

Zanim zaczniemy mówić *b*, uzgodnijmy jak brzmią zasady dynamiki

Jacek Własak, em. prof. Politechniki Wrocławskiej

Wstęp

Czy dziś w XXI wieku, w dobie domykania Modelu Standardowego, prześwietlania głębi kosmosu i coraz szerszego używania GPS, powinniśmy roztrząsać tak mało aktualny problem, jak brzmienie zasad dynamiki?

Myślę, że tak i postaram się pokazać, że zasady dynamiki można sformułować bardziej precyzyjnie, niż w wielu podręcznikach. Z własnego doświadczenia wiem, że jasny sposób nauczania fizyki nie wywołuje tak powszechnego lęku przed nią, często też zachęca do jej poznania. Zasady dynamiki grają tu szczególną rolę, ponieważ zaczynają one naukę fizyki, a pierwsze wrażenie jest bardzo istotne.

Czy bez precyzyjnego sformułowania zasad dynamiki nie da się nauczyć fizyki? Da się. Wielu autorów podręczników do fizyki ogólnej nie zauważa problemu w alogicznym, a raczej dość mętnym, sformułowaniu tych zasad. A przecież tysiące fizyków na nich się „wychowały”. Poniżej przytaczam sformułowania zasad z kilku dostępnych w Polsce podręczników. Nie można uznać, że sformułowania te są bardzo niepoprawne. One są standardowe, są po prostu skopiowane z Newtona. Nie oddają zarówno zasad, z których Newton skorzystał, aby opisać ruch planet, jak i późniejszych osiągnięć mechaniki. Sformułowanie zasad zgodne z tymi wymaganiami zawarte jest w rozdziale końcowym.

Jak Isaac Newton sformułował zasady dynamiki w *Matematycznych zasadach filozofii naturalnej*?

[Za polskim tłumaczeniem Sławomira Brzezowskiego. Copernicus Center Press, 2015]

A. Definicje

Def. 1

Ilość materii jest jej miarą, która wynika łącznie z jej gęstości i wielkości zajętego miejsca.

Def. 2

Ilość ruchu jest jego miarą wynikającą łącznie z prędkości i ilości materii...

B. Scholium

... Nie definiuję czasu, przestrzeni, miejsca i ruchu jako wszystkim dobrze znanych... zwykli ludzie pojmują te wielkości ... zmysłami..., aby usunąć nieporozumienia... dobrze podzielić te pojęcia na bezwzględne i względne..., matematyczne i potoczne.

- I. **Absolutny**, prawdziwy i matematyczny **czas** sam z siebie i ze swej natury płynie równomiernie, bez jakichkolwiek odniesień zewnętrznych i inaczej zwany jest trwaniem...

- II. **Absolutna przestrzeń**, w swej własnej naturze, bez odniesienia do cokolwiek zewnętrznego, pozostaje zawsze niezmienna i nieruchoma...
- III. **Miejsce** jest częścią przestrzeni zajmowaną przez ciało...
- IV. **Absolutny ruch** jest przesunięciem ciała z jednego absolutnego miejsca do innego...

C. Aksjomaty czyli Prawa ruchu

Prawo 1

Każde ciało pozostaje w stanie spoczynku albo ruchu jednostajnego wzdłuż prostej, dopóki przez siły do niego przyłożone nie zostanie zmuszone do zmiany tego stanu.

Prawo 2

Zmiana pędu jest zawsze proporcjonalna do wywartej siły napędzającej i dokonuje się zgodnie z kierunkiem linii prostej, wzdłuż której ta siła działa.

Prawo 3

Każdemu działaniu przeciwstawione jest równe mu przeciwdziałanie, to jest wzajemne działania dwóch ciał, jednego na drugie, są zawsze równe i skierowane ku tej drugiej części.

W dalszym fragmencie Newton podaje, że siła jest wektorem.

D. Wniosek I

Pod wpływem impulsu dwóch połączonych sił ciało zakreśli przekątną równoległoboku w tym samym czasie, w którym zakreśliłoby jego boki pod działaniem każdej z tych sił oddzielnie...

