

### III. GALILEUSZ.— STEVIN.— DESCARTES.

Zamykałem poprzedni wykład przedstawieniem bogactwa poglądów i wynalazków mechanicznych Leonarda Vinci a dziś mam mówić o początkodawcach mechaniki nowożytnej: Stevinie, Galileuszu i Descartes'ie. Sto lat przeszło przedziela te dwie epoki, a w ciągu tego czasu musiała zabłysnąć jakaś wielka myśl świeża, kierująca umysły do rozwijania rozproszonych w dawnych pismach przeczuć nowej mechaniki. Myśl ta na chwałę naszego narodu zaświtała w Polsce i... poruszyła ziemię.

Dzieło Kopernika *O obrotach ciał niebieskich* wyszło z druku w r. 1543, na parę miesięcy przed zgonem wielkiego męża, zawierając w sobie myśli, które zainicjowały dalszy rozwój mechaniki. W rozdziale piątym księgi pierwszej mówi Kopernik: „Jakkolwiek uczeni powszechnie zgadzają się na to, że ziemia spoczywa w pośrodku świata, tak iż przeciwne twierdzenie uważają za niedopuszczalne, a nawet wręcz śmieszne, wszelako, jeżeli nad tą sprawą zastanowimy się uważniej, pokaże się, że, jako jeszcze nierozwiązana, nie może być pominiętą. Każda bowiem dostrzegalna zmiana w położeniu ciała jest następstwem albo ruchu uważanego ciała, albo ruchu samego spostrzegacza, albo przynajmniej skutkiem nierównej zmiany obu położzeń, gdyż dla ciał, poruszających się jednako w tym samym kierunku, nie widzimy zmiany położenia

pomiędzy uważanym przedmiotem a spostrzegaczem. Ziemia jest stanowiskiem, z którego ów bieg oglądamy i który się oczom naszym przedstawia. Jeżeli więc przyznalibyśmy jaki ruch ziemi, to ruch ten powinien się zdradzić we wszystkich ciałach, poza nią się znajdujących, atoli w kierunku przeciwnym, jak gdyby te ciała dokoła niej się przesuwaly, jak to widzimy przedewszystkiem na całodziennym obrocie nieba.“ W tem rozważaniu obrotu ziemi postawioną została po raz pierwszy jasno i z pełną świadomością rzeczy tak ważna w dynamice nowoczesnej zasada ruchów względnych.

W rozdziale ósmym księgi pierwszej daje Kopernik jedyną przed Galileuszem wzmiankę o ruchu jednostajnie przyśpieszonym, mówiąc: „Ciała, do góry się unoszące, albo też na dół spadające bez ruchu kołowego, nie odbywają ruchu pojedynczego, jednostajnego i równego, gdyż lekkością swoją, albo pędem swojego ciężaru, nie mogą się miarkować. Cokolwiek bowiem spada, z początku wolny ruch odbywa, a zwiększa chyżość podczas spadania.“ Była to jakby zapowiedź wyczerpującej tę kwestję teorii, jaką podał później Galileusz.

W następującym rozdziale dziewiątym pierwszej księgi wyraża Kopernik swój pogląd na przyciąganie powszechne: „Co do mnie, to sądzę, że ciężkość nie jest niczem innem, jak tylko pewnym popędem przyrodzonym, nadanym cząstkom ciał od Bożej Opatrzności, sprawczyni wszystkiego, ażeby się one jednoczyły i całość stwarzały, łącząc się z sobą w postaci kulistej. Jest rzeczą prawdopodobną, że także słońce, księżyc i pozostałe planety, obdarzone są taką samą własnością, ażeby za jej sprawą utrzymały się w widocznej swej kulistości pomimo, że na różny sposób obiegi swe wykonywują.“ Na ważność tych słów Kopernika pierwszy zwrócił uwagę Aleksander Humboldt. Poglądy Kopernika rozwijali następnie twórcy dynamiki,

Galileusz i Newton, i dlatego słusznie nadawaną im jest zbiorowa nazwa szkoły kopernikańskiej w mechanice.

Mechanicy XVI w. podejmując określane przez Leonarda pojęcie *impetu* w ruchu pocisków, przyjmowali, że *impet* przechowuje się nieskończenie przy spadku ciała, a zwiększającą się prędkość przypisywali narostowi impetu pod działaniem ciężkości. Poglądy te rozwijali w XVI w. Scaliger i Benedetti. Podzielał je później Descartes, piszący w r. 1629 w liście do Mersenne'a: „Najprzód przypuszczam, że ruch, raz nadany pewnemu ciału, trwa w niem wiecznie, jeżeli nie zostanie odjęty jaką inną przyczyną, czyli inaczej, to, co się zaczęło poruszać w próżni, z tą samą prędkością poruszać się będzie nieskończenie. Przypuśćmy więc, że ciężar umieszczony w *A* popchnięty zostanie przez swoją ciężkość do *C*. Powiadam, że gdyby ciężkość przestała działać natychmiast po rozpoczęciu ruchu, to ciężar zachowa ten sam ruch, dopokąd nie dobiegnie do *C* i nie będzie spadał, ani wolniej ani prędzej od *A* do *B*, jak od *B* do *C*. Ale rzecz się ma inaczej; na ciężar działa ciężkość, która go popycha na dół i która w każdej chwili daje mu nowy popęd do spadania. Wynika stąd, że ciężar przebiega przestrzeń *BC* znacznie prędzej, niż *AB*, gdyż do impetu, z którym się poruszał po *AB*, dochodzi inny, wytwarzany przez ciężkość która popycha ciężar w każdej chwili.”

Descartes wywodzi stąd proporcjonalność prędkości do czasów, stara się następnie oznaczyć prawo przebieżonych przestrzeni, lecz przez nie-  
R. 21.  
 uwagę popelnia błąd w rozumowaniu i nie dochodzi do ścisłego prawa kwadratów z czasu. Wszakże przytoczony ustęp z listu do Mersenne'a zawiera w sobie pierwsze wyrażenie zasady bezwładności i jasne postawienie prawa niezniszczalności ruchu.

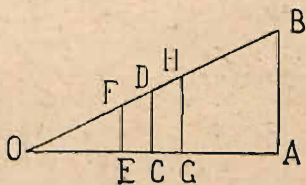


W dziewięć lat po liście Descartes'a do Mersenne'a, w r. 1638 wyszły z druku w Lejdzie w Hollandji: *Discorsi e dimonstrazioni matematiche, intorno a due nuove scienze attenenti alla Mecanica e ai movimenti locali*, coznaczy: Rozmowy i dowodzenia matematyczne w zakresie dwóch nowych umiejętności, dotyczących mechaniki i ruchu miejscowego. W tej pracy ociemniałego już wtedy i znękanego inkwizycją siedemdziesięcioletniego Galileusza mieści się istotny zawiązek nowożytnej nauki o ruchu, ziarno, z którego wyrosła dzisiejsza dynamika. Jakkolwiek po mistrzowsku przedstawił swe rozumowania Galileusz w rozmowach, jakie prowadzą jego przyjaciele, Salviati i Sagredo, a w których jako przedstawiciel dawnych poglądów bierze udział filozof grecki z VI w., komentator Arystotelesa, Simplicius, za długo by tu było przytaczać je dosłownie, podam więc tylko główne punkty ich streszczenia, umiejętnie zestawionego przez wiedeńskiego profesora Macha, w jego głośnem dziele *Die Mechanik in ihrer Entwicklung historisch-kritisch dargestellt* z r. 1883.

W swych rozważaniach nad spadkiem ciał nowożytny umysł Galileusza nie pyta się już, jak Arystoteles, dlaczego ciała spadają, ale jak spadają, wedle jakiego prawa porusza się ciało spadające. Dla określenia tych praw stawia pewne hipotezy, w przeciwieństwie zaś do Arystotelesa, nie ogranicza się do ich postawienia, lecz doświadczalnie stara się dowieść ich słuszności.

Przypuszczał najprzód Galileusz, że prędkość spadku wzrasta proporcjonalnie do przebytej drogi, proste jednak rozumowanie przekonało go o nielogiczności tej hipotezy. Gdyby bowiem ciało spadające, które nabywa

pewnej prędkości po przebyciu pewnej drogi, nabywało prędkości dwa razy większej po przebyciu drogi podwójnej, — wynikałoby stąd, że ta droga, dwa razy dłuższa od pierwszej, przebytą zostaje w tym samym czasie co i droga pierwsza; spadek więc z jakiegokolwiek wysokości trwałby zawsze jednaki przeciąg czasu, co się nie zgadza z rzeczywistością. Odrzuciwszy więc tę hipotezę, jako niemożliwą, przyjął następnie Galileusz, że prędkość nabyta jest proporcjonalną do czasu trwania spadku. Według tego przypuszczenia, jeżeli pewne ciało spada dwa razy i drugi jego spadek trwa dwa razy dłużej niż pierwszy, to prędkość, nabyta przy drugim spadku, jest dwa razy większą, od prędkości, nabytej przy spadku pierwszym. Bezpośrednie sprawdzenie doświadczalne tego wzrostu prędkości było nader trudne i Galileuszowi wydało się łatwiejszem oznaczenie prawa, według którego droga przebieżona rośnie razem z trwaniem spadku. Przedstawiając więc czasy trwania spadku przez długości odcięte na linii poziomej, wyprowadził na końcach odcinków prostopadłe, czyli rzędne, przedstawiające prędkości nabyte. Tak więc, odcinek  $OG$  prostej  $OA$  przedstawia czas trwania spadku, a odpowiednia prostopadła  $GH$  prędkość nabytą. Obserwując, w jaki sposób zmienia się prędkość, zauważył Galileusz, że w chwili  $C$ , gdy upłynęła połowa czasu  $OA$ , prędkość nabyta  $CD$  jest połową prędkości końcowej  $AB$  i że w dwóch chwilach  $E$  i  $G$ , jednakowo odległych od chwili  $C$ , jedna przed, a druga po tej chwili  $C$ , prędkości  $EF$  i  $GH$  jednakowo się różnią od prędkości średniej  $CD$ , będąc, jedna mniejszą a druga



Ryż. 22.

większą od  $CD$ . Każdej więc chwili, poprzedzającej  $C$ , odpowiada chwila późniejsza, jednakowo odległa od  $C$ . Porównyując zatem ruch rzeczywisty ciała spadającego z ruchem jednostajnym, którego prędkość byłaby równą połowie prędkości końcowej, znajdziemy, że co się traci przez ruch rzeczywisty na ruchu jednostajnym w pierwszej połowie spadku, to się zyskuje w drugiej. Można by więc uważać drogę  $s$ , przebieżoną przez ciało spadające, jako przebieżoną ruchem jednostajnym z prędkością równą połowie końcowej prędkości spadku  $v$ , nabytej w ciągu czasu  $t$ , czyli  $s = \frac{v}{2}t$ . Że zaś prędkość jest proporcjonalna

do czasu, więc mamy drugie równanie  $v = gt$ , w którym  $g$  oznacza prędkość nabytą w ciągu jednostki czasu, czyli przyspieszenie. Droga przebieżona  $s$  będzie wtedy:

$$s = \frac{gt}{2}t = \frac{1}{2}gt^2$$

a ruch taki, w którym prędkość wzrasta jednakowo w równych przeciągach czasu, nazwał Galileusz ruchem jednostajnie przyspieszonym.

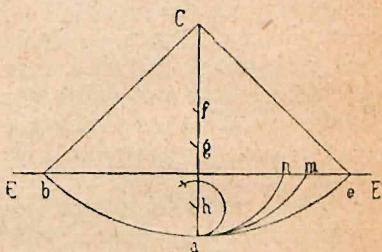
Dla sprawdzenia tego przypuszczalnego prawa spadku ciał szukał najprzód Galileusz sposobów umożliwienia obserwacji przez zwolnienie tego spadku i obserwował kulki, toczące się w rowkach po równi pochyłej, przyjmując, że w ten sposób zmniejszoną zostaje prędkość ruchu bez naruszania formy prawa spadku. Hypoteza, o której sprawdzenie chodziło, wymagała, aby długości rowków: 1, 4, 9, 16, odpowiadały czasom trwania spadku: 1, 2, 3, 4. Doświadczenie potwierdziło tę teorię. W sposób zręczny obserwował czas Galileusz, używając w tym celu zegara wodnego, który nadawał się specjalnie do mierzenia krótkich odstępów czasu. Był to zbiornik o dużym przekroju poziomym, napełniony wodą i mający w dnie



mały otwór, który można było zamykać palcem. Gdy kulka puszczana była w rowku po równi pochyłej, Galileusz odsuwał palec i woda spływała do naczynia, umieszczonego na wadze, a w chwili dojścia kulki do spodu równi zamykał otwór zbiornika. Przy znacznym przekroju zbiornika napór podczas wypływu pozostawał prawie bez zmiany i ciężar wody, która wypłynęła, był proporcjonalny do czasu. Doświadczenie wykazało, że czasy rosły, jak szereg liczb całkowitych, podczas gdy drogi przebieżone rosły, jak szereg kwadratów z tych liczb. Sprawdzało to wniosek, wywiedziony z hipotezy, i samą hipotezę.

Dla zdania sobie sprawy ze związku między spadkiem po równi pochyłej i spadkiem swobodnym pionowym przypuszczał Galileusz, że ciało nabywa jednakowej prędkości, spadając po długości równi, lub pionowo z jej szczytu do podstawy. Przypuszczenie to uzasadniał następującem rozumowaniem. Gdy ciało spada swobodnie, nabywa prędkości proporcjonalnej do czasu trwania spadku; otóż, gdyby w końcu spadku prędkość została nagle odwróconą i skierowaną pod górę, ciało podnosiłoby się i ten ruch pod górę byłby odwróconym obrazem ruchu podczas spadku. W ruchu pod górę prędkość zmniejszałaby się proporcjonalnie do czasu i stawała równą zeru w chwili dojścia ciała do tej samej wysokości, z jakiej poprzednio spadało. Tak więc prędkość, nabyta w końcu spadku, pozwala ciału podnieść się do wysokości, z jakiej spadało. Gdyby zaś, spadając po równi pochyłej, ciało nabywało prędkości, pozwalającej mu wzniesć się po innej równi pochyłej do większej wysokości, niż jego położenie pierwotne, znaczyłoby to, że sam ciężar własny ciała może wywoływać ich podnoszenie. Przypuszczenie więc, że prędkości nabyte zależne są li tylko od wysokości przebieżonej pionowo, a nie od nachylenia równi, jest tylko stwierdzeniem faktu, że ciała ciężkie

dążą do spadania a nie do podnoszenia się w górę. Uzasadnioną przypuszczenie rozumowaniem, sprawdził je następnie Galileusz przez doświadczenie z wahadłem, którego izochronizm był jednym z wcześniejszych jego odkryć. W doświadczeniu tem kulka, wisząca w  $C$ , podniesiona od  $a$  do  $b$  i puszczona, spada z powrotem do  $a$  i podnosi się do  $e$  na taką samą prawie wysokość, nieznacznie tylko zmniejszoną w skutku oporu powietrza. Ruch zaś kulki wahadła po łuku koła uważany być może jako spadek i podnoszenie się po dwóch



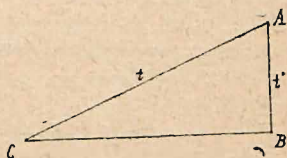
Rys. 23.

równiach pochyłych, jednakowo nachylonych w kierunkach przeciwnych. Gdy następnie Galileusz wytworzył podnoszenie się kulki wahadła po innych łukach, o promieniach mniejszych od  $Ca$ , używając w tym celu szpilki, zatykanej w jakichkolwiek punktach  $f$ ,  $g$ , i zatrzymującej nić wahadła w ten sposób, że spadająca kulka zamiast się podnosić po łuku  $ae$  podnosiła się po łukach  $am$ , lub  $an$ , mających swe środki w  $f$  i  $g$ , — przekonał się, że kulka podnosi się zawsze do wysokości  $EE$ , co nie miałoby miejsca, gdyby nachylenie równi pochyłej miało jakikolwiek wpływ na prędkość nabytą. Zatykając szpilkę coraz niżej, skracać można dowolnie długość wahadła w drugiej połowie wahanicia, nie zmieniając ogólnego obrazu zjawiska; gdy zaś szpilka zatknięta zostanie tak blisko punktu  $a$ , że kulka nie może się podnosić do wysokości płaszczyzny  $EE$ , to nić wahadła nawinie się na szpilkę i kulka przeleci po za



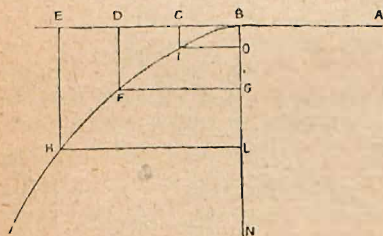
pionową  $aC$ , Prędkość więc, nabyta przy spadku, pozwala ciału podnieść się do tej samej wysokości, z jakiej spadło, a przypuszczenie, że prędkości nabyte przy spadku swobodnym i po równi pochyłej tej samej wysokości są jednakie, jest tylko wyrażeniem tego faktu. Galileusz wywiódł stąd łatwo, że czasy trwania spadku:  $t$  po długości równi  $AC$  i  $t'$  spadku swobodnego z wysokości  $AB$  mają się:  $t:t' = AC:AB$ .

Odkrycie prawa spadku ciał doprowadziło Galileusza do wniosku, że ruch pocisku jest kombinacją dwóch ruchów, niezależnych jeden od drugie-



Rys. 24.

go: ruchu poziomego jednostajnego i ruchu pionowego jednostajnie przyspieszonego. Wniosek ten wyraził twierdzeniem: „Pocisk, ożywiony ruchem jednostajnym poziomym i ruchem spadania naturalnie przyspieszonym, zakreśla połowę paraboli”; dowodzenie zaś podał następujące: „Niech będzie linja lub płaszczyzna pozioma  $AB$  umieszczona w powietrzu, wzdłuż której ciało się porusza od  $A$  do  $B$  ruchem jednostajnym. Tracąc podpórę w  $B$ , ciało pociągane jest na dół swym ciężarem do ruchu naturalnego wzdłuż pionowej  $BN$ . Przedłużmy linję  $AB$  do  $E$  i na linji  $BE$ , która nam



Rys. 25.

posłuży do mierzenia czasu, naznaczymy czasy równe  $BC$ ,  $CD$ ,  $DE$ , a przez punkty  $C$ ,  $D$ ,  $E$ , poprowadźmy równoległe do  $BN$ . Na pierwszej z nich odetnijmy jakąkolwiek długość  $CI$ , na dru-

giej długość cztery razy większą  $DF$  a na trzeciej długość dziewięć razy większą  $EH$  i t. d., tak że kolejne długości rosną jak kwadraty z czasów  $CB, DB, EB...$  Wyobraźmy sobie, że do przesunięcia pocisku, niesionego od  $B$  do  $C$  ruchem jednostajnym, dodamy spadek pionowy wzdłuż  $CI$ , wtedy po upływie czasu  $BC$  ciało znajdzie się w  $I$ ; w czasie  $BD=2BC$  wysokość spadku będzie równa  $4CI$ , gdyż, jak dowiedziono poprzednio, w ruchu naturalnie przyspieszonym drogi przebyte mają się do siebie w stosunku kwadratów z czasu; tak samo droga  $EH$ , przebieżona w ciągu czasu  $BE$ , będzie równa  $9CI$ . Tym sposobem drogi  $EH, DF, CI$ , mają się do siebie jak kwadraty z linii  $EB, DB, CB...$  punkty więc  $I, F, H$  leżą na paraboli“... Po tem dowodzeniu następuje w piśmie Galileusza uwaga, że oba ruchy, poziomy i pionowy, oraz ich prędkości, łącząc się ze sobą, pozostają niezmiennione i nie przeszkadzają sobie nawzajem. Uwaga ta wyraża zasadę składania ruchów, czyli niezależności działania sił.

Teorja ciężkości, której pierwsze zarysy odnalazł Duhem w pismach Alberta Saksończyka, profesora Sorbony paryskiej w wieku XIV, wyrażoną została jasno w dziełach Guidobalda margrabiego del Monte i Bernardina Baldi z XVI w., lecz dopiero u Galileusza nabrała pełnej ścisłości. Rozwinięta w dodatku do *Djalogów*, zredagowanym już po wyjściu z druku pierwszego ich wydania, teorja ta streszcza się w następujących dwóch punktach:

1) Jakikolwiek zespół ciężarów nie może sam przez się wprawić się w ruch, jeżeli ten ruch nie wytwarza obniżenia środka ciężkości zespołu.

2) Jeżeli taki zespół spada swobodnie bez prędkości początkowej, to jego środek ciężkości biegnie wzdłuż linii prostej.

Uczeń Galileusza Torricelli z bogacił tę teorię słynnym twierdzeniem, odnoszącym się do własności mechanicznych środka ciężkości, o czym będzie mowa w następnym wykładzie.

Przechodząc do prac Galileusza w dziedzinie hydro-mechaniki, przypomnieć trzeba najprzód, że hydrostatyka Archimedesesa, opierająca się na podstawach swoistych dla cieczy, niczem nie była związaną z ogólnymi zasadami statyki. Metoda wywodzenia praw hydrostatyki z doświadczalnego poznania niektórych z pomiędzy nich przyjętą została przez większość późniejszych autorów i uczyniła z hydrostatyki umiejętność odrębną, od statyki zupełnie niezależną. Niektórzy tylko dążyli do związania hydrostatyki ze statyką i starali się wywodzić obie te nauki ze wspólnej zasady. Z pomiędzy różnych zasad, służących za podstawę statyki, nadaje się zwłaszcza do związania obu nauk zasada prędkości przygotowanych. To też Arystotelesowskiego zawiązku tej zasady użył Galileusz przy dowodzeniu głównych twierdzeń statyki i hydrostatyki.

W rozprawie *Discorso intorno alle cose che stanno in su l'acqua, o che in quella si muovono* z r. 1612 wprowadził Galileusz do mechaniki nowe pojęcie, któremu dał nazwę *momento*, określając je temi słowy: „Dla mechaników *momento* oznacza tę własność, tę czynność, tę skuteczną potęgę, przez którą silnik porusza ciało a ciało w ruchu stawia opór. Własność ta zależy nie tylko od ciężkości, ale także od prędkości ruchu, od nachylenia różnych dróg, wzdłuż których ruch się odbywa.“ Widzimy stąd, że *momento* Galileusza nie jest ową ciężkością względem położenia, którą wprowadzali do mechaniki Nemorarius i poprzednik Leonarda da Vinci, a która odpowiadała naszemu momentowi, to jest iloczynowi z siły przez odległość, —



a raczej schodzi się z dzisiejszem pojęciem ilości ruchu. Określenie swego *m o m e n t o* objaśnia Galileusz dwiema zasadami, zapożyczonemi z Arystotelesowskiej mechaniki. Pierwsza z nich brzmi: „Dwa ciężary absolutnie równe, poruszające się z równymi prędkościami, są tej samej potęgi, czyli tegoż samego *m o m e n t o*, we wszystkich swych działaniach.“ Druga zasada polega na tem, że „potęga ciężkości rośnie razem z prędkością ciężaru poruszanego, tak, że równe absolutnie ciężary mają potęgi czyli swoje *m o m e n t o* nierówne; najpotężniejszym jest ten, który jest najszybszy i to w stosunku jego prędkości do prędkości drugiego ciężaru.“ Jako przykład przytacza Galileusz drąg o nierównych ramionach, na których zawieszone równe ciężary nie równoważą się i ciężar zawieszony dalej od punktu podpory przeważa. Zrównanie znów dwóch *m o m e n t o* przy równowadze drąga o nierównych ramionach z nierównymi ciężarami,  $p_0 v_0 = p_1 v_1$ , daje stosunek ciężarów równy odwrotnemu stosunkowi prędkości  $\frac{p_0}{p_1} = \frac{v_1}{v_0}$ , co stanowi aksjomatyczną

podstawę twierdzenia o prędkościach przygotowanych. I w ten sposób, nieznacznie a ściśle, przystosowaną została ta zasada do rozwiązywania poszczególnych zagadnień hydrostatyki.

Objaśnia więc najprzód Galileusz całkowite lub częściowe zanurzenie się ciał w cieczach odwrotnym stosunkiem owych *m o m e n t o*; w sposób wytworny stosuje przytem zasadę prędkości przygotowanych, porównywując zanurzenie prostościanu w naczyniu również prostościennego kształtu z wynikającem stąd podniesieniem poziomu cieczy w naczyniu; wynurzenie prostościanu odpowiada analogicznie obniżeniu poziomu. Zasada prędkości przygotowanych wyraża się tu proporcjonalnością dróg, jakie przebiegają poziom cieczy i podstawa prosto-

ścianu, do powierzchni poziomu cieczy i powierzchni poziomego przecięcia prostościanu. Zanurzenie więc prostościanu daje wynik analogiczny z dolaniem cieczy do mniejszego z dwóch naczyń połączonych o różnych przekrojach. Dowodzeniu Galileusza zarzucićby można komplikację, wynikającą z powiększenia ogólnej masy przy zanurzaniu prostościanu. Zarzut ten wszakże dotyczyć może tylko strony matematycznej dowodzenia, które z punktu widzenia mechanicznego przedstawia się zupełnie naturalnem. Podczas gdy działanie bezpośrednio zanurzanego prostościanu ma miejsce tylko na powierzchni jego podstawy, to ruch prostościanu wywołuje pośrednio podniesienie całej powierzchni poziomu cieczy w naczyniu. Prędkości ruchu obu tych powierzchni muszą być odwrotnie proporcjonalne do ich wielkości. Zresztą, wzmiankowana komplikacja jest tylko pozorną, jeżeli weźmiemy pod uwagę, że wszystko odbywa się ściśle w ten sam sposób, jak w naczyniach połączonych nierównej wielkości, gdy ciśnienie wywarne na poziom cieczy w naczyniu węższem poziom ten obniża. Wtedy poziom w naczyniu szerszem podnosi się na wysokość odwrotnie proporcjonalną do przekrojów poziomych obu naczyń. Tak więc rozumowanie Galileusza jest zupełnie prawidłowe i oba jego m o m e n t o są sobie równe, gdyż prędkości pozostają do siebie w stosunku odwrotnym mas.

W podobny sposób z twierdzenia prędkości przygotowanych wywodził Galileusz inne prawa, podane przez Archimedesą. Podobnie, jak w przypadku zanurzanego w cieczy i podnoszonego prostościanu, wychodził on zawsze z rozważania ruchów rzeczywistych i tym sposobem uwidoczniał niewzruszone zasady statyki, w sposobie ich pozostawiania i jego możliwych zmianach. Szczegółom rozprawy Galileusza o ciałach pływających wiele możnaby zarzucić, wielu wywodom brak jest ścisłości,

wszelkie zarzuty jednak nie dotyczą głównego punktu wyjścia rozumowań, polegającego na związaniu hydrostatyki z mechaniką ogólną a zwłaszcza na uznaniu, że zasada prędkości przygotowanych stanowi najodpowiedniejszy sposób objaśniania praw równowagi cieczy.

