



W jaki sposób opisać ruch ciał w układach inercjalnych i nieinercjalnych?

- [Wprowadzenie](#)
- [Przeczytaj](#)
- [Film samouczek](#)
- [Sprawdź się](#)
- [Dla nauczyciela](#)



W jaki sposób opisać ruch ciał w układach inercjalnych i nieinercjalnych?

Źródło: dostępny w internecie: <https://pixabay.com/pl/photos/kettenkarusell-karuzela-oktoberfest-4500762/> [dostęp 20.08.2022], domena publiczna.

Czy to nie ciekawe?

W układach nieinercjalnych (poruszających się z przyspieszeniem względem dowolnego układu inercjalnego) do opisu ruchu wygodnie jest stosować pojęcie siły bezwładności. Siła ta nie pojawia się w układach inercjalnych. Wydawać by się zatem mogło, że opis ruchu w układzie nieinercjalnym będzie trudniejszy – właśnie ze względu na dodatkową siłę bezwładności. Czy tak jest w istocie? Sprawdźmy to w tym e-materiale!

Twoje cele

- wskażesz różnice w opisie ruchu pomiędzy układami inercjalnymi i nieinercjalnymi,
- poznasz i zinterpretujesz wzór opisujący siłę bezwładności,
- uzasadnisz celowość wykorzystania siły bezwładności do opisu ruchu,
- zastosujesz opis zawierający siły bezwładności.

Przeczytaj

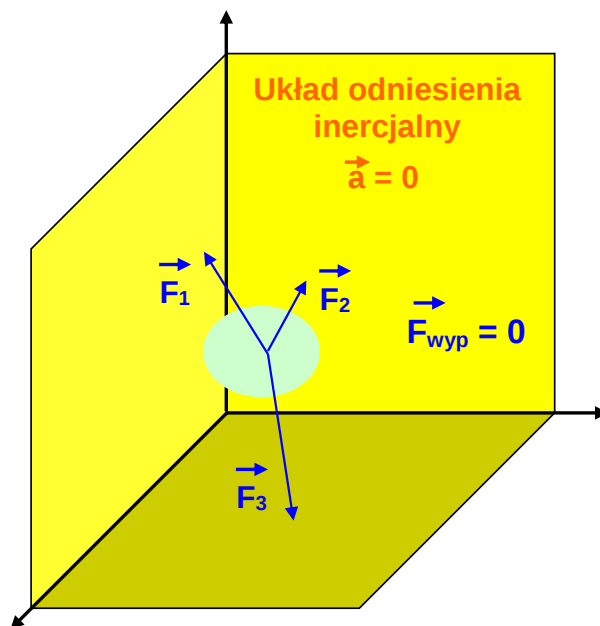
Warto przeczytać

Inercjalny układ odniesienia.

Zacznijmy od przypomnienia, w jaki sposób rozstrzygamy, czy układ odniesienia jest inercjalny czy nieinercjalny. Rozróżnienie to jest treścią I zasady dynamiki Newtona. Często ujmujemy to skrótowo:

Definicja: Inercjalny układ odniesienia

Układ odniesienia jest inercjalny, jeśli obserwowany w tym układzie ruch ciał izolowanych jest zgodny z I zasadą dynamiki Newtona.



Rys. 1. Ilustracja definicji układu inercjalnego. Gdy ciało, na które działa zerowa siła wypadkowa, porusza się bez przyspieszenia, to układ odniesienia, w którym obserwujemy to ciało, jest inercjalny.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Musimy przy tym doprecyzować, że mamy na myśli nieco uproszczoną wersję tej zasady:

Ciało izolowane porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym lub pozostaje w spoczynku.

Dla zainteresowanych

Bez stosowania skrótów i uproszczeń możemy ująć problem układów inercjalnych jednym stwierdzeniem, przytaczając I zasadę dynamiki Newtona w pełnej wersji:

Istnieją układy odniesienia (nazywane inercjalnymi), w których dowolne ciało izolowane porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.

Polecenie 1

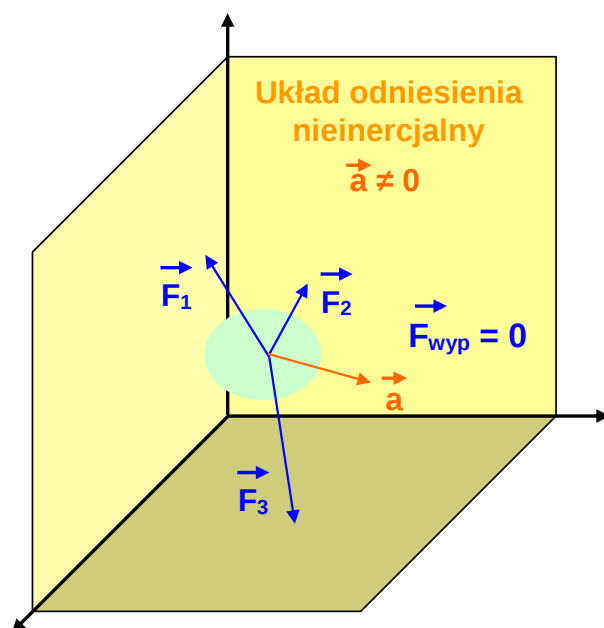
Nie ma potrzeby dodawania formułki „lub pozostaje w spoczynku” – zapisz krótkie uzasadnienie tego faktu.

Przy takim podejściu I zasada dynamiki jest postulatem istnienia układów inercjalnych. Takie postulaty spełniają w fizyce rolę podobną do roli [aksjomatów](#) w matematyce.

Tak więc stwierdzenie inercjalnego charakteru układu odniesienia wymaga **eksperymentalnego** zbadania, czy ruch [ciał izolowanych](#), opisywany w tym układzie, jest jednostajny prostoliniowy. Gdy rozstrzygnięcie jest pozytywne, układ ten uznajemy za inercjalny.

Nieinercjalny układ odniesienia

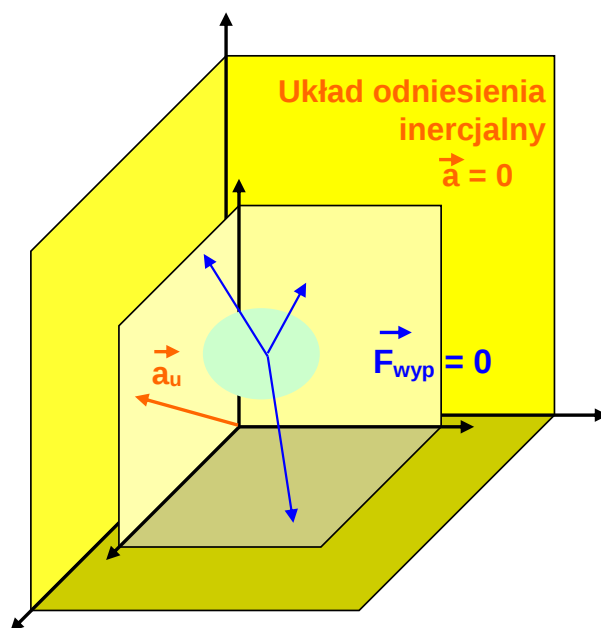
A co jeśli eksperymentalne badanie ruchu [ciała izolowanego](#) wykaże, że ruch ten jest niejednostajny lub krzywoliniowy? Inaczej: jeśli wykryjemy, że dowolne takie ciało porusza się z niezerowym przyspieszeniem $\vec{a}$? Przyjmujemy wtedy (Rys. 2.), że układ odniesienia, w którym przeprowadzono takie badanie, jest układem nieinercjalnym.



Rys. 2. Ilustracja definicji układu nieinercyjnego. Gdy pomimo faktu, że na ciało działa zerowa siła wypadkowa, porusza się ono z niezerowym przyspieszeniem, to układ odniesienia, w którym obserwujemy to ciało jest nieinercyjny.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

W często stosowanym uproszczeniu możemy powiedzieć, że układ nieinercyjny to taki, który względem dowolnego układu **inercyjnego** porusza się ruchem niejednostajnym lub krzywoliniowym. Innymi słowy: można określić niezerowe przyspieszenie $\vec{a}_u$, z jakim układ ten porusza się względem dowolnego układu inercyjnego (Rys. 3.).



Rys. 3. Wybrany nieinercyjny układ odniesienia porusza się względem dowolnego układu inercyjnego z tym samym **przyspieszeniem** $\vec{a}_u$.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Przyspieszenie $\vec{a}_u$ jest przeciwne do przyspieszenia $\vec{a}$, z którym porusza się każde ciało izolowane, obserwowane w wybranym układzie nieinercyjnym:

$$\vec{a}_u = -\vec{a} .$$

II zasada dynamiki Newtona w nieinercyjnym układzie odniesienia

Czy można stosować II zasadę dynamiki w nieinercyjnym układzie odniesienia? Tak. Musimy jednak w jakiś sposób uwzględnić niejednostajny charakter ruchu tego układu. Przyjęto następujące postępowanie. Przy opisie ruchu ciała o masie m w takim układzie do sił działających na to ciało dodajemy siłę pozorną, zwaną siłą bezwładności $\vec{F}_b$ powiązaną z masą rozpatrywanego ciała i przyspieszeniem układu:

$$\vec{F}_b = -m\vec{a}_u .$$

Jeśli na ciało działają realne siły, to ich wypadkowa $\vec{F}_{\text{wyp}}$ jest taka sama w każdym układzie odniesienia - inercyjnym bądź nieinercyjnym. W pierwszym przypadku ruch tego ciała opisujemy za pomocą równania

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{\text{wyp}}}{m} .$$

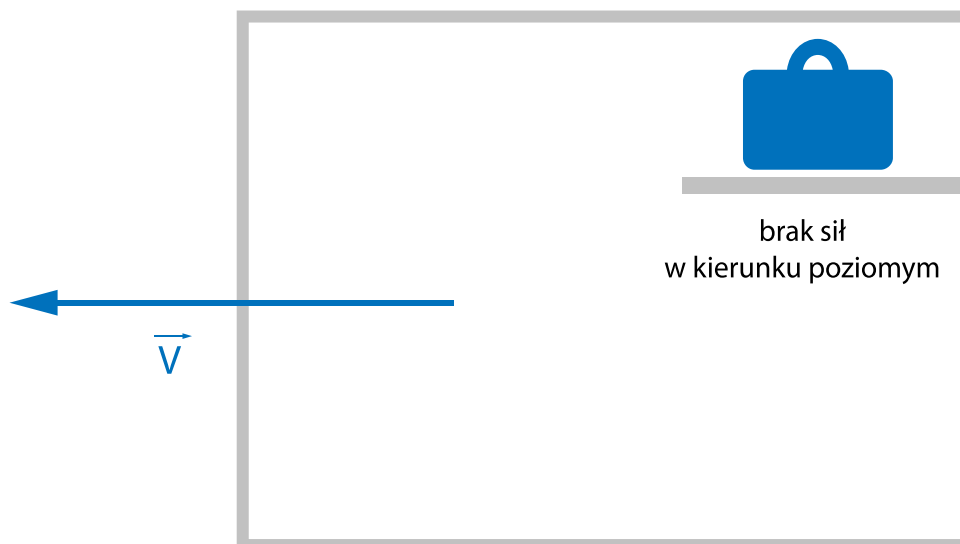
W przypadku układu nieinercyjnego II zasada dynamiki uwzględnia pozorną siłę bezwładności i przyjmuje postać

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}_{\text{wyp}} + \vec{F}_b}{m} = \frac{\vec{F}_{\text{wyp}} - m\vec{a}_u}{m}.$$

Więcej informacji na temat sił bezwładności, w szczególności z czego wynika ich obecność w układach nieinercyjnych, znajdziesz w e-materiale „*Co to jest siła bezwładności i jakie są jej cechy?*”.

Przykład

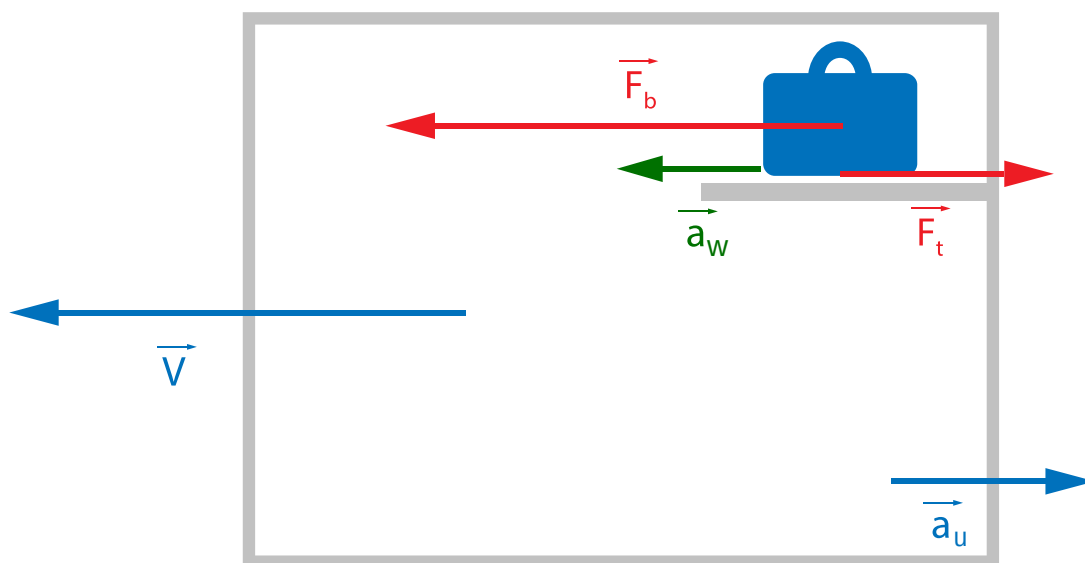
Wyobraź sobie, że jedziesz pociągiem, a w przedziale, na półce naprzeciw Ciebie, położona jest ciężka waliza. Gdy pociąg porusza się ze stałą prędkością, to związany z nim układ jest układem inercyjnym. Na walizę w kierunku pionowym działają równoważące się siły ciężkości i sprężystości podłoża, a w kierunku poziomym – nie działa żadna siła (Rys. 4.). Waliza jest więc ciałem izolowanym i pozostaje w spoczynku względem pociągu.



Rys. 4. Jadący ze stałą prędkością pociąg jest układem inercyjnym. Na walizkę nie działa żadna siła w kierunku poziomym. Działające pionowo siły ciężkości i reakcji podłoża (pominięte na rysunku) równoważą się.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Gdy pociąg gwałtownie zahamuje, może zdarzyć się, że waliza spadnie z półki. Dlaczego tak się dzieje? Hamujący pociąg nie jest już układem inercyjnym – stał się układem nieinercyjnym. W tym układzie pojawia się siła bezwładności. To ona „ciągnie” walizę i nierzadko zsuwa ją z półki! Tak jak poprzednio, działające na walizę siły przedstawmy graficznie (Rys. 5.), z pominięciem sił działających w kierunku pionowym:



Rys. 5. W hamującym pociągu, stanowiącym układ nieinercyjny, na walizkę w kierunku poziomym działają siła bezwładności oraz siła tarcia.

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0. <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.pl>.

Pociąg porusza się w lewo, z prędkością $\vec{v}$, której wartość maleje. Oznacza to, że podczas hamowania wektor przyspieszenia pociągu $\vec{a}_u$ skierowany jest w prawo. Oba te wektory przedstawiamy w wybranym **inercyjnym** układzie odniesienia, na przykład związanym z torowiskiem.

Znak minus we wzorze $\vec{F}_b = -m\vec{a}$ oznacza, że siła bezwładności skierowana będzie przeciwnie do przyspieszenia, czyli w lewo. Analogicznie, przy ruszaniu pociągu z miejsca w lewą stronę, siła bezwładności będzie popychać walizę w kierunku ściany.

Wprawienie w ruch walizy powoduje pojawienie się siły tarcia kinetycznego $\vec{F}_t$ o zwrocie przeciwnym do siły bezwładności. Tak więc przyspieszenie walizy $\vec{a}_w$ –

względem pociągu - wyznaczymy z równania

$$\vec{a}_w = \frac{\vec{F}_{\text{wyp}} + \vec{F}_b}{m} = \frac{\vec{F}_t + \vec{F}_b}{m}.$$

Uwzględniliśmy w nim, że wypadkowa realnych sił działających na walizę jest równa sile tarcia. Jeżeli dodatkowo uwzględnimy, że wartość siły tarcia jest mniejsza od wartości siły bezwładności, oraz że mają one przeciwne zwroty, to wartość przyspieszenia walizy da się wyrazić jako

$$a_w = \frac{F_b - F_t}{m}.$$

Ściśle rzecz ujmując, stwierdzamy, że waliza będzie poruszać się prostoliniowo z takim przyspieszeniem do chwili, gdy jej środek masy przekroczy brzeg półki. Wtedy waliza zacznie obracać i spadnie z półki; ten nowy ruch wymagałby oddzielnej analizy.

Więcej przykładów opisu ruchów w układach nieinercjalnych znajdziesz w e-materiale „Analiza ruchu ciał w układach nieinercjalnych”.

Słowniczek

siła wypadkowa

(ang.: *net force*) suma wszystkich sił działających na ciało. Jest równa zero, gdy na ciało nie działają żadne siły lub wszystkie siły równoważą się, a różna od zera, gdy nie zachodzi równowaga sił. Niezerowa siła wypadkowa, zgodnie z II zasadą dynamiki Newtona, powoduje, że ciało - obserwowane w układzie inercjalnym - porusza się z przyspieszeniem.

siła pozorna

(ang.: *fictitious force*) ogólne określenie sił mających następujące cechy:

- 1) występują wyłącznie w nieinercjalnych układach odniesienia,
- 2) nie wynikają z podstawowych oddziaływań występujących w przyrodzie, tj. jądrowego, elektromagnetycznego, słabego bądź grawitacyjnego,
- 3) nie spełniają III zasady dynamiki Newtona. Siłę bezwładności działającej na wybrane ciało nie odpowiada działanie tego ciała na jakiekolwiek inne.

aksjomat

(ang: *axiom, postulate*) zdanie (założenie) przyjmowane za prawdziwe bez konieczności przeprowadzania dowodu. Inaczej: pewnik. Z greckiego: *axios* – godny (zaufania), cenny.

Ciało izolowane

Termin pomocniczy, używany tutaj dla zwięzłego określenia ciała, na które nie działa żadne inne ciało lub działania wszystkich innych ciał się równoważą.

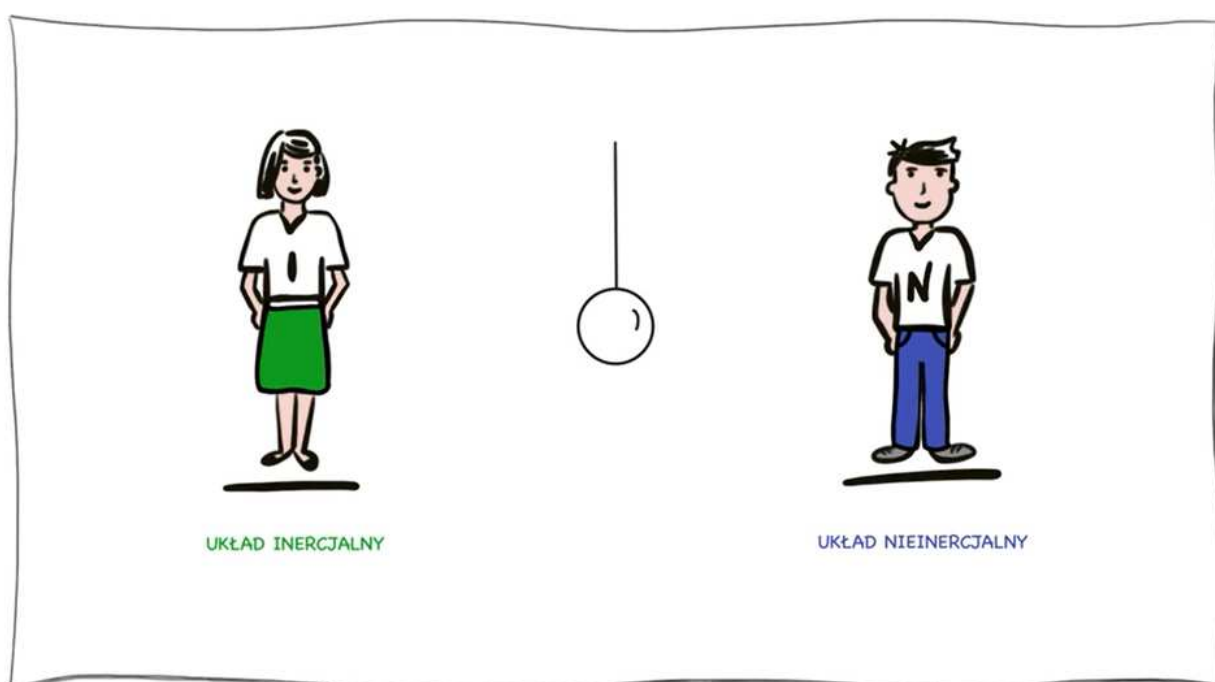
Film samouczek

W jaki sposób opisać ruch ciał w układach inercjalnych i nieinercjalnych?

Polecenie 1

Najprostszy przypadek ruchu po okręgu - wirujący kamień uwiązany na sznurku - można opisywać w różnych układach odniesienia. Intuicyjnie stosujemy układ inercjalny, związany z osobą trzymającą drugi koniec sznurka. Czy można jednak związać układ odniesienia z samym kamieniem? Odpowiedź jest twierdząca. Jak to zrobić? Czym różnią się te opisy? Obejrzyj uważnie samouczek, poznaj Inez i Niemira i zobacz, co mają Ci do powiedzenia na ten temat.

Zacznij może od rozszyfrowania ich imion - mają one pewien związek z tematem.



Film dostępny pod adresem </preview/resource/R1jmO2sJMZN1A>

Źródło: Politechnika Warszawska, Wydział Fizyki, licencja: CC BY 4.0.

Zapoznaj się z alternatywną ścieżką lektorską.

Polecenie 2

Masz za zadanie obliczyć siłę napięcia nici zmierzoną przez lnez w sytuacji, gdy sznurek ma długość $L = 40$ cm, piłeczka ma masę $m = 50$ g i wykonuje $n = 2$ obroty na sekundę.

Ustaw w logicznej kolejności równania, które doprowadzą Cię do wyniku.

$$F_N = 4\pi^2 \cdot 0,05 \cdot 2^2 \cdot 0,4 \text{ N}$$



$$F_N = F_d$$



$$F_N \approx 3,16 \text{ N}$$



$$F_N = \frac{mv^2}{r}, \quad v = \omega r$$



$$F_N = m\omega^2 r, \quad \omega = 2\pi f$$



$$F_N = m \cdot 4\pi^2 \cdot f^2 \cdot r$$



Polecenie 3

Jaką metodą Niemir mógłby zmierzyć wartość siły bezwładności $\vec{F}_b$, działającej na piłkę w jego układzie odniesienia? Opisz pokrótce taką metodę i rozstrzygnij, czy jest to metoda bezpośrednia czy pośrednia.

Sprawdź się

Pokaż ćwiczenia:   

Ćwiczenie 1



Samochód jadący po prostej drodze z ustaloną prędkością zaczyna skręcać, zachowując niezmienną szybkość. Wskaż zdania poprawne:

☐

W układzie odniesienia związanym z samochodem na kierowcę działa siła bezwładności skierowana na zewnątrz zakrętu.

☐

Na kierowcę samochodu w układzie odniesienia związanym z samochodem działa siła bezwładności skierowana do środka zakrętu.

☐

Zewnętrzny obserwator w inercjalnym układzie odniesienia widzi, że samochód skręca pod wpływem działającej na niego siły dośrodkowej.

☐

Zewnętrzny obserwator w inercjalnym układzie odniesienia widzi, że na samochód działa siła odśrodkowa.

☐

W układzie odniesienia związanym z samochodem siły działające na kierowcę nie równoważą się.

Ćwiczenie 2



Samochód jadący jednostajnie po prostej drodze zaczyna gwałtownie hamować. Kierowca samochodu ma niezapięte pasy. Wskaż poprawne zdania.

☐

W inercjalnym układzie odniesienia związanym z zewnętrznym obserwatorem kierowca pozostaje w spoczynku.

☐

W układzie odniesienia samochodu kierowca zostanie wyciągnięty z fotela do przodu.

☐

Obserwator związany z zewnętrznym, inercjalnym układem odniesienia opíše ruch kierowcy do przodu jako związany z istnieniem siły bezwładności.

☐

W układzie odniesienia związanym z samochodem na kierowcę działa siła bezwładności.

Ćwiczenie 3



Motocykl przyspiesza pod wpływem działającej na niego siły wypadkowej $\vec{F}_w$. Wskaż poprawne relacje, opisujące siłę bezwładności $\vec{F}_b$ działającą na kierowcę.

☐

$\vec{F}_b$ jest skierowana zgodnie z $\vec{F}_w$ i ma większą od niej wartość.

☐

$\vec{F}_b$ jest skierowana zgodnie z $\vec{F}_w$ i ma taką samą wartość.

☐

$\vec{F}_b$ jest skierowana przeciwnie do $\vec{F}_w$ i ma mniejszą od niej wartość.

☐

$\vec{F}_b$ jest skierowana przeciwnie do $\vec{F}_w$ i ma taką samą wartość.

Ćwiczenie 4



Określ maksymalną prędkość, z jaką samochód może wjechać w zakręt o promieniu $r = 250$ m. Jest deszczowy dzień i współczynnik tarcia kół o asfalt wynosi $f = 0,1$. Przyjmij, że przyspieszenie ziemskie wynosi 10 m/s^2 i wskaż najlepiej przybliżoną wartość.

☐ $v_{\max} = 90 \text{ km/h}$

☐ $v_{\max} = 70 \text{ km/h}$

☐ $v_{\max} = 60 \text{ km/h}$

☐ nie da się tej prędkości obliczyć, gdyż zależy ona od masy samochodu, której nie podano.

Ćwiczenie 5



Na klocek o masie $M = 2$ kg działają dwie siły o jednakowych kierunkach i przeciwnych zwrotach. Ich wartości to $F_1 = 20$ N oraz $F_2 = 10$ N. Na klocek leży moneta o masie $m = 5$ g. Uzupełnij zdanie:

W układzie odniesienia związanym z klockiem na monetę działa siła bezwładności skierowana jak , o wartości około N.

F_1 75 25 0,025 siła grawitacji
 F_2 0,075

Ćwiczenie 6



Dwie kulki o masach $m_1 = 500$ g i $m_2 = 750$ g umieszczone są na końcach pręta wirującego z prędkością kątową $\omega = 3$ rad/s. Kulki znajdują się w odległościach $r_1 = 5$ cm i $r_2 = 8$ cm od osi obrotu pręta.

Wskaż związek między wartościami sił bezwładności działających na kulki.

$$\frac{F_{b1}}{F_{b2}} = \boxed{}$$

$\frac{16}{15}$

$\frac{12}{5}$

$\frac{15}{16}$

$\frac{5}{12}$

Ćwiczenie 7



Przypomnij sobie przykład opisany w części „Przeczytaj”, dotyczący walizki w hamującym pociągu. Czy może się zdarzyć, że podczas hamowania pociągu walizka na półce nie poruszy się? Czy sprzyjałoby temu hamowanie łagodne czy szczególnie gwałtowne? Zapisz swoje rozstrzygnