

Zasady dynamiki Newtona – oczywista oczywistość?

Joanna Gondek

Uniwersytet Gdański, Instytut Fizyki Doświadczalnej, Zakład Dydaktyki Fizyki

Fizyka nie jest zaliczana do tych szkolnych przedmiotów, które są przez większość uczniów lubiane. Można się nad tym faktem pochylać i próbować ten stan rzeczy zmienić. Większym problemem jest jednak to, że coraz częściej można się spotkać z wypowiedzianymi jako zarzut stwierdzeniami typu: „fizyki nie da się zrozumieć”, „w tym nie ma żadnej logiki”. Wydaje się, że należy je odczytywać jako zarzuty skierowane pod adresem tych, którzy w taki czy inny sposób fizyki uczą, a więc nauczycieli, autorów podręczników, popularyzatorów fizyki. Fizyka się nie zmieniała, pozostała tą samą dziedziną, która kiedyś uchodziła za trudną, ale precyzyjną, spójną, logiczną, nawet wśród niechętnych jej uczniów. Co więc takiego się wydarzyło, że ocena fizyki stała się tak krytyczna?

Fizyka jest rzeczywiście dziedziną trudną, chociażby z powodu złożoności zjawisk, które opisuje. Nic więc dziwnego, że do opisu tych zjawisk, nawet zdawać by się mogło tak prostych jak ruch, wprowadzane są uproszczenia. Tak zawsze było i będzie, bez uproszczeń nie uda się nauczania fizyki (zwłaszcza na początkowym etapie) przeprowadzić. Czy jednak upraszczanie opisu zagadnień fizycznych nie poszło zbyt daleko i czy te uproszczenia nie są jednym z powodów trudności, jakie mają uczniowie ze zrozumieniem tych zjawisk? Jako przykład zagadnienia, którego opis, przedstawiany uczniom, budzi wątpliwości, mogą posłużyć... zasady dynamiki Newtona.

Na pytanie o zasady dynamiki, jeśli odpowiedź pada, to brzmi ona mniej więcej tak:

Pierwsza zasada dynamiki: Jeżeli na ciało nie działa żadna siła lub działające siły się równoważą, to ciało nie zmienia swego stanu ruchu, czyli spoczywa lub porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.¹

Druga zasada dynamiki: Jeśli siły działające na ciało nie równoważą się (czyli siła wypadkowa jest różna od zera), to ciało porusza się ruchem zmiennym z przyspieszeniem wprost proporcjonalnym do siły wypadkowej: $\vec{a} \sim \vec{F}_w$. Współczynnik proporcjonalności jest równy

odwrotności masy ciała: $\vec{a} = \frac{\vec{F}_w}{m}$.²

¹ „Blżej fizyki” cz. 1, WSiP, Warszawa 2009; podręcznik dla szkół gimnazjalnych.

² „Z fizyką w przyszłość 1”, ZamKor, Kraków 2012; podręcznik dla szkół ponadgimnazjalnych, zakres rozszerzony.

Trzecia zasada dynamiki: *Oddziaływania ciał są wzajemne. Jeśli ciało A działa na ciało B siłą \vec{F}_{AB} , to ciało B działa na ciało A siłą \vec{F}_{BA} o takiej samej wartości, tym samym kierunku, przeciwnym zwrocie i innym punkcie przyłożenia.*³

Takie odpowiedzi nie dziwią, ponieważ takie brzmienie mają zasady dynamiki we wszystkich niemal podręcznikach fizyki, niezależnie od tego, dla którego poziomu kształcenia są przeznaczone. Dlatego też przeważająca większość pytanych, niezależnie od tego, na jakim są etapie edukacji z fizyki, nie ma wątpliwości, co do poprawności tak sformułowanych zasad dynamiki. Ostatecznie staramy się wpoić uczniom, iż zasady dynamiki są fundamentem, na którym zbudowana jest cała fizyka klasyczna, zatem na pewno jest z nimi „wszystko w porządku”. Co jednak się okaże, gdy sprowokujemy dyskusję nad zasadami dynamiki tak sformułowanymi jak powyżej? Uczniowie bez problemu dojdą do wniosku, że pierwsza z nich jest niepotrzebna. Jeżeli siły działające na ciało się równoważą (*siła wypadkowa jest równa zero*) to znaczy, że przyspieszenie ciała jest równe zero, czyli prędkość ciała się nie zmienia. To zaś oznacza, że ciało albo spoczywa, albo porusza się ruchem prostoliniowym jednostajnym. A więc z drugiej zasady dynamiki otrzymuje się to, o czym jest mowa w pierwszej zasadzie. Wniosek z tego jest taki, że pierwsza zasada dynamiki jest niepotrzebna. Takie spostrzeżenie wprawia uczniów/studentów w stan zmieszania. Zwłaszcza, jeśli sami artykułują taki wniosek, jako wynik rozumowania prowadzącego w odpowiedzi na pytanie: „z jakim przyspieszeniem porusza się ciało, gdy działają na nie siły, których wypadkowa jest równa zero”. Niektórzy z uczniów/studentów przyznają, że przy rozwiązywaniu zadań miewali wątpliwości, z której zasady dynamiki – pierwszej czy drugiej – korzystają. Taka sytuacja nie sprzyja przekonaniu uczniów do tego, że fizyka jest nauką precyzyjną, spójną, logiczną. Rozumowania prowadzącego do skonstatowania „nadmiaru” zasad dynamiki uczniowie prawdopodobnie sami nie przeprowadzają, ale nie dlatego, że jest ono skomplikowane, a raczej dlatego, że „nie podważa się zasad”.

Do jakich jeszcze wniosków może doprowadzić analiza zacytowanych zasad dynamiki, nazywanych także prawami ruchu? Że dwie z nich mówią o ruchu bez wskazania układu odniesienia, względem którego ruch jest rozpatrywany. A przecież względność ruchu jest jednym z kluczowych zagadnień fizyki. Przy czym nie to jest ważne, że dla fizyków stanowi zagadnienie istotne, którego analiza doprowadziła do sformułowania zasad dynamiki, szczególnej i ogólnej teorii względności. W nauczaniu fizyki na etapie szkoły gimnazjalnej i ponadgimnazjalnej ważne jest to, że na względność

³ „Ciekawi świata 1”, Operon, Gdynia 2012; podręcznik fizyki dla szkół ponadgimnazjalnych, zakres rozszerzony.

ruchu uczniowie sami zwracają uwagę. Zatem kolejna wątpliwość związana z zasadami dynamiki Newtona: skoro pierwsza i druga z nich traktują o ruchu, to dlaczego nie ma w nich mowy o tym, względem jakiego układu odniesienia ten ruch jest określany?

Także trzecia zasada dynamiki budzi wątpliwości. Jako przykład sytuacji, w której „zastosowanie” trzeciej zasady dynamiki nastęrcza trudności, może posłużyć analiza ruchu krzesłek kręcącej się karuzeli łańcuchowej. Ruch krzesłek karuzeli najczęściej jest tłumaczony za pomocą tzw. siły odśrodkowej. Na pytanie, co jest źródłem tej siły – zgodnie z trzecią zasadą dynamiki źródłem tej siły musi być jakieś ciało – odpowiedź albo nie pada, albo brzmi „ruch karuzeli”.



„Ruch karuzeli”, a w trzeciej zasadzie mowa jest o siłach, z jakimi działają na siebie ciała, a nie ciało i ruch innego ciała. Czyli także trzecia zasada dynamiki w takim sformułowaniu, jak zacytowane powyżej, wydaje się nie być oczywista. Pojawianie się siły odśrodkowej w opisie ruchu krzesłek karuzeli tym bardziej dziwi, gdy na pytanie: gdzie stała osoba wykonująca zdjęcie, pada odpowiedź „na ziemi”.

Jeszcze do niedawna dyskusja nad zasadami dynamiki prowadziła do tego, że w którymś jej momencie studenci pierwszego roku fizyki reflektowali się, że „pierwsza zasada dynamiki obowiązuje w inercjalnym układzie odniesienia”. Ale z roku na rok było gorzej, a w roku akademickim 2012/2013 nikt ze studentów 1 roku kierunków Fizyka i Fizyka Medyczna na UG⁴ nie przyznał się do tego, że słyszał o takim pojęciu. Trudno uwierzyć, że żaden ze studentów nie uczył się w szkole fizyki w zakresie rozszerzonym, gdzie pojęcie to jest wprowadzane. Wszystko wskazuje na to, że powodem „wyparcia się” znajomości pojęcia inercjalnego układu odniesienia jest zupełny brak zrozumienia tego pojęcia, jego abstrakcyjność, poczucie jego nieistotności.

W gimnazjalnych podręcznikach fizyki, choć ruch jest w nich omawiany, nie pisze się o układach odniesienia. Formułowanie zasad dynamiki bez odwoływania się do układów odniesienia wydaje się konsekwencją tego faktu. (Pojęcie układu odniesienia nie jest wymienione w „Podstawie programowej nauczania przedmiotu fizyka” dla gimnazjalnego etapu kształcenia). W podręcznikach dla szkół ponadgimnazjalnych zarówno dla podstawowego, jak i rozszerzonego

⁴ Autorka prowadziła zajęcia ze wszystkimi studentami pierwszego roku kierunku Fizyka i kierunku Fizyka Medyczna.

zakresu fizyki, układy odniesienia już się pojawiają. Nie znajduje to jednak odzwierciedlenia w treści zasad dynamiki podawanych w tych podręcznikach. W podręcznikach przeznaczonych dla zainteresowanych znajomością fizyki w zakresie rozszerzonym pod „ramką” z treścią pierwszej zasady dynamiki podawana jest informacja, że zasada ta „jest spełniona tylko w układach odniesienia nazywanych inercjalnymi” i że takim układem odniesienia jest Ziemia. Nie dziwi więc fakt, że studenci pierwszego roku fizyki posiadanej wiedzy na temat układów inercjalnych nie uważają za wystarczającą do tego by się nią „chwalić”. Mechanizm jest dość oczywisty: skoro w treści zasad dynamiki nie mówi się o układach odniesienia, tzn. że nie są one istotne. Uczniowie uznają za ważne to, co jest „w ramach”, reszta jest komentarzem – jest to niestety powszechny, a przy powtórkach oraz utrwalaniu wiadomości dość zresztą naturalny sposób postępowania.

Można się spodziewać, że związek między zasadami dynamiki Newtona i inercjalnymi układami odniesienia dostrzegą i zrozumieją przynajmniej ci, którzy zetkną się z nimi w czasie studiów (np. geografowie, przyrodnicy, biologowie), a już na pewno studenci fizyki. Jednak fakt, że zacytowane sformułowania zasad dynamiki nie budzą zastrzeżeń studentów wyższych lat studiów fizyki, doktorantów na kierunku fizyka, nauczycieli fizyki rozwiewa te nadzieje. Wprawdzie w wielu podręcznikach akademickich zasady dynamiki są formułowane tak jak w podręcznikach szkolnych, ale w podręcznikach tych inercjalnym i nieinercjalnym układom odniesienia poświęca się znacznie więcej uwagi⁵. Mogłoby się więc wydawać, że studenci i absolwenci fizyki będą w stanie dostrzec niefortunność „podręcznikowych” zasad dynamiki. Dlaczego zatem tak nie jest? Doświadczenie uczy, że nawet studenci, którym wskaże się i wytłumaczy mankamenty takiego sformułowania zasad dynamiki, jak zacytowane powyżej, zapytani po jakimś czasie o zasady dynamiki wyrecytują je w takim właśnie nieprecyzyjnym, budzącym wątpliwości brzmieniu. Dlatego ważne jest, aby od początku nauczać fizyki bez niepotrzebnych „uproszczeń”, ponieważ to „czego Jaś się nauczy” trudno później wypełnić. W przypadku zasad dynamiki jest to tym bardziej istotne, że rzeczywiście stanowią one podstawę fizyki klasycznej i jako takie nie powinny być podawane w formie budzącej tak istotne wątpliwości. I nie ma znaczenia, że uczniowie czy nawet studenci sami takich wątpliwości nie wyartykułują. To akurat jest argument przemawiający raczej za tym, że należy przywiązywać większą wagę do słów, którymi przekazujemy wiedzę, do czytelnego i jednoznacznego przekazu.

Czy można więc sformułować zasady dynamiki w sposób, który pozwoli wyeliminować chociaż te wymienione powyżej wątpliwości? Skoro istotą

⁵ Niestety są też takie publikacje przeznaczone dla studentów fizyki, w których jest napisane, że pierwsze prawo dynamiki Newtona wynika wprost z drugiego; zob. P.A. Tipler, R.A. Llewellyn, „Fizyka współczesna”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2011, s. 4.

rozważań nad ruchem jest wskazanie układu odniesienia, skoro *pierwsza zasada dynamiki obowiązuje tylko w tzw. inercjalnych układach odniesienia*⁶ – czy nie można powiedzieć o tym w treści zasad dynamiki, sformułować ich na przykład tak, jak poniżej:

I zasada dynamiki. Istnieje taki układ odniesienia, względem którego ciało, na które nie działają żadne siły lub działają siły, które się równoważą, pozostaje w spoczynku lub porusza się ruchem prostoliniowym jednostajnym (czyli bez przyspieszenia). Taki układ odniesienia nazywany jest inercjalnym układem odniesienia.

II zasada dynamiki. Przyspieszenie, z jakim ciało porusza się względem inercjalnego układu odniesienia, jest wprost proporcjonalne do siły wypadkowej sił działających na to ciało, a odwrotnie proporcjonalne do masy ciała.

III zasada dynamiki. Jeżeli układ odniesienia, względem którego rozpatrywany jest ruch ciała A, jest układem inercjalnym, to jeżeli na ciało A działa jakaś siła, to źródłem tej siły jest jakieś inne ciało B. Jeżeli ciało B działa na ciało A pewną siłą, to w tym samym czasie ciało A działa na ciało B siłą o takiej samej wartości i kierunku, lecz przeciwnie zwróconą.

Wydaje się, iż taką postać zasad dynamiki Newtona można zaproponować nawet uczniom zaczynającym naukę fizyki, czyli uczniom gimnazjum. Oczywiście treści zasad dynamiki powinny być podsumowaniem analizy różnych sytuacji fizycznych, poprzedzone omówieniem zjawiska ruchu i wielkości kinematycznych opisujących ruch. Aby sformułować zasady dynamiki w podobny sposób jak zaproponowany powyżej, wśród wprowadzanych pojęć musiałyby się znaleźć także pojęcie układu odniesienia. Niestety – jak już zostało powiedziane – „Podstawa programowa nauczania przedmiotu fizyka” nie przewiduje tego. Czy dlatego, że układ odniesienia jest pojęciem zbyt trudnym dla gimnazjalistów? Nie wydaje się, ponieważ to pojęcie można przecież uczynić wręcz namacalnym. Ćwiczenia w opisywaniu ruchu i spoczynku tego samego ciała względem różnych układów odniesienia mogą być dla uczniów i ciekawe i zabawne. Można też, i chyba należy doprowadzić do tego, aby uczniowie zadali pytanie na przykład takie: „skoro ruch i spoczynek są względne, to dlaczego twierdzimy, że to jednak Ziemia porusza się wokół Słońca, a nie Słońce wokół Ziemi?”. Takie pytanie jest dobrym punktem wyjścia do wprowadzenia pojęcia siły. Uwzględnienie w opisie ruchu ciał sił działających na te ciała nie jest oczywiście sprawą prostą. Można wprowadzić pojęcie siły właśnie przez powiązanie faktu jej działania na ciało z przyspieszeniem, z jakim to ciało się porusza. Ale przyspieszenie ciała zależy od tego, co zostanie wybrane za układ odniesienia dla tego ciała. Czy

⁶ „Ciekawi świata 1”, Operon, Gdynia 2012; podręcznik fizyki dla szkół ponadgimnazjalnych, zakres rozszerzony.

oznacza to, że także siły zależą od tego, co zostanie wybrane za układ odniesienia? Jak z takiego „problemu” wybrnąć? Nie rozwiązany pozostaje nadal problem wspomniany już powyżej – bardziej chyba uczniów niepokojący, niż „zależność sił od wyboru układu odniesienia” – a mianowicie: jeżeli ruch jest względny to dlaczego twierdzimy, że to jednak Kopernik miał rację a nie Ptolemeusz? Wydaje się, że uświadomienie sobie przez uczniów wymienionych wątpliwości jest dobrym momentem na wprowadzenie zasad dynamiki Newtona, bo to one właśnie pozwalają na wyjaśnienie tych wątpliwości. W zasadach dynamiki Newtona mowa jest o tym, iż istnieją takie układy odniesienia, że opis tego, co dzieje się z ciałem względem nich właśnie, wymaga mniejszej liczby przyczyn niż opis względem innych układów odniesienia. Isaac Newton w „Matematycznych zasadach filozofii przyrody” opisał to w następujący sposób: *Dla zjawisk fizycznych należy przyjąć nie więcej przyczyn niż te, które są jednocześnie prawdziwe i wystarczające do wyjaśnienia ich występowania. Celowo filozofowie mówią, że Przyroda nie czyni niczego zbytecznego, zbytecznym jest zaś nadmiar [przyczyn], kiedy wystarczyło by [ich] mniej; Przyroda cieszy się bowiem z prostoty i nie gustuje w zbędnych przyczynach*⁷. Te wystarczające przyczyny to oddziaływania fizyczne między ciałami, siły zaś są uznawane za miarę tych oddziaływań. Tak więc siły, o których mowa w zasadach dynamiki Newtona to siły realne, siły będące przejawem oddziaływań fizycznych, takich na przykład jak grawitacja, czy elektromagnetyzm.

Pierwsza zasada dynamiki Newtona nie wskazuje żadnego konkretnego układu inercjalnego a tylko stwierdza, że takie istnieją. Jak je zatem znaleźć, jak rozpoznać? Odpowiedź na to pytanie daje trzecia zasada dynamiki Newtona, z niej wynika sposób rozpoznawania inercjalnych układów odniesienia. Trzecią zasadę dynamiki można wyrazić oczywiście inaczej, niż w sposób zaproponowany powyżej. Na przykład R. P. Feynman w swoich słynnych wykładach z fizyki (na które fizycy lubią się powoływać) zrobił to tak: *Jedną z najważniejszych cech sił jest materialne źródło, a ten fakt nie jest po prostu definicją. (...) Newton podał jeszcze inną własność siły: siły między dwoma oddziałującymi ciałami są dokładnie równe i przeciwnie skierowane*.⁸ Zatem, jeżeli można wskazać materialne źródło każdej z sił występujących w opisie ruchu ciała względem danego układu odniesienia, to dla tego ciała i tego, co się z nim dzieje ten układ odniesienia jest układem inercjalnym. (Innymi słowy: jeżeli wybrany układ odniesienia jest dla ciała A inercjalnym układem odniesienia to można wskazać materialne źródło każdej z sił występujących w

⁷ The Mathematical Principles of Natural Philosophy, by Sir Isaac Newton, tłum. na j. ang.: Andrew Motte, Londyn 1729, tom II, księga III, s. 202; e-book Google dostępny na stronie: http://books.google.pl/books?id=6EqxPav3vIsC&pg=PA202&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false (dostęp 3 stycznia 2013 r.).

⁸ R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands „Feynmana wykłady z fizyki”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001, t. 1.1., s. 184.

opisie ruchu ciała A względem tego układu odniesienia. Można zatem wskazać ciała B, C, ..., na które ciało A działa siłami o takich samych wartościach, ale skierowanych przeciwnie do zwrotu siły, których źródłami są ciała B, C, ...). Jeżeli zaś do opisu ruchu ciała względem danego układu odniesienia trzeba wprowadzić siły, których materialnego źródła nie potrafimy wskazać (znaleźć) to znaczy, że dla tego ciała wybrany układ odniesienia nie jest układem inercyjnym. Takie układy odniesienia nazywane są nieinercyjnymi, a siły, których materialne źródło nie istnieje – siłami pozornymi lub bezwładności.

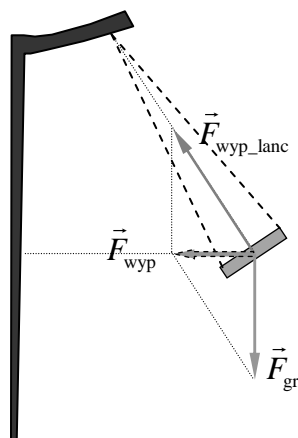
Jako sytuację przykładową, przy omówieniu której stosunkowo łatwo pokazać różnice między opisem ruchu ciała względem inercyjnego i nieinercyjnego układu odniesienia, można rozważyć sytuację wspomnianą już w kontekście trzeciej zasady dynamiki, czyli ruch krzeselka karuzeli łańcuchowej z punktu widzenia osoby stojącej na ziemi oraz z punktu widzenia osoby siedzącej na sąsiednim krzeselku karuzeli.

Względem osoby stojącej na ziemi krzeselko karuzeli porusza się po okręgu, zatem względem niej kierunek wektora prędkości krzeselka się zmienia, co oznacza, że krzeselko porusza się względem niej z przyspieszeniem. Jakie siły działają na krzeselko? Siła grawitacji, z jaką przyciąga je Ziemia (na rysunku symbolizuje ją wektor \vec{F}_{gr}) i siły, z jakimi działają na nie łańcuchy.

Kierunek siły grawitacji \vec{F}_{gr} i kierunek siły wypadkowej sił, z jakimi działają na krzeselko łańcuchy (na rysunku wektor \vec{F}_{wyp_lanc}) są różne,

zatem siły działające na krzeselko nie mogą się równoważyć. Z tego wynika, że wartość siły wypadkowej sił działających na krzeselko karuzeli (na rysunku wektor \vec{F}_{wyp}) jest różna od zera.

Tak więc obserwator stojący na ziemi ruch krzeselka karuzeli z przyspieszeniem potrafi uzasadnić działaniem na krzeselko sił, których źródła może wskazać (Ziemia i łańcuchy). Dlatego obserwatora stojącego na ziemi można uznać za inercyjny układ odniesienia dla krzeselka kręcącej się karuzeli. Względem tego obserwatora kierunek siły, z jaką Ziemia przyciąga krzeselko się nie zmienia, natomiast kierunek siły wypadkowej \vec{F}_{wyp_lanc} sił, z jakimi łańcuchem działają na krzeselko zmienia się ciągle. Zatem także kierunek siły wypadkowej \vec{F}_{wyp} wszystkich sił działających na krzeselko ciągle się zmienia i dlatego wektor przyspieszenia, z jakim porusza się krzeselko w każdej chwili ma inny kierunek. (Jeżeli ruch krzeselka jest ruchem jednostajnym po okręgu to wektor

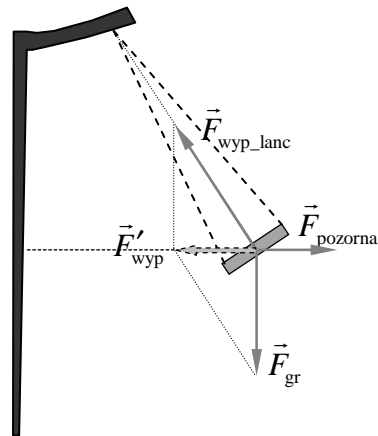


siły wypadkowej \vec{F}_{wyp} wszystkich sił działających na krzeselko jest w każdej chwili ruchu krzeselka skierowany wzdłuż promienia okręgu, będącego torem ruchu krzeselka, do środka tego okręgu).

Względem obserwatora siedzącego na karuzeli obserwowane krzeselko nie zmienia położenia, a więc względem niego krzeselko się nie porusza. Osoba siedząca na kręcącej się karuzeli widzi, że poruszają się drzewa, ziemia i to, co się na niej znajduje. Jakie siły działają na obserwowane krzeselko? Siła grawitacji, z jaką przyciąga je Ziemia (\vec{F}_{gr}) i siły, z jakimi działają na nie łańcuchy. Kierunek siły grawitacji \vec{F}_{gr} i kierunek siły



wypadkowej sił łańcuchów $\vec{F}_{\text{wyp_lanc}}$ są różne, zatem wymienione siły działające na krzeselko nie mogą się równoważyć. Względem obserwatora siedzącego na karuzeli krzeselko powinno więc poruszać się z przyspieszeniem, a nie spoczywać. Dlatego obserwator krzeselka znajdujący się na karuzeli stwierdza, że na krzeselko musi działać jeszcze przynajmniej jedna siła. Wprowadza więc do opisu tego, co dzieje się z krzeselkiem siłę \vec{F}_{pozorna} , która



równoważy siły, z jakimi Ziemia i łańcuchy działają na rozważane krzeselko. Jednak nie potrafi wskazać żadnego ciała, które mogłoby być źródłem tej siły i dlatego nazywa ją siłą pozorną. Obserwator siedzący na karuzeli stwierdza więc, że dla obserwowanego krzeselka nie jest inercjalnym układem odniesienia. (Wprowadzoną siłę obserwator na karuzeli nazywa siłą pozorną, ale nie „siłą odśrodkową”, bo względem niego krzeselko nie porusza się wokół żadnego środka, tylko jest nieruchome).

Obaj obserwatorzy krzeselka karuzeli (kręcącej się względem ziemi) wymieniają spostrzeżenia. Obserwator stojący na ziemi (inercjalny układ odniesienia dla krzeselka) stwierdza, że siła wypadkowa \vec{F}_{wyp} sił działających na krzeselko jest skierowana stale do środka okręgu, po którym względem niego krzeselko się porusza (przy upraszczającym założeniu, że ruch krzeselka jest ruchem jednostajnym po okręgu). Obserwator siedzący na karuzeli