W wydanych w r. 1638 w Lejdzie *Rozmowach i dowodzeniach matematycznych* Galileusz dał początek nie tylko dynamice, lecz także nauce o wytrzymałości tworzyw. On pierwszy zastosował geometrię i rachunek do rozwiązywania zadań wytrzymałości i dał początek teorii belek prostych. Dowiódł mianowicie: że belka czworograniasta, węższą ścianą na podporach położona, znosi większe obciążenie, niż takaż belka na płask leżąca; że stosunek wytrzymałości w obu tych przypadkach jest równy stosunkowi większego wymiaru poprzecznego do wymiaru mniejszego. Dowiódł dalej, że belki, jednym końcem osadzone, lub też podparte w obu końcach, mogą znosić obciążenie proporcjonalne do szerokości i do kwadratu z wysokości a odwrotnie proporcjonalne do długości tychże belek. Dowiódł także, że walce wydrążone opierają się daleko więcej wygięciu poprzecznemu, niż walce pełne tej samej objętości. Lecz na tem nie kończą się odkrycia Galileusza w tym dziale mechaniki stosowanej. Zawdzięczamy mu jeszcze teorię brył o jednostajnej mocy, przeznaczonych do zaprowadzenia największej możebnej oszczędności w użyciu materiału, i twierdzenie, że belka o stałej szerokości, jednym końcem osadzona a której ściana spodnia jest płaska i pozioma, posiada jednakową wytrzymałość we wszystkich miejscach, jeżeli ściana górna jest wyciosana według paraboli, mającej swój wierzchołek na końcu obciążonym belki.

Porównyując belkę wyginaną z belką rozciąganą, znalazł Galileusz, że wytrzymałość pierwszej tak się ma



do wytrzymałości drugiej, jak połowa wysokości belki do jej długości. Mylny ten wniosek brał swój początek w mylnem również, a podówczas rozpowszechnionem mniemaniu, że wszystkie włókna belki obciążonej wyciągają się wskutek wygięcia, zarówno po stronie wklęsłej, jak po wypukłej. Natomiast zarzucano Galileuszowi niesłuszność twierdzenia, jakoby belka paraboliczna miała być doskonałą do budowy pokładów okrętowych ze względu na jej lekkość, a słynny budowniczy francuski Franciszek Blondel w liście z r. 1661, pisanym do fizyka szwedzkiego Wurtiusa, zalecał używanie belek wpodłuż eliptycznych, jako szczególnie do tego celu sposobnych. W istocie obwód eliptyczny stosuje się lepiej od parabolicznego do ciężarów, kładzionych w różnych miejscach belki, jak to właśnie bywa na pokładzie okrętowym, ale belka taka nie posiada wcale jednostajnej wytrzymałości.

Początkodawca nauki o ruchu i nauki o wytrzymałości tworzyw, Galileusz zostawił wybitny ślad swej pracy nad statyką, przez rozwiązanie zadania równi pochyłej. Równocześnie zadaniem tem zajmował się Stevin, który w r. 1586 ogłosił jego rozwiązanie. Kto z nich pierwszy doszedł do celu, trudno orzec, to tylko pewne, że, nie wiedząc jeden o drugim, dążyli do tego celu różnemi metodami; a zresztą obu ich wyprzedził autor nieznany, o którym była mowa w poprzednim wykładzie, nazwany przez Duhema poprzednikiem Leonarda da Vinci.

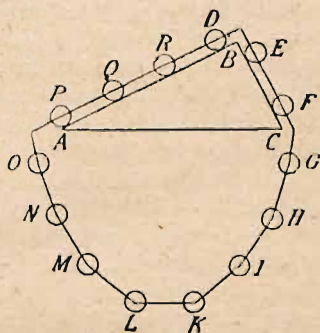
O życiu Galileusza i innych jego pracach nie mówiłem, bo to są rzeczy więcej znane. O mniej głośnieym Szymonie Stevin'ie wspomnieć należy, że się urodził w Bruges we Flandrii w r. 1548, a więc na lat szesnaście przed Galileuszem, był przez czas pewien buchalterem i kasjerem w Antwerpji i Bruges, później podróżował po Prusach, Polsce, Szwecji i Norwegji. Osiadłszy w północnych

Niderlandach, zapisał się na uniwersytet w Lejdzie i poświęcił pracom naukowym. Był profesorem matematyki i intendentem finansów księcia Maurycego Nassauskiego, inspektorem obwałowań nadmorskich, generalnym kwarttermistrzem armji niderlandzkiej. Zmarł w 1620, na 22 lat przed Galileuszem. Rozgłos wśród społecznych dały mu dzieła o fortyfikacjach i sztuce wojkowej, puszczanie w ruch wozów żaglowych. Jego wpływowi zawdzięczają Holendrzy i Francuzi zaprowadzenie dobrego systemu rachunkowości państwowej.

Statyka Stevina, ogłoszona w r. 1586 po flamandzku, weszła do zbioru jego dzieł, wydanego w przekładzie łacińskim przez Snelliusa w r. 1605 p. t. *Hypomnemata mathematica*. Występuje w niej Stevin, jako gorący zwolennik Archimedesza, krytykujący ostro metody Arystotelesa. Tytuł jednego z rozdziałów jego statyki brzmi: „Przyczyna równowagi nie leży w łukach koła, zakreślonych przez końce ramion drąga”. Potępioną została temi słowy metoda, której błogi wpływ na rozwój statyki starałem się uwydatnić, mówiąc o pracach Nemo-rariusa, Leonarda Vinci i Galileusza.

Wykład swój zaczyna Stevin szeregiem określeń, po których następują twierdzenia, oparte na teoriach drąga i równi pochyłej. Metodą oryginalną i udatną wyprowadza Stevin prawo równowagi drąga prostego. Zadanie równi pochyłej rozwiązuje oryginalniej jeszcze metodą, nie przypominającą żadnym szczegółem rozwiązania Galileusza, ani późniejszych wywodów Descartes'a. Za podstawę rozważania własności ciężarów, ciągnionych ukośnie, bierze następujące twierdzenie: „Na dwóch bokach trójkąta, którego płaszczyzna jest prostopadła a podstawa równoległa do poziomu, umieszczone są dwie kulki tej samej wielkości i ciężaru, równoważące jedna drugą; ciężar pozorny kulki lewej ma się do ciężaru pozornego

kulki prawej, jak długość prawego boku trójkąta do długości boku lewego." Dosłownie przytoczę dowodzenie Stevina. „Niech będzie trójkąt  $ABC$ , w którym bok  $AB$  jest dwa razy dłuższy od boku  $BC$ ; dwie kulki  $D$  i  $E$  mają jednaką wielkość i ten sam ciężar, a chodzi o to, by dowieść, że ciężar pozorny kulki  $E$  jest dwa razy większy od ciężaru pozornego kulki  $D$ . Dodajmy w tym celu do tych dwóch kulek dwanaście takich samych kulek  $F, G, H, T, K, L, M, N, O, P, Q, R$  i połączmy je wszystkie równej długości nitkami, tworząc w ten sposób łańcuch, w którym nasze czternaście kulek rozstawione są w równych odstępach. Zarzućmy ten łańcuch na nasz trójkąt



Rys. 20.

w ten sposób, że bok  $AB$  unosić będzie cztery a bok  $BC$  tylko dwie kulki. Gdyby ciężar pozorny grupy czterech kulek  $DRQP$ , nie był równy ciężarowi pozornemu grupy dwóch kulek  $EF$ , jedna z tych grup przeważałaby drugą. Przypuśćmy, że grupą przeważającą są cztery kulki  $DRQP$ . Kulki  $ONML$  ważą tyleż co kulki  $GHIK$ ; ciężar więc ośmiu kulek z lewej strony będzie większy od ciężaru sześciu z prawej i łańcuch się przesunie. Kulka  $D$  zejdzie na miejsce kulki  $O$ , kulki  $EFGH$  zajmą miejsce kulek  $PQRD$  a kulki  $IK$  miejsce kulek  $EF$ . Łańcuch będzie zajmował toż samo położenie, co i poprzednio, i skoro cztery kulki leżące na  $AB$  przeważają zawsze dwie na  $BC$ , to ruch łańcucha będzie wieczny, co jest niemożliwem. Ciężar więc pozorny czterech kulek na  $AB$  równoważy



ciężar pozorny dwóch kulek na  $BC$ , czyli ciężar pozorny kulki  $E$  jest dwa razy większy od ciężaru pozornego kulki  $D$ , co było do dowodzenia.“

W dalszych swych wywodach dochodzi Stevin do prawa równoległoboku sił i formuluje to prawo, nie podając wszakże przekonującego dowodzenia. Wywiódł to prawo ściśle w r. 1636 profesor paryskiego Collège de France, Gilles Persone de Roberval.

Rozwiązaniem zadania równi pochyłej szczylił się Stevin i rysunek łańcucha z czternastoma kulkami, zarzuconego na trójkąt, pomieścił w pośrodku tarczy herbowej, na karcie tytułowej dzieła *Hypomnemata mathematica*. Na obramowaniu tarczy u góry widnieje napis flamandzki „Wonder en is ghen Wonder“, co znaczy „Cud nie jest cudem“. „Niema nic prawdziwszego“, mówi Mach: „jak ta uwaga Stevin’a. Każdy błysk postępu naukowego wywołuje pewien rodzaj rozczarowania: przekonujemy się, że rzecz, która nam się wydawała cudowną, nie jest większym cudem od wielu innych, z których zdajemy sobie sprawę instynktowo i uważamy za oczywiste same przez się.“

W dziedzinie hydrostatyki podjął Stevin zadanie oznaczenia ciśnienia cieczy na dno lub ściany naczynia, uwidoczniając przytem paradoks hydrostatyczny, że ciecz wywierać może ciśnienie znacznie większe od własnego swego ciężaru. Dowiódłszy, że ciało stałe jakiegokolwiek kształtu a tegoż samego ciężaru, co woda, zanurzone w wodzie, pozostawać może w równowadze w jakimkolwiek położeniu, gdyż zajmuje też samą przestrzeń i tyleż waży co i woda, — Stevin wyobraża sobie naczynie o ścianach pionowych, pełne wody i wykazuje, że dno tego naczynia ponosi ciśnienie równe ciężarowi znajdującej się w naczyniu wody. Przypuszcza następnie, że w wodzie, wypełniającej naczynie, zanurzonem zostało ciało stałe jakiegokolwiek

kształtu i tegoż samego ciężaru, co i woda; oczywiście ciśnienie na dno przez to się nie zmieni. Jeżeli przeto nadany zostanie ciału zanurzonemu kształt taki, że ciało wypełni całe naczynie z wyjątkiem cienkiej warstwy wody na dnie i małego kanaliku jakiegokolwiek kształtu, idącego od dna do wierzchu naczynia, to ciśnienie na dno będzie jeszcze takież same, czyli równe ciężarowi słupa wody, mającego za podstawę dno naczynia. Skoro zaś przypuszczenie, że ciało stale utrzymywane jest w niezmiennem położeniu, nie zmienia w niczem działania wody na dno naczynia, będzie zatem ciśnienie na to dno zawsze równe ciężarowi tegoż samego słupa wody bez względu na to, jaki jest kształt naczynia.

Przechodzi następnie Stevin do oznaczenia ciśnienia wody na ściany naczynia, pionowe lub nachylone. W tym celu dzieli powierzchnię ścian linjami poziomymi na wielką liczbę pasków i wykazuje, że każdy pasek ponosi ciśnienie większe, niż gdyby był poziomy i leżał na wysokości swego brzegu górnego, a jednocześnie mniejsze, niż gdyby był umieszczony na wysokości brzegu dolnego. Zmniejszając szerokość pasków a powiększając do nieskończoności ich liczbę, dowodzi metodą granic, że ciśnienie na ścianę płaską nachyloną jest równe ciężarowi słupa wody, mającego tę ścianę za podstawę a za wysokość połowę wysokości naczynia. Oznacza następnie ciśnienie na jakąkolwiek część ściany płaskiej nachylonej i znajduje, że jest równe ciężarowi słupa wody, utworzonego przez wystawienie w każdym punkcie tej ściany linii prostopadłej do ściany a tak długiej, jaką jest głębokość tego punktu pod wodą. Gdy to twierdzenie dowiedzionem zostało dla jakichkolwiek powierzchni płaskich, w jakimkolwiek ich położeniu, łatwo już było odnieść je do jakichkolwiek powierzchni krzywych i wywnioskować, że ciśnienie cieczy na jakąkolwiek powierzchnię, ma

za miarę ciężar słupa cieczy, którego podstawę stanowi ta powierzchnia, zastąpiona w razie potrzeby płaszczyzną, a którego wysokości, odpowiadające różnym punktom podstawy, będą równe odległościom odpowiednich punktów powierzchni, od poziomu cieczy. Innemi słowy, miarą ciśnienia jest ciężar słupa cieczy, mającego za podstawę powierzchnię uciskaną a za wysokość — odległość środka ciężkości tej powierzchni od poziomu cieczy.

Jak widzimy, w hydrostatyce, tak samo jak i w statyce, wywody Stevina dosięgają wyżyn Archimedesowej ścisłości.

Mówiąc o zawiązkach nauki o ruchu, wspomniałem o pierwszym wyrażeniu zasady bezwładności przez Descartes'a. Wielki ten filozof i matematyk francuski położył jeszcze inną wydatniejszą zasługę w rozwoju mechaniki. Urodzony w Tours w r. 1596, pobierał nauki w kolegium jezuitów w La Flèche, służył wojskowo, podróżował, a oddawszy się nauce i stroniąc od świata, ukrywał się w różnych miastach Hollandji, tak że we Francji, tylko Mersenne i inny zaufany przyjaciel wiedzieli o miejscu jego pobytu. Potępienie Galileusza przez inkwizycję w r. 1633 wstrzymywało go przez lat parę od ogłaszania drukiem prac, których też część znaczna pozostała w rękopisie. Zmarł Descartes w Stokholmie w r. 1650, w osiem lat po Galileuszu.

W krótkiem piśmie, przesłanem w r. 1637 Konstantemu Huyghensowi, ojcu Christiana, p. t. *Objaśnienie machin, z których pomocą można przy użyciu małej siły podnosić znaczne ciężary*, oparł Descartes całą statykę na zasadzie pracy przygotowanej. Podczas gdy Galileusz poczytywał tę zasadę raczej za wynik prawa równowagi i brał pod uwagę iloczyn z siły przez prędkość, Descartes oświadcza w *Objaśnieniu machin*, że jedyna zasada, na jakiej się



opiera ich wynalazek, jest następująca: „Siła, mogąca podnieść ciężar np. 100 funtów do wysokości 2 stóp, może także podnieść 400 funtów na wysokość  $\frac{1}{2}$  stopy.“ Zasadę tę stosuje Descartes w swem piśmie do krążka, równi pochyłej, klina, kołowrotu, śruby i drąga, opierając na niej teorie wszystkich tych maszyn. Później w liście do Mersenne'a zaznaczył wyraźnie infinitezymalny charakter zasady, pisząc, że w nauce o równowadze maszyn brać należy pod uwagę początek ruchu ciężarów, czyli to, co dziś nazywamy ruchem przygotowanym albo wirtualnym.

Arystoteles opierał prawo równowagi na zasadzie odwrotnej proporcjonalności ciężarów do prędkości, a Galileusz wyrażał tę zasadę twierdzeniem, że dwa ciężary nierówne równoważą się nawzajem i mają równe momenty, gdy ich wielkości są w stosunku odwrotnym do prędkości. Descartes wprowadził do tego twierdzenia stosunek dróg przebieżonych, zamiast stosunku prędkości, a zmiana ta miała poważne znaczenie w rozwoju mechaniki. Dzięki tej zmianie przestano wywodzić prawa równowagi z nieściśłego postulatu i opierać na potępionej już wtedy dynamice Arystotelesa, a statyka stała się umiejętnością samodzielną, opartą na zasadzie absolutnie pewnej i bezpośrednio widocznej. Szczycił się też Descartes tem, że mu się udało objaśnić działanie maszyn prostych, nie posługując się pojęciem prędkości, „o której,“ jak pisał do Mersenn'a; „trudno coś powiedzieć, nie wytłumaczywszy co jest ciężkość i co system świata.“

W dziele *Principia Philosophiae*, wymieniając prawa natury, uogólnił Descartes sformułowane przy rozważaniu spadku ciał prawo bezwładności, mówiąc najprzód, że jeżeli pewne ciało jest w spoczynku, to samo przez się poruszać się nie zacznie, a jeżeli raz wprowadzone jest w ruch, to pozostawać będzie wciąż w tym

samym ruchu i samo przez się nigdy się nie zatrzyma. Nadmieniam dalej, że każde ciało w ruchu dąży samo przez się do poruszenia się zawsze po linii prostej a nigdy po linii krzywej. Dziś wyrażamy to krócej i mówimy, że każde ciało, jeżeli było w spoczynku, lub w ruchu prostoliniowym i jednostajnym, to bez działania czynników zewnętrznych pozostaje nadal w stanie pierwotnym, spoczynku lub ruchu.

Prace Galileusza, Stevina i Descartes'a dały początek mechanice nowoczesnej, o której dalszym rozwoju będzie mowa w następnych wykładach.