąganiem całe swoje życie, a które zobowiązał się wykonać dla cesarza Rudolfa II Habsburga. Na szczęście Keplerowi udało się tego dokonać. Pod koniec życia Kepler wydaje tak

zwane *Tablice Rudolfskie*. Jest to dzieło o charakterze praktycznym, zawierające obliczenia przyszłych położenia planet. Dokładność, z jaką Kepler oblicza położenia planet równa się dokładności, z jaką mogły być dokonywane obserwacje astronomiczne. Swoich obliczeń Kepler dokonuje na podstawie odkrytych przez siebie ogólnych praw ruchu planet. *Tablice Rudolfskie* były najdokładniejsze w całych dziejach ówczesnej astronomii - swoją dokładnością kilkadziesiąt razy przewyższały inne opracowania. Stały się więc standardowym opracowaniem powszechnie używanym w całym wieku XVII. Ich praktyczna strona, a także ogromna dokładność przyczyniły się do uznania przez uczonych systemu astronomicznego Keplera.

Prawa Keplera mówią o tym, w jaki sposób poruszają się planety, ale nie wyjaśniają przyczyny takiego, a nie innego ich ruchu. W spekulacjach Keplera dotyczących tej przyczyny pojawia się idea Słońca jako źródła ruchu planet. Mamy więc Słońce jako źródło ruchu planet. Kepler nawet twierdził, że siła wychodząca ze Słońca maleje wraz ze wzrostem odległości planety od Słońca. Należy docenić tę rewolucyjną ideę, jakkolwiek błędne były dalsze rozważania Keplera idące w tym kierunku. Dodamy jednak uwagę, że samo pojęcie siły nie miało jeszcze właściwego kształtu, zaś hipotezy Keplera o dynamice ruchu planet nie były zgodne z istniejącymi już odkryciami Galileusza w dziedzinie dynamiki ruchu ciał. Ponadto sam Galileusz był sceptycznie nastawiony do prac Keplera ze względu na pojawiający się w nich mistycyzm i fascynację pitagorejską harmonią. Pamiętajmy jednak, że historia nauki właśnie się tworzyła. Dwie powstające równoległe wielkie myśli naukowe Galileusza i Keplera jeszcze nie były ze sobą skonfrontowane. Fizyka ziemską i niebieską nie były jeszcze dopięte na ostatni guzik i nie były połączone w jedną fizykę. Historia wciąż oczekiwała na geniusza, który dokona tej syntezy.

Kepler był wielkim uczonym i wspaniałym człowiekiem. Wielkich odkryć dokonywał mimo tragicznej sytuacji religijno-politycznej w Europie, a także pomimo kłopotów rodzinnych i zdrowotnych. Za cenę wygnania i stanowisk nigdy nie wyrzekł się swoich poglądów. Zawsze głosił je otwarcie, ponieważ po prostu w nie wierzył. Był człowiekiem przez wszystkich lubianym i szanowanym za swoją wiedzę, niezłomność, uczciwość. Krystaliczna uczciwość przejawiała się u tego uczonego także w docenianiu i podnoszeniu dokonań innych uczonych. Pozostawione listy oraz zapisy, napisane zawsze barwnym i kwiecistym stylem, świadczą dodatkowo o wielkiej erudycji i poczuciu humoru tego uczonego. Uczony, który stworzył podwaliny współczesnej cywilizacji.

***Błędne założenia fizyki kartezjańskiej**

W latach 1596-1650r żył francuski uczyony René Descartes (Kartezjusz). Kartezjusz był matematykiem, filozofem, fizykiem, przy czym największych odkryć dokonał w dziedzinie matematyki. Kartezjusz jest ojcem matematyki współczesnej, w której istotną rolę odgrywają metody algebraiczne. Między innymi wprowadził do geometrii euklidesowej ideę układu współrzędnych. Dzięki temu każdy punkt płaszczyzny euklidesowej można oznaczyć unikalną parą liczb, nazywanych współrzędnymi tego punktu w danym układzie współrzędnych. Każdą krzywą na płaszczyźnie można będzie opisać równaniem określającym zależność pomiędzy współrzędnymi punktów tworzących daną krzywą. Dlatego różne własności