(nieinercjalny układ odniesienia dla krzeselka) stwierdza, że siła wypadkowa \vec{F}'_{wyp} sił: siły, z jaką Ziemia przyciąga krzeselko i sił łańcuchów, ma taką samą wartość i kierunek jak siła wypadkowa \vec{F}_{wyp} sił działających na krzeselko wyznaczona przez obserwatora stojącego na ziemi. Wyciąga więc wniosek, że siła \vec{F}_{pozorna} , którą wprowadził do opisu ruchu krzeselka (ta siła, której źródła nie potrafi wskazać) ma kierunek i wartość, takie jak siła wypadkowa \vec{F}_{wyp} sił działających na krzeselko, którą wyznaczył obserwator stojący na ziemi, ale przeciwny do niej zwrot. A to oznacza, że przyspieszenie $\vec{a}_{\text{od siły pozornej}}$, jakie uzyskałoby krzeselko względem niego – nieinercjalnego układu odniesienia – w wyniku działania na krzeselko siły pozornej i przyspieszenie $\vec{a}_{\text{względem ziemi}}$, z jakim porusza się w tym samym czasie krzeselko względem obserwatora stojącego na ziemi – inercjalnego układu odniesienia – można opisać za pomocą równania $\vec{a}_{\text{względem ziemi}} = -\vec{a}_{\text{od siły pozornej}}$. Obserwator znajdujący się na karuzeli zauważa oczywiście, że przyspieszenie, z jakim on sam – nieinercjalny układ odniesienia dla krzeselka karuzeli – porusza się względem obserwatora stojącego na ziemi i przyspieszenie, z jakim krzeselko karuzeli porusza się względem obserwatora na ziemi są takie same. Przychodzi mu do głowy, że może przyczyną tego, iż potrzebuje siły pozornej \vec{F}_{pozorna} do opisu tego, co dzieje się z krzeselkiem karuzeli, ponieważ on sam – nieinercjalny układ odniesienia dla krzeselka – porusza się względem obserwatora na ziemi – inercjalnego układu odniesienia dla krzeselka – z przyspieszeniem.

Siły pozorne (bezwładności) oraz nieinercjalne układy odniesienia wywołują sporo kontrowersji. Na przykład R. Feynman w cytowanych już wykładach określił siły pozorne w następujący sposób: *...ponieważ układ (odniesienia) Placka ma przyspieszenie względem układu Jacka, w równaniach ruchu pojawia się dodatkowy wyraz ma i Placek musi skorygować swoje siły, aby obowiązywało nadal prawo Newtona. Innymi słowy, w układzie Placka pojawia się jakby tajemnicza nowa siła nieznanego pochodzenia, wynikająca oczywiście z użycia przez niego niewłaściwego układu współrzędnych. Jest to przykład siły pozornej; inne przykłady otrzymamy rozważając na przykład „obracające się” układy współrzędnych. Takim przykładem jest tzw. „siła odśrodkowa”. Obserwator w obracającym się układzie współrzędnych, na przykład w obracającej się kabinie, odkrywa tajemnicze siły, nie dające się wyjaśnić przez żadne znane nam źródła sił, które powodują odrzucenie przedmiotów ku ścianom kabiny. Siły te wynikają po prostu z tego, że obserwator nie używa newtonowskiego układu współrzędnych, który jest*

najprostszy.⁹ Oczywiście nie można na podstawie jednego cytatu przesądzać, jaki był stosunek R. Feynmana-nauczyciela do wprowadzania sił pozornych (sił bezwładności) do nauczania fizyki. Zagadnienia związane z układami nieinercyjnymi, siłami pozornymi (bezwładności) z pewnością nie są zagadnieniami łatwymi. Jednak bez ich omówienia i zrozumienia nie da się na przykład przejść do teorii względności. A ta wywołuje ciągle i niezmiennie zainteresowanie nie tylko fizyków. Poza tym powszechne jest bezwiedne „posługiwanie” się siłami bezwładności, często bez uświadamiania sobie tego i będące mieszanym opisem ruchu względem inercyjnego i nieinercyjnego układu odniesienia. Chyba każdy choć raz kiedyś jako objaśnienie faktu iż Księżyc nie spada na Ziemię usłyszał: „dzieje się tak, ponieważ siła odśrodkowa działająca na Księżyc równoważy siłę grawitacji, z jaką Ziemia przyciąga Księżyc”. (Uważny uczeń miałby z takim wyjaśnieniem spory kłopot, bo zgodnie z pierwszą zasadą dynamiki Newtona, której się nauczył, jeżeli siły działające na Księżyc się równoważą to Księżyc powinien być względem Ziemi albo nieruchomy, albo poruszać się ruchem prostoliniowym jednostajnym). Oczywiście można dyskutować, czy ruch krzeselka kręcącej się karuzeli można omówić z przeciętnym gimnazjalistą? (Choć dla czego zakładać, że miałby być on dla gimnazjalistów za trudny do zrozumienia? Zresztą opis takiego przykładu nie musi być aż tak rozbudowany, jak ten przedstawiony). Można zresztą posłużyć się przykładem dużo prostszym, np. rozważyć ruch kamienia leżącego przy drodze względem drzewa rosnącego przy tej drodze i względem ruszającego samochodu.

Wróćmy do analizy zasad dynamiki Newtona przedstawianych uczniom w szkołach. W podręcznikach przeznaczonych do gimnazjum druga zasada dynamiki Newtona jest formułowana w następujący sposób:

– *Pod działaniem stałej niezrównoważonej siły ciało porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym, z przyspieszeniem wprost proporcjonalnym do*

*wartości siły i odwrotnie proporcjonalnym do masy ciała: $a = \frac{F}{m}$.*¹⁰

– *Ciało o masie m , na które działa stała siła F , porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym z przyspieszeniem a , które można obliczyć ze*

*wzoru: $a = \frac{F}{m}$.*¹¹

– *Wartość przyspieszenia ciała o masie m jest wprost proporcjonalna do wartości wypadkowej siły $\vec{F}_{\text{wypadkowa}}$, działającej na to ciało, a jego kierunek i*

⁹ R. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands „Feynmana wykłady z fizyki”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001, t. 1.1., s. 197. Wyróżnienie (pogrubiona czcionka) zostało zrobione przez autora tego artykułu.

¹⁰ „Blżej fizyki”, cz. 1, WSiP, Warszawa 2009, podręcznik dla gimnazjum.

¹¹ „To jest fizyka”, Nowa Era, Warszawa 2009, podręcznik dla gimnazjum.

zwrot są zgodne z kierunkiem i zwrotem tej siły: $\vec{a} = \frac{\vec{F}_{\text{wypadkowa}}}{m}$. Jeśli na ciało działa stała siła, to jego przyspieszenie ma wartość odwrotnie proporcjonalną do masy.¹²

Oprócz wcześniej wymienionych wątpliwości, można mieć do tych sformułowań dodatkowe zastrzeżenia. Druga zasada dynamiki Newtona – prawo ruchu – nie powinna dotyczyć przypadku szczególnego, a za taki należy uznać sytuację, w której na ciało działa stała siła. Związek $\vec{a} = \frac{\vec{F}_{\text{wypadkowa}}}{m}$ jest prawdziwy zawsze, niezależnie od tego czy siła wypadkowa sił działających na ciało się zmienia czy też nie. Jest to związek między przyspieszeniem w danej chwili a siłą wypadkową sił działających na ciało w danej chwili.

Warto także zwrócić uwagę na występujące w jednym z powyższych cytatów sformułowanie „siła wypadkowa działająca na ciało”. Wydaje się, że jest ono źródłem problemu, jakim jest dla uczniów/studentów pojęcie siły wypadkowej oraz „wskazywanie” sił rzeczywiście działających na rozważane ciało. Wśród uczniów/studentów pierwszego roku fizyki poproszonych o wymienienie sił działających na przykład na ciało zsuwające się z równi pochyłej zawsze znajdzie się ktoś, kto wymieni „siłę zsuwającą”. Przyczyną funkcjonowania w świadomości uczniów „siły zsuwającej” działającej na ciało znajdujące się na równi pochyłej, czy „siły dośrodkowej” działającej na ciało poruszające po okręgu, może być właśnie powszechne stosowanie skrótu myślowego, jakim jest sformułowanie „siła wypadkowa działająca na ciało”. Taki skrót myślowy, jak wynika z zamieszczonych cytatów, jest wprowadzany nawet do drugiej zasady dynamiki. Trudno więc chyba dziwić się uczniom/studentom, że traktują siłę wypadkową sił działających na ciało, jak siłę realną, rzeczywiście działającą na ciało. Sformułowanie np. „siła wypadkowa sił działających na ciało” nie jest przecież znacząco dłuższe od „siły wypadkowej działającej na ciało”, a pomaga zwrócić uwagę przynajmniej niektórym uczniom/studentom, że siła wypadkowa jest pojęciem pomocniczym. (Zauważmy, że związanie zasad dynamiki z układami odniesienia i siłami, będącymi przejawem oddziaływań fizycznych, ułatwi uczniom omawianie konkretnych sytuacji fizycznych: nie umiemy wskazać źródła siły, która wydaje się potrzebna do opisu tego, co dzieje się z obserwowanym ciałem – w przytoczonym przykładzie „siły zsuwającej” – to szukamy albo innego układu odniesienia albo zastanawiamy się czy ta siła jest rzeczywiście potrzebna do opisanie ruchu ciała. Siła wypadkowa sił działających na ciało znajdujące się na równi – siły, z jaką Ziemia przyciąga ciało na równi i siły reakcji równi na

¹² „Świat fizyki”, cz. 2, ZamKor, Kraków 2009, podręcznik dla uczniów gimnazjum.

nacisk, jaki ciało na nią wywiera – może mieć kierunek równoległy do powierzchni równi, zatem nie potrzebujemy żadnych innych sił, żadnej „siły zsuwającej”, aby wytłumaczyć, dlaczego ciało się z równi zsuwa).

Jest jeszcze jeden niepokojący aspekt „gimnazjalnych zasad dynamiki”, mianowicie stwierdzenie, że *ciało pod działaniem stałej niezrównoważonej siły porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym*. Na pytanie, jakim ruchem jest rzut poziomy lub rzut ukośny uczniowie odpowiadają, że jest to ruch jednostajnie przyspieszony; rozstrzyga to przecież druga zasada dynamiki Newtona. Niektórzy z uczniów na dalszym etapie nauki dowiadują się, że ruch jednostajnie przyspieszony to *ruch, w którym przyspieszenie jest stałe, a jego zwrot jest zgodny ze zwrotem prędkości ciała*¹³. Zatem w gimnazjum rzuty poziomy i ukośny są ruchami jednostajnie przyspieszonymi, a w szkole ponadgimnazjalnej już nie, ponieważ w ruchach tych zwroty wektorów prędkości i przyspieszenia nie są takie same. Co odpowiedzieć uczniom, którzy na tę nieścisłość zwrócą uwagę? Że to tylko kwestia nomenklatury?

W podręcznikach fizyki dla szkół ponadgimnazjalnych w zasadach dynamiki Newtona pojęcie ruchu jednostajnie przyspieszonego się nie pojawia (można powiedzieć, że stracił na randze), pojawia się dopiero w ich omówieniu. W jednym z podręczników można przeczytać:

Jeśli siła wypadkowa jest różna od zera i **stała**, to ciało porusza się ruchem **prostoliniowym jednostajnie zmiennym**.

$$\vec{F}_w \neq \vec{0} \quad \text{i} \quad \vec{F}_w = \vec{\text{const}} \quad \Rightarrow \quad \vec{a} \neq \vec{0} \quad \text{i} \quad \vec{a} = \text{const}$$

Jeśli ponadto:

- zwrot siły wypadkowej (a więc i zwrot przyspieszenia) jest **zgodny ze zwrotem prędkości** ciała, to jego ruch jest ruchem jednostajnie **przyspieszonym**;
- zwrot siły wypadkowej (a więc i zwrot przyspieszenia) jest **przeciwny do zwrotu prędkości** ciała, to jego ruch jest ruchem jednostajnie **opóźnionym**.

Zakwestionować to, co jest napisane w powyższym cytacie jest stosunkowo łatwo: ruch poziomy (ukośny) nie jest ruchem prostoliniowym, a przecież na ciało poruszające się takim ruchem działa stała siła. Co powiedzieć uczniom, którzy zwrócą na tę „wątliwość” uwagę? Uważny czytelnik dojdzie także do wniosku, że znajdujące się w powyższym omówieniu drugiej zasady dynamiki Newtona wyrażenie „ruch prostoliniowy jednostajnie zmienny” jest pleonazmem. Jeżeli za definicję ruchu jednostajnie przyspieszonego przyjąć, że jest to „ruch, w którym przyspieszenie jest stałe, a jego zwrot jest zgodny ze

¹³ „Z fizyką w przyszłość 1” s. 35, ZamKor, Kraków 2012; podręcznik dla szkół ponadgimnazjalnych zakres rozszerzony.

zwrotem prędkości ciała” to oznacza to, że ruch jednostajnie przyspieszony jest z definicji ruchem prostoliniowym. Nawet z zamieszczonych cytatów wynika, że według jednych źródeł ruch jednostajnie przyspieszony to ruch, w którym przyspieszenie ciała jest stałe zarówno co do wartości, jak i kierunku, według innych – to ruch, w którym wektor przyspieszenia ma stałą wartość i kierunek i jest równoległy do wektora prędkości (czyli jest to ruch prostoliniowy). Dla większości uczniów/studentów ruch jednostajnie przyspieszony oznacza ruch, w którym wartość przyspieszenia ciała jest stała. Prawdopodobnie jest tak przez skojarzenie z ruchem jednostajnym, czyli z ruchem, w którym wartość prędkości jest stała. Zresztą są źródła, w których tak właśnie ruch jednostajnie zmienny jest definiowany, czyli że jest to ruch, w którym wartość przyspieszenia ma stałą wartość¹⁴. Ale póki nie ma zgodności wśród fizyków, co do tego, jaki ruch jest ruchem jednostajnie zmiennym to lepiej nie wprowadzać żadnych klasyfikacji. Można przecież używać określeń „ruch z przyspieszeniem o stałej wartości i stałym kierunku”, „ruch z przyspieszeniem o stałej wartości, ale zmieniającym się kierunku”. (Powyższe definicje ruchu jednostajnie zmiennego są kłopotliwe także ze względu na „wzór na drogę” w tym ruchu. Przy powyższych definicjach wzór $s(t) = v_0t + 1/2 \cdot at^2$ jest poprawny tylko w przypadku ruchu prostoliniowego. Kłopotu ze „wzorem na drogę” nie ma, jeśli przyjmie się, iż ruch jednostajnie przyspieszony to ruch, w którym stałą wartość ma przyspieszenie styczne ciała¹⁵).

Źródłem budzących wątpliwości sformułowań i omówień zasad dynamiki Newtona jest najprawdopodobniej chęć ułatwienia uczniom zrozumienia treści tych zasad, chęć pokazania „prostych” wniosków z nich wynikających. A zasady dynamiki Newtona są zagadnieniami złożonymi, treści w nich zawarte są złożone. Dlatego ich zrozumienie nie przychodzi łatwo, zwłaszcza tym, którzy są na początkowym etapie poznawania fizyki. Właśnie dlatego powinniśmy starać się przedstawiać zasady dynamiki Newtona jak najbardziej rzetelnie, bez zbyteknych, często zupełnie niepotrzebnych uproszczeń. A jeżeli decydujemy się na uproszczenia to nie powinny one prowadzić do tego, że zastosowanie zasad dynamiki Newtona przy omawianiu konkretnych sytuacji przysparza istotnych problemów, czy tego, że sama treść zasad budzi poważne wątpliwości. To, co nam nauczycielom fizyki wydaje się uproszczeniem, dla uczniów może wcale uproszczeniem nie być. Może być przeszkodą, która nie pozwoli przebrnąć przez początkową fazę „oswajania” zasad dynamiki Newtona i fizyki w ogóle, zniechęcić do fizyki na długo lub co gorsza na zawsze. Uczniowie będą się uczyć uproszczonych zasad dynamiki na pamięć i jedni stwierdzą, że „fizyka

¹⁴ A.H. Piekara „Mechanika ogólna”, PWN, Warszawa 1986.

¹⁵ A. Januszajtis „Fizyka dla politechnik. Tom I. Cząstki”, PWN, Warszawa 1977; „Słownik fizyczny”, Wiedza Powszechna, Warszawa 1984; A.K. Wróblewski, J.A. Zakrzewski „Wstęp do fizyki”, tom 1, PWN, Warszawa 1984.

jest nielogiczna”, inni stwierdzą, że nie ma sensu tracić na nie czasu. A my będziemy się martwić, że uczniowie nie lubią fizyki, choć uczniowie mają dużo poważniejszy problem: oni fizyki nie rozumieją. Zresztą zasady dynamiki Newtona są tylko jednym z problemów, z jakimi uczniowie muszą się mierzyć czytając podręczniki.