Pierwsza i druga zasada dynamiki w wybranych podręcznikach

M. Jenike, *Fizyka I, WSiP, Warszawa 1999*

W inercjalnym układzie odniesienia każde ciało zachowuje swój stan ruchu, gdy nie działają na nie siły lub działające siły równoważą się.¹

Zasada ta jest podstawowym prawem mechaniki. Obecnie może wydawać się nam oczywista, ale w tej postaci znana jest ona dopiero od ponad 300 lat.

Przejdźmy do pierwszej cytowanej w przypisie pozycji: **C Kittel, W.D. Knight, M.A. Ruderman *Mechanika* PWN Warszawa 1969**

Rozdział 3. Niezmienniczość Galileusza.

Krótki przegląd. Prawa ruchu Newtona. Rozdział ten dotyczy głównie praw ruchu Newtona, które znacie już z kursu fizyki w szkole. Powtórzmy je wprawdzie dla ciała o stałej masie.

¹ Obecnie pierwszą zasadę dynamiki precyzyjniej formułuje się inaczej, a mianowicie jako postulat istnienia układów inercjalnych. Częściowe wyjaśnienie tego zagadnienia znajdziecie w tematach fakultatywnych. Bardziej zainteresowanym polecamy: M. Kittel – *Mechanika* oraz A.K. Wróblewski, J.A. Zakrzewski – *Wstęp do fizyki*.

Pierwsze prawo Newtona. Ciało pozostaje w spoczynku albo porusza się ze stałą prędkością (przyśpieszenie równe zeru), gdy pozostawione jest samo sobie, tzn. nie ma siły zewnętrznej działającej na to ciało.

Zatem: $\mathbf{a} = 0$, gdy $\mathbf{F} = 0$.

Drugie prawo Newtona. Całkowita siła działająca na ciało równa się iloczynowi masy ciała przez przyspieszenie:

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a} \dots$$

„...Dwa pierwsze prawa są słuszne jedynie wtedy, gdy obserwacja odbywa się w układzie nie mającym przyspieszenia... Taki układ nazywa się inercyjnym układem odniesienia...”

KOMENTARZE:

- *Ostatnie zdanie nie występuje w „aksjomatach Newtona” jest ono zupełnie dodatkowe! Czyli IV zasada!?*
- *Ten rozdział zawiera ponad 20 stron, na których omówione są zagadnienia bardziej lub mniej związane z zasadami dynamiki. Są też stwierdzenia błędne, np. czytamy:*

1. „Galileusz orzekł, że ciało, na które nie działa żadna siła, ma stałą prędkość”²

KOMENTARZ DO KOMENTARZA:

- *Galileusz twierdził, że ciało, na które nie działa żadna siła, porusza się ze stałą prędkością ...po okręgu!*

2. „Droga Mleczna jest częścią naszej Galaktyki”.... To bez komentarza.

Przejdźmy do drugiej cytowanej pozycji:

A.K. Wróblewski, J.A. Zakrzewski, Wstęp do fizyki. PWN, Warszawa 1984

KOMENTARZ WSTĘPNY

Zasady dynamiki znajdują się w IV rozdziale zaczynającym się na 249 stronie. Poprzedzające go rozdziały są zaporowe dla ucznia, gdyż zawierają kinematykę (któż z niej zrezygnuje przed dynamiką?) z wyprowadzeniem transformacji Lorentza. Założmy, że uczeń zacznie od rozdziału czwartego. I zasada dynamiki pojawia się dopiero na siódmej stronie po niezbyt lapidarnych i nie podsumowanych rozważaniach o oddziaływaniach, np. o oddziaływaniu silnym jedyna wzmianka brzmi:

„... Jak już wskazywaliśmy w rozdziale I, *oddziaływanie silne (jądrowe)* jest mniej znane z praktyki codziennej; mimo to wspomnimy tu o nim. To właśnie oddziaływanie silne powoduje, że gdy na nieruchomy początkowo proton padnie mezon π^- , wtedy proton może odskoczyć z pewną prędkością wskutek reakcji zwanej *rozpraszaniem elastycznym (sprężystym)*: $\pi^- + p \rightarrow \pi^- + p$; oczywiście zmieni się również przy tym prędkość mezonu π^- . O zderzeniach będzie dokładniej mowa w rozdziale VI...” (!?!)