geometryczne na płaszczyźnie można wyrażać oraz badać za pomocą równań. Podejście algebraiczne uważane jest za bardziej wygodne od czysto syntetycznej i dosyć abstrakcyjnej matematyki Euklidesa. W takim duchu matematyki kartezjańskiej, w duchu algebraicznym, Leibniz rozwinął rachunek różniczkowy i całkowy. Równoległe z Leibnizem (a nawet wcześniej) Newton rozwinął na własny użytek rachunek różniczkowy i całkowy, z tą różnicą, że uczynił to w duchu geometrii Euklidesa.

Fizyka Kartezjusza Kartezjusz opracował zasady filozofii przyrody (powiemy dzisiaj fizyki), w których widać wpływ filozofii arystotelejskiej. Fizyka Kartezjusza bardzo mocno osadza się na pojęciu materii. Kartezjańska materia jest ciągła i wypełnia szczelnie całą przestrzeń. W zasadzie przestrzeń u Kartezjusza określona jest właśnie przez materię. W filozofii Kartezjusza nie istnieje pojęcie próżni materialnej, a w związku z tym nie istnieje w kartezjanizmie pojęcie przestrzeni (absolutnej) jako bytu odrębnego od materii. Cząstki i ciała to różne postacie owej materii. Przestrzeń pomiędzy ciałami niebieskimi wypełnia niewykrywalny eter. Wszelkie zjawiska fizyczne, jak ruch i oddziaływanie, można wyjaśnić odwołując się do różnych własności materii. Materia w całym Świecie znajduje się w nieustannym i naturalnym ruchu, mającym być jakimś skutkiem naturalnego ruchu kołowego. Kartezjusz dostrzega, że ciała w ruchu kołowym posiadają *tendencję odśrodkową*, czyli dążą do poruszania się wzdłuż stycznej do okręgu. Fizyka kartezjańska nie wyjaśnia prawidłowo tego, w jaki sposób (albo czym) ciało utrzymywane jest w ruchu po okręgu, aby nie poruszało się po linii prostej. Dopiero Newton wyjaśni, że ruch ciała po okręgu spowodowany jest siłą działającą na ciało i skierowaną zawsze do jednego punktu, będącego środkiem okręgu. Filozofia Kartezjusza dopuszcza możliwość, że Słońce jest jedną z gwiazd.

Trzy Prawa Keplera dotyczące ruchu planet dookoła Słońca były w czasach Kartezjusza uznanym faktem naukowym. Nikt nie kwestionował matematycznej strony astronomii Keplera, czego nie można powiedzieć o jej fizykalnych podstawach. Kartezjusz nie zgadzał się z poglądami Keplera, że Słońce jest źródłem sił działających na planety. *W filozofii Kartezjusza niemożliwe było bezpośrednio (czyli bez ciał pośredniczących) oddziaływanie na odległość jednego ciała na drugie.* Dwa odległe od siebie ciała mogły oddziaływać wzajemnie za pośrednictwem innych ciał lub cząstek i to w wyniku łańcucha wzajemnych zderzeń tych cząstek lub ciał. Wszelkie oddziaływanie na ciało miało być skutkiem ruchu otaczających go cząstek oraz ich wzajemnych zderzeń lub skutkiem ruchu eteru wypełniającego przestrzeń niebieską. Ten punkt kartezjanizmu stał się przyczyną sporów o newtonowską koncepcję powszechnej grawitacji, w myśl której ciała mogą przyciągać się na odległość. *Nurt kartezjański w fizyce cechuje skrajny mechanicyzm, a raczej materializm; kartezjanie będą np. zawsze starali się wyjaśnić oddziaływania pomiędzy odległymi ciałami za pomocą cząstek/ciał/substancji pośredniczących.*

W celu wyjaśnienia ruchów ciał niebieskich, a w szczególności ruchów planet dookoła Słońca, Kartezjusz stworzył tak zwaną teorię wirów. Arystotelesowskie sfery niebieskie unoszące planety zastąpił kartezjański wir. Gwiazdy miały stanowić lokalne centra takich wirów. Kartezjusz pisze:

„Sądzimy, że cała materia nieba, w której przebywają planety, nieustannie krąży

na kształt jakiegoś wiru, w którego centrum znajduje się Słońce; a części tego wiru, bliższe Słońca, poruszają się szybciej aniżeli te, które są od niego bardziej oddalone. Wszystkie zaś planety zawsze przebywają między częściami tej właśnie niebiańskiej materii. Już z tego samego bez żadnych machin, jak najłatwiej rozumie się ich wszystkie zjawiska. Bo tak się rzecz ma, jak w tych miejscach rzek, w których woda tworzy wir, sama kręcąc się wkoło: wówczas jeżeli leżą na niej rozmaite źdźbła trawy, zobaczymy, że ona z sobą je unosi, a niektóre z nich kręcą się również dookoła własnych punktów środkowych i tym szybciej zakreślają pełne koło, im bliżej są środka wiru. A wreszcie, jakkolwiek zawsze dążą do ruchów kolistych, mimo to prawie nigdy nie opisują kół całkowicie doskonałych, lecz zbacząją cokolwiek na długość i szerokość.”

Pozorna prostota filozofii Kartezjusza, jej arystotelejska tradycja, a także autorytet samego Kartezjusza, przyczyniły się do dogmatycznego uznania fizyki kartezjańskiej pośród uczonych. W 1687 roku Newton opublikował swoje wiekopomne dzieło *Philosophiae naturalis principia mathematica* (*Matematyczne zasady filozofii przyrody*), znane jako *Principia*, w którym przedstawiona jest idea powszechnej grawitacji. Newtonowska koncepcja powszechnego ciężenia, w myśl której odległe od siebie ciała przyciągają się w próżni i to bez pośrednictwa innej materii, jawiła się w świetle filozofii Kartezjusza jako natłok naukowych herezji (próżnia, oddziaływanie na odległość). Newtonowska grawitacja była krytykowana szczególnie na kontynencie przez takich tuzów nauki, jak: Leibniz, Huygens, Euler. Na wieść o książce Newtona Huygens w jednym z listów pisze: „Chciałbym zobaczyć tę książkę Newtona. Nie mam nic przeciwko temu, że nie jest on kartezjaninem, byle tylko nie przedstawiał nam założeń takich jak przyciąganie.” Huygens przykładowo za pomocą teorii wirów wyjaśniał, że przyspieszenie, z jakim opadają ciała na Ziemię jest efektem wiru eteru obracającego się dookoła Ziemi: „Nie jestem przekonany o konieczności wzajemnego przyciągania ciał, gdyż wykazałem, że nawet gdyby nie było Ziemi, ciała nie przestawałyby dążyć do centrum wskutek tego, co nazywamy grawitacją.” Dodajmy do tego, że Huygens był świetnym matematykiem, znał prace Keplera, potrafił poprawnie opisywać dynamikę ruchu po okręgu oraz skomplikowanych ruchów drgających, z pewnością więc nie można byłoby zarzucić mu braku zrozumienia teorii grawitacji Newtona od formalnej strony matematycznej. Jeszcze wiele lat po wydaniu *Principiów* niektórzy uczeni nurtu kartezjańskiego starali się wyjaśniać za pomocą teorii wirów Prawa Keplera. Nie zdawali sobie sprawy z tego, że właśnie są one już wyjaśnione przez Newtona. Nawet jeszcze w 1748 r. Królewska Akademia Nauk w Paryżu przyznała wielkiemu matematykowi Eulerowi nagrodę za pracę konkursową dotyczącą teorii ruchów Księżyca, w której to pracy Euler opierał się na teorii wirów.

Odkrywanie dynamiki ruchu po okręgu Christiaan Huygens (ur. 1629 r., zm. 1695 r.) był wybitnym holenderskim matematykiem, fizykiem i astronomem. Huygens znany jest przede wszystkim ze swoich odkryć dotyczących praw optyki oraz praw ruchu falowego. W tym miejscu warto jednak wymienić jego nieco mniej znane, aczkolwiek bardzo ważne dokonanie, jakim było odkrycie praw ruchu po okręgu ze stałą wartością prędkości. Problem ruchu po okręgu podejmował już Galileusz, jednak włoski uczony nie rozwiązał tego

zagadnienia w satysfakcjonujący sposób. Następnie ruch po okręgu badali niezależnie od siebie Newton oraz Huygens. Obaj uczeni doszli do prawidłowych rozwiązań, ale posługując się jeszcze pojęciem siły odśrodkowej. *Dopiero w Principiach Newton ostatecznie wykaże, że zgodnie z II Prawem Ruchu, siła rzeczywiście działająca na ciało i powodująca ruch po okręgu jest skierowana do punktu środka okręgu. Newton ostatecznie i wyraźnie odróżni siły rzeczywiste czynnie działające na ciała (vis impressa) od pojęcia sił bezwładności/sił biernych (vis inertiae/vis insita), które nie działają na ciała, a są miarą bierności/bezwładności mas tych ciał.*

W 1673 roku Huygens wydaje naprawdę znakomite dzieło z mechaniki pod niepozornym tytułem *Zegar wahadłowy*. W tym traktacie dokonuje analizy matematycznej ruchów wahadłowych. Między innymi analizuje szczególne krzywe w płaszczyźnie pionowej, tzw. izochrony, posiadające tę własność, że staczanie się ciała z dowolnego punktu krzywej aż do jej punktu najniższego zawsze odbywa się w tym samym czasie. Okres w ruchu wahadłowym ciała po takiej krzywej nie zależałby od jego wychylenia z położenia równowagi. Wiadomym już było, że izochroną nie może być łuk okręgu (jak sądził Galileusz). W związku z tym okres drgań zwykłego wahadła, zakreślającego w ruchu łuki okręgu, zależy jednak od wychyleń i tylko dla dostatecznie małych wychyleń ten okres wahań jest w przybliżeniu niezależny od nich (zwróćmy uwagę na strukturę logiczną tego często powtarzanego zdania: gdy wychylenie jest małe, to okres nie zależy od wychylenia). Dla odmierzania czasu pożądany byłby zegar wykorzystujący ruch po izochronie, w którym ewentualny wstrząs zmieniający amplitudę ruchu wahadła nie wpływałby na okres tego ruchu. W owym traktacie pojawiają się znamienne twierdzenia o ruchu po okręgu. Zaznaczmy dobitnie, że prace Huygensa powstały przed *Principiami* Newtona, gdzie dopiero była sformułowana II Zasada Dynamiki wiążąca siłę czynną, przyspieszenie i masę ciała, oraz gdzie były odróżnione od siebie pojęcia siły czynnej i siły biernej (bezwładności). Huygens rozważał więc siły odśrodkowe (bezwładności) wywołane ruchem po okręgu ze stałą wartością prędkości. Własności ruchu po okręgu formułuje w twierdzeniu *o sile odśrodkowej wywołanej jednostajnym ruchem po okręgu*. Warto przytoczyć dwa punkty z tego twierdzenia: **II.** *Jeżeli dwa jednakowe ciała krążą z jednakową prędkością po różnych okręgach, to ich siły odśrodkowe są odwrotnie proporcjonalne do średnic tych okręgów.* **III.** *Jeżeli dwa jednakowe ciała krążą po jednakowych okręgach z różnymi prędkościami, to ich siły odśrodkowe są proporcjonalne do kwadratów tych prędkości.* Na podstawie tych dwóch punktów wyłania się postać wzoru na siłę, nazywaną przez Huygensa odśrodkową, a mianowicie:

$$F \propto \frac{v^2}{r},$$

gdzie v jest wartością prędkości ciała, a r jest promieniem okręgu. Niezależnie od Huygensa i w tym samym czasie, do podobnych wyników dochodzi Newton. Wzór ten, wraz z prawami Keplera, dopiero natchnie Newtona pewną ideą, którą będzie rozwijał przez niemal 20 lat.