Szósta strona rozdziału IV (s. 255):

² „Stwierdzenie to jest często nazywane pierwszym prawem ruchu Newtona”.

„... A więc cząstką odosobnioną byłaby tylko taka, która jest jedyną (!) cząstką Wszechświata, lub też cząstką całkowicie izolowaną od reszty Wszechświata – pomijamy tu kwestię, jak zrealizować taką sytuację ...”

Siódma strona rozdziału IV:

„...Odpowiemy teraz na pytanie, jak zachowuje się tak zdefiniowana cząstka odosobniona. Odpowiedź ta, wypowiedziana po raz pierwszy przez Newtona w postaci postulatu zwanego *pierwszym prawem ruchu*(lub *pierwszą zasadą dynamiki*) brzmi: cząstka odosobniona *zawsze* pozostaje w spoczynku, lub porusza się po linii prostej ze stałą prędkością, tzn. bez przyśpieszenia. Podkreślmy raz jeszcze, iż chodzi tu o pierwszą zasadę dynamiki bez *gravitacji*. Nasuwa się natychmiast uwaga, że stwierdzenie powyższe nie ma w ogóle sensu bez określenia układu odniesienia, w którym jest ono prawdziwe...”

„...Tak wybrany układ odniesienia, względem którego cząstka nie podlegająca oddziaływaniu z resztą Wszechświata spoczywa lub jest w ruchu jednostajnym po linii prostej, nazywamy (**str. ósma rozdziału IV**) *układem inercyjnym*...”

„...Sformułowaliśmy w ten sposób wspomniane wyżej pierwsze prawo ruchu, czyli tzw. *zasadę bezwładności*. Jak widzimy, zasada bezwładności stanowi *postulat* istnienia układu inercyjnego, nie wskazuje jednakże, gdzie w praktyce należy szukać takiego układu...”

„...Łatwo się przekonać, że jeśli istnieje *jeden* układ inercyjny U, to istnieje ich *nieskończenie wiele*, ponieważ każdy układ U' poruszający się względem układu inercyjnego U ruchem prostoliniowym ze stałą prędkością **V** jest też układem inercyjnym...”

KOMENTARZ I:

Znajdujemy tu wyjaśnienie o czym mówi pierwsza zasada, jednak nie jest ona sformułowana zgodnie z nim.

KOMENTARZ II:

Wszystko jest zapisane jednolitym, długim tekstem. Italiki nie podkreślają najistotniejszych treści.

Sama zasada nie jest wyodrębniona z tekstu w żaden sposób i aby ją przemyśleć należy z uwagą przeanalizować ok. 10 stron tekstu i rysunków.

CZYTAMY TEŻ:

U góry strony (256) podpis przy fotografii pomnika Newtona: „Wielki fizyk angielski, sir Isaac Newton (1642-1727), zapostulował istnienie układu inercyjnego i sformułował prawa ruchu w dynamice, którą dziś nazywamy nierelatywistyczną mechaniką niutonowską”

KOMENTARZ KOŃCOWY:

Nie dziwne więc, że cytujący tę pozycję Maciej Jenike wcale jej w podręczniku nie wykorzystuje.

A. Czerwińska, B. Sagnowska, Fizyka dla szkół średnich. Wydawnictwo „Zamiast korepetycji”, Kraków 1999

Jeżeli na ciało nie działa żadna siła lub działające siły równoważą się, to ciało pozostaje w spoczynku (gdy było w spoczynku) lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym (gdy było w ruchu)

Wyobraźmy sobie ciało spoczywające na Ziemi, na które działają siły ciężaru i sprężystości podłoża równoważąc się wzajemnie. W układzie związanym z Ziemią jest spełniona I zasada dynamiki dla tego ciała...”, „...Układy odniesienia, w których I zasada dynamiki jest spełniona, noszą nazwę **układów inercjalnych**...”

KOMENTARZ: Wynika stąd, że układ związany z Ziemią jest inercjalny!!!

Tekst przed ramką z I zasadą dynamiki:

„...gdyby można było wyeliminować całkowicie działanie tarcia, to ciało poruszałoby się względem Ziemi nieskończenie długo, ze stałą prędkością (pytanie: CZYLI PROSTOLINIOWO?). Już Galileusz zauważył, że siły są potrzebne do zmiany prędkości ciała, ale nie są potrzebne do utrzymania stałej prędkości tego ciała...”

„...Newton uogólnił (?) powyższe (Galileusza) rozumowanie, formułując pierwszą zasadę dynamiki...”

Fizyka dla szkół ponadgimnazjalnych, pod redakcją J. Salach. „ZamKor”, Kraków 2007.

M. Fiałkowska, B. Sagnowska, J. Salach, „Z fizyką w przyszłość” podręcznik dla szkół ponadgimnazjalnych, zakres rozszerzony, „ZamKor”, Kraków 2014.

Jeśli siły działające na ciało równoważą się (czyli siła wypadkowa ma wartość zero), ciało pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Pod sformułowaniem zasad dynamiki czytamy:

„...Zasady dynamiki Newtona nie są spełnione w każdym układzie odniesienia. Układy, w których można je stosować, nazywają się **układami inercjalnymi**...”

„...Dla znacznej liczby zjawisk, które obserwujemy i opisujemy na Ziemi, układ związany z Ziemią można uważać za inercjalny. Wszystkie układy inercjalne są względem siebie nieruchome albo poruszają się względem siebie ruchem postępowym, prostoliniowym i jednostajnym. O układach nieinercjalnych będzie mowa w paragrafie 2.8 (2.7)...”

§2.8 (§2.7)

„...Omawiając zasady dynamiki, powiedzieliśmy, że istnieją nieinercjalne układy odniesienia, w których te zasady nie są spełnione...W celu wyjaśnienia tego problemu posłużymy się przykładem. Rozważmy wózek i leżącą na nim kulkę o masie m (rys.) Załóżmy, że między kulką i wózkiem nie ma tarcia. Przyjmijmy, że pierwszy obserwator (1) stoi na nieruchomym podłożu, a drugi (2) siedzi na

wózku. Wprawmy wózek w ruch z przyspieszeniem \mathbf{a} , jak na rys... Obaj obserwatorzy są zgodni, że na kulkę działają dwie równoważące się siły: siła ciężkości i siła sprężystości podłoża. Jednak zdaniem pierwszego kulka pozostaje względem niego w spoczynku (zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki), drugi zaś obserwator twierdzi, że kulka oddała się od niego ruchem przyspieszonym tak, jakby działała na nią jakaś siła zwrócona przeciwnie do \mathbf{a} ...”

„...Jak widać, w obu doświadczeniach obserwator siedzący na wózku wyraża poglądy niezgodne z poznanymi przez nas zasadami dynamiki. Dlaczego?

Gdyby to pytanie zadać Newtonowi, odpowiedziałby, że ten obserwator nie ma prawa stosować zasad dynamiki, bo wraz z wózkiem porusza się ruchem zmiennym. Jest więc obserwatorem w układzie nieinercyjnym, a zasady dynamiki wolno stosować tylko w układach inercyjnych.

Taki pogląd panował do połowy XVIII wieku, kiedy to francuski matematyk d’Alembert podał sposób pozwalający stosować zasady dynamiki Newtona także w układach nieinercyjnych. W takich układach do wszystkich rzeczywistych sił działających na ciało, którego ruch badamy, należy dodać nową siłę:

$$\mathbf{F}_b = m(-\mathbf{a}_{\text{układu nieinercyjnego}})$$

Równą iloczynowi masy ciała i przyspieszenia układu nieinercyjnego ze znakiem „minus”. Siła ta nosi nazwę **siły bezwładności**...”

KOMENTARZE

Dlaczego zamiast sztucznego doświadczenia z wózkiem, które większość uczniów będzie uczyć się na pamięć, nie przywołać znanych faktów np. z autobusu?

Newton nie wspomina o układzie inercyjnym, co więcej nie używa pojęcia przyspieszenia!!!

Zasada d’Alemberta nie została wprowadzona z myślą o układach nieinercyjnych.

Dlaczego sztuczny twór, który nie spełnia trzeciej zasady dynamiki, nazywać siłą?

Dlaczego nie pozostawić tych dodatków w postaci realnie istniejących przyspieszeń?

Przeważająca liczba podręczników formułuje te dwie zasady dynamiki podobnie. W wielu zbiorów drugich zasad dynamiki jest liczniejszy. Pojawiają się bowiem:

a) druga zasada dynamiki w postaci ogólnej

...Drugą zasadę dynamiki można zatem sformułować następująco:

Przyrost pędu ciała jest równy iloczynowi działającej na ciało siły wypadkowej i czasu jej działania: $\Delta \mathbf{p} = \mathbf{F}_{\text{wypadkowa}} \Delta t$

Widać, że te równania (II zasada dynamiki i II zasada dynamiki w postaci ogólnej) są równoważne, gdy:

$\Delta(m\mathbf{v}) = m\Delta\mathbf{v}$ a więc wówczas, gdy w czasie ruchu masa jest stała.

b) druga zasada dynamiki dla ruchu obrotowego

W wyżej wspomnianej **Fizyce dla szkół ponadgimnazjalnych** znajdujemy:

$$\vec{M} = \frac{\Delta \vec{L}}{\Delta t} \quad (\text{A4.23})$$

Dla układu obracających się ciał zmiana momentu pędu może oczywiście nastąpić tylko w wyniku działania sił (o niezerowych momentach względem osi obrotu) pochodzących spoza układu.

Wzór (A4.23) jest zupełnie ogólny tzn. słuszny bez zastrzeżenia o stałości osi obrotu. Jednak jego powszechnie używane przekształcenie (nazwane II zasadą

dynamiki ruchu obrotowego) – już nie: $\vec{M} = \frac{I\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} \quad M = I\epsilon$

Jest jeszcze: („**Z fizyką w przyszłość**”)

Na podstawie rozważań przeprowadzonych w tym paragrafie możemy sformułować drugą zasadę dynamiki dla ruchu obrotowego bryły.

Jeżeli wypadkowy moment sił działających na bryłę jest różny od zera, to bryła porusza się zmiennym ruchem obrotowym z przyspieszeniem kątowym wprost proporcjonalnym do wypadkowego momentu siły. Współczynnikiem proporcjonalności jest odwrotność momentu bezwładności bryły względem wybranej

osi obrotu:
$$\vec{\epsilon} = \frac{1}{J} \vec{M}$$

1. Dlaczego mechanika Newtona stała się kamieniem węgielnym fizyki?

Zacznijmy od skrótu chronologicznych faktów:

W 1453 r. Kopernik prezentuje układ heliostatyczny z 34 dyferentami i epi-cyklami do opisu ruchu 8 obiektów. Występuje wyraźna różnica w stosunku do układów geocentrycznych – wszystkie planety poruszają się podobnie. Kopernik nawet sugeruje, że przyczyna tego ruchu jest jedna.

W 1609 r. i 1618 r. J. Kepler analizując dane z obserwacji Tychona Brahe ogłasza prawa, które wskazują na jedną przyczynę ruchu wszystkich planet. Podane przez niego wyjaśnienia są zupełnie irracjonalne.

W 1644 r. Kartezjusz ogłasza teorię wirów „materii nieba”, które poruszają planetami. Teoria ta zyskała uznanie Huygensa i była użyta do wyjaśnienia eliptyczności ruchu planet przez J.I. Bernoulliego jeszcze w 1730 r.

W 1687 r. Newton w *Principiach* przedstawia dowód, że ten ruch jest wynikiem działania siły grawitacyjnej.

W latach 1735-1736 wysłano dwie ekspedycje do pomiaru długości południka, aby rozstrzygnąć, która teoria, Kartezjusza czy Newtona, poprawnie opisuje kształt Ziemi. Mimo tego, że w 1737 r. pierwsza ekspedycja, a w 1744 r. druga potwierdza wniosek Newtona o spłaszczeniu Ziemi na biegunach, jego teoria nie została uznana przez świat naukowy.

Na konkurs Królewskiej Akademii Nauk w 1748 r. Euler, d'Alembert (zwycięzca) i Clairaut przysyłają prace, w których wykazują, że teoria Newtona nie jest wystarczająca do opisu ruchu Księżyca. Euler używa teorii wirów,

d'Alambert grawitacji i sił magnetycznych, a Clairaut grawitacji i sił $1/r^3$ oraz $1/r^4$. Wkrótce wszyscy trzej znajdują błędy w swoich pracach.

W 1752 r. Clairaut poprawnie opisuje ruch Księżyca jedynie w oparciu o teorię Newtona.

Dopiero od połowy XVIIIw. zarówno mechanika Newtona jak i zaproponowana przez niego metodologia zostaje powszechnie przyjęta.

Najlapidarniejsza ocena mechaniki Newtona zawiera się w słowach JL de Lagrange:

„... Newton był najszcześniejszym z ludzi, gdyż istnieje tylko jeden świat i tylko jeden człowiek mógł ustalić prawa w nim rządzące...”

Obecna fizyka powstała wskutek wyszukiwania praw, z których można wyprowadzić opis obserwowanych zjawisk, tego właśnie nauczył nas Newton. I ten sposób postępowania przyjął się dlatego, że Newton przy jego pomocy wyprowadził prawa Keplera.

2. Bez jakich założeń Newton nie uzyskałby eliptycznych orbit planet?

Dwa założenia Newtona są oczywiste: II aksjomat oraz fakt, że siła grawitacyjna jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu odległości. Trzecim, jest przyjęcie, że siły działające na oba ciała dokładnie spełniają III aksjomat. W końcu czwarte, bez którego opis byłby zupełnie inny (o ile dałoby się go ukończyć) było przyjęcie, że ruch planet odbywa się w nieruchomej (absolutnej) przestrzeni.

Nieruchomość (zamieniona później na inercjalność) **układu odniesienia** jest bardzo istotną częścią teorii.

3. Sformułowanie zasad dynamiki zgodne z założeniami Newtona.

Powyższy wywód wskazuje, że poprawne sformułowanie zasad dynamiki musi zawierać określenie układu inercjalnego oraz sposób, w jaki można ustalić czy dany układ odniesienia jest inercjalny. Myślę, że można je ująć w trzech następujących zdaniach:

I. Układ nieruchomy oraz każdy poruszający się względem niego ze stałą prędkością nazywamy **układem inercjalnym**.

II. Różnica: $\vec{F} - \frac{d\vec{p}}{dt}$

jest miarą nieinercjalności układu odniesienia, względem którego opisujemy ruch.

III. Siły oddziaływania wzajemnego między dwoma ciałami materialnymi mają, w każdej chwili, równe wartości, ten sam kierunek, lecz przeciwne zwroty.

Zasady te należy uzupełnić definicjami: masy i pędu oraz stwierdzeniem, że siły są sumą wektorową wszystkich sił podstawowych tzn. grawitacyjnych i

elektromagnetycznych (w klasycznej fizyce są tylko dwa oddziaływania). Należy też podkreślić, że jeśli jakieś działanie nie ma reakcji, to nie jest siłą.

Wzmianki historyczne za: A.K. Wróblewski – **Historia Fizyki, PWN Warszawa 2006.**