***Newton, wzniesiony przez gigantów**

W drugiej połowie XVII wieku dokonania Galileusza i Keplera są już uznawane przez świat nauki. Galileusz odkrył fundamentalne prawa mechaniki i lokalne własności grawitacji, na-

tomiast Kepler odkrył kinematyczne prawa ruchu planet względem Słońca. Syntezy myśli Galileusza i Keplera, esencji ich metody naukowej, dokona angielski uczony Isaac Newton (ur. 1642 r., zm. 1727 r.). Newton wyodrębnił ze zjawisk mechanicznych te najbardziej podstawowe, nazwał je Prawami Ruchu i ujął je w matematycznej formie. Ciężenie ciał ziemskich i ruch planet wyjaśnił Prawem Powszechnego Ciężenia, które logicznie wywiódł z astronomii Keplera, dokonań Galileusza i Praw Ruchu sformułowanych przez siebie. Jednocześnie, co niesamowite, stworzył unikalny warsztat matematyczny oparty na geometrii Euklidesa. Matematyka Newtona była w istocie rachunkiem różniczkowym i całkowym.

W jednym z listów do Roberta Hooke'a, z którym uczony od zawsze toczył spory, a dotyczącym odkryć optycznych Newtona (czyli zagadnień nie związanych bezpośrednio z grawitacją), uczony wyraził się nieco złośliwie, aczkolwiek proroczo: „Jeśli widzę dalej, to tylko dlatego, że stoję na ramionach olbrzymów”. Dzisiaj często parafrazujemy to zdanie, umieszczając dzieło Newtona w świetle dokonań jego poprzedników. W istocie, Newton stał na ramionach gigantów. Dzięki myślom Pitagorasa, Euklidesa, Platona, Kopernika, Galileusza, Keplera, to właśnie on, wielki Newton, mógł dokonać rewolucji naukowej.

Do tego należy podkreślić wkład w to wiekopomne dzieło uczonych współczesnych Newtonowi. Zanotujmy, że Teoria Grawitacji Newtona osiągnęła swój ostateczny kształt po bez mała 20 latach naukowej pracy, począwszy od mitycznej połowy lat 60. XVII wieku, z której pochodzą anegdoty o jabłku, aż do połowy lat 80. Do tego czasu myślenie Newtona nie pozbawione było wpływów kartezjanizmu. W początkowym okresie pracy naukowej Newton wprawdzie zdawał sobie sprawę, że siła działająca na planety jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości planety od Słońca, niemniej samo pojęcie siły nie było dobrze sprecyzowane. Chodziło wtedy raczej o rodzaj siły odśrodkowej (*vis centrifuga*) w kartezjańskim wirze. Jeszcze nie było klarownej koncepcji czynnej siły działającej na ciało, skierowanej zawsze do jednego punktu centrum (*vis impressa centripeta* - czynna siła docentralna). Nie do końca zdawano sobie sprawę, że siła działająca na ciało w ruchu, której działanie skierowane jest w stronę pewnego punktu, powoduje zmianę kierunku prędkości ciała, która to zmiana odbywa się także w stronę tego punktu. W wyniku tego, tory ruchów ciał ulegają zakrzywieniu, przy czym krzywizny tych torów zależą od sił i początkowego stanu ruchu. Wydaje się, że myślenie kategoriami sił odśrodkowych, które przecież nie działają na ciała w układach inercjalnych i nie czynią zmiany ich ruchów, nie mogło ani doprowadzić do Zasad Dynamiki, ani do odkrycia Prawa Powszechnego Ciężenia. Do bardzo mglistego jeszcze pojęcia siły, nie mówiąc już o sile grawitacji, pojęcia dopiero co kiełkującego u Newtona w połowie lat 60., należałoby dodać, że koncepcja o powszechności tej siły grawitacji musiała być rzeczywiście w powijakach. Niemniej już jakaś była.

Inspirującym przełomem okazały się kontakty Newtona z Robertem Hookiem oraz z Edmondem Halleyem na początku lat 80. Oto w jednym z listów, dotyczącym rozważań nad ruchami ciał niebieskich, Hooke zwrócił się do Newtona słowami: „Pozostaje teraz znaleźć własności linii krzywej, wytwarzanej przez centralną moc przyciągającą, która wywołuje spadek z linii stycznej (...) w proporcji odwrotnej do kwadratów odległości. Nie wątpię, że za pomocą Pańskiej znakomitej metody łatwo ustali Pan, co to jest za krzywa oraz jakie ma własności, i zasugeruje fizyczną przyczynę takiej właśnie proporcji.” Z kolei Edmond Halley

kontaktował się z Newtonem w sprawie dotyczącej ruchu komety (komety Halleya). Sławna rozmowa Halleya z Newtonem z 1684 roku miała (według notatki Conduitta) przebiegać tak: „(...) spytał go, jakie krzywe powinny zakresłać według niego planety przy założeniu, że siła przyciągania w kierunku Słońca jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratów ich odległości od niego. Sir Isaac odpowiedział natychmiast, że będą to elipsy. Doktor, zdumiony i uradowany, zapytał go, skąd to wie. - No cóż, obliczyłem to - odpowiedział Newton.” Nadmienimy jeszcze, że kometa Halleya poruszała się w kierunku przeciwnym do rzekomego wiru kartezyjskiego. Po tych zdarzeniach Newton skupia się nad rozwiązaniem problemu ruchu planet i grawitacji, mając przy tym wsparcie Halleya. W późniejszym okresie pracy naukowej Newton będzie wykorzystywał obserwacje astronoma królewskiego, Johna Flamsteeda.

*Principia

W 1687 roku wychodzi pierwsze wydanie arcydzieła naukowego *Philosophiae naturalis principia mathematica (Matematyczne zasady filozofii przyrody)*, nazywanego dzisiaj po prostu *Principia*. W dziele tym przedstawione są prawa mechaniki oraz Prawo Powszechnego Ciężenia. Za ich pomocą wyjaśniane są wszelkie zjawiska mechaniczne na Ziemi i niebie. Dzieło to rozpoczyna się od Aksjomatów i Praw Ruchu, a następnie składa się z trzech Ksiąg. Dwie pierwsze Księgi traktują o ruchu ciał, ostatnia Księga natomiast traktuje o układzie Świata.

Principia rozpoczynają się od definicji i omówienia podstawowych pojęć, takich jak czas absolutny i przestrzeń absolutna, względność ruchu, układ odniesienia. Następnie zostają sformułowane trzy Prawa Ruchu, znane dzisiaj jako Zasady Dynamiki Newtona. Dalej w Księdze I, za pomocą metod matematycznych i Praw Ruchu, uczony analizuje ruchy ciał po okręgach, po elipsach, po parabolach, po hiperbolach i bada, jaka musi być matematyczna postać siły działającej na ciała, aby ich ruchy odbywały się po takich właśnie torach. Następnie analizowane są między innymi ruchy przyspieszone w kierunku pionowym, ruchy ciał po powierzchniach, ruchy wahadeł. *Uczony na podstawie Praw Ruchu (w szczególności II Prawa Ruchu) bada relacje, jakie zachodzą pomiędzy własnościami kinematycznymi rozważanych ruchów a matematyczną postacią sił (czyli matematycznym wzorem na siłę), powodujących dany ruch zmienny.* W swoich rozważaniach Newton używa wypracowanego przez siebie aparatu matematycznego opartego na *Elementach* Euklidesa, który to aparat matematyczny stanowi w istocie geometryczne podstawy rachunku różniczkowego i całkowego. Oprócz skrupulatnych studiów ruchów ciał pod wpływem sił, w Księdze I Newton dokonuje obliczeń sił działających pomiędzy ciałami kulistymi o sferycznie symetrycznym rozkładzie masy, zakładając, że kule składają się z punktów materialnych, które przyciągają się siłami o pewnej założonej w zagadnieniu postaci matematycznej. *Wnioski i twierdzenia w Księdze I są twierdzeniami matematycznymi, które dowodzi się w oparciu o Prawa Ruchu i założone postacie sił.* W Księdze II *Principiów* uczony analizuje ruchy ciał w różnych sytuacjach fizycznych, często spotykanych w warunkach ziemskich. Księga III natomiast dotyczy zjawisk w Układzie Słonecznym. W Księdze III sformułowane są Prawa Powszechnego Ciężenia a więc prawa powszechne, czyli dotyczące wszystkich ciał we Wszechświecie. Za pomocą tych praw i w oparciu o Prawa Ruchu, Newton oblicza ruchy ciał niebieskich.

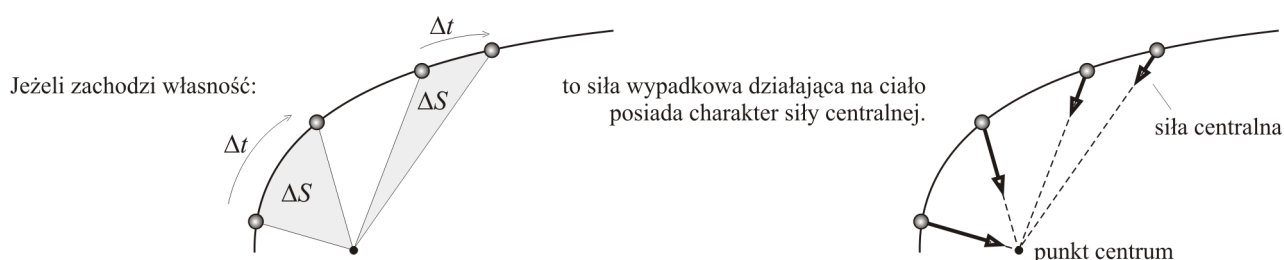
Po tym wstępie dokonamy przeglądu najważniejszych twierdzeń Księgi I, dotyczących związku pomiędzy własnościami konkretnego ruchu i matematycznej postaci siły powodującej taką postać ruchu. Te wnioski będą kluczowe do wyprowadzenia Prawa Powszechnego Ciężenia. Dalej omówimy twierdzenia Księgi III dotyczące Praw Powszechnego Ciężenia. Trzeba zaznaczyć, że autor nie będzie przytaczał oryginalnej i pełnej wersji wybranych twierdzeń, a będzie je omawiał, podążał ich drogą.

8.2 Matematyczne Zasady Filozofii Przyrody Newtona

Amicus Plato amicus Aristoteles magis amica veritas
(Przyjacielem Platon, przyjacielem Arystoteles,
lecz większą przyjaciółką - prawda)
Isaac Newton

O sile docentralnej (wg Księgi I)

W pierwszej grupie twierdzeń Księgi I *Principiów* dowodzi się faktu, że jeżeli na ciało działa siła skierowana wciąż do jednego punktu (powiemy dzisiaj - siła docentralna, *vis centripeta*), to promień wodzący (łączy ten punkt z ciałem) zakreśla w równych odstępach czasu powierzchnie o takich samych polach. Matematyczny dowód tego faktu przeprowadziliśmy w drugim rozdziale podręcznika. Dowód opiera się na II Prawie Ruchu oraz na metodach geometrii Euklidesa. *W związku z tym faktem Newton sugeruje, aby takie ruchy ciał, podczas których zachodzi równość pól powierzchni zakreślanych przez promień wodzący w jednakowych odstępach czasu, potraktować jako oznakę istnienia sił działających na ciało i skierowanych do ustalonego punktu centrum.* Jeżeli skonfrontujemy to z II Prawem Keplera (prawem pól), to w naturalny sposób pojawia się koncepcja, aby ruch planety orbitującej dookoła Słońca potraktować jako ruch odbywający się właśnie pod wpływem siły docentralnej, czyli skierowanej do jednego punktu.



Podsumujmy, iż zgodność II Prawa Keplera z II Prawem Ruchu, wymaga założenia, że siła działająca na planetę skierowana jest wciąż do jednego punktu. Możemy więc powiedzieć, że na planetę wywierane jest działanie skierowane zawsze w stronę pewnego punktu centrum. O takim działaniu powiemy, że jest przyciągające. Dalej będziemy poznawali kolejne własności tego działania przyciągającego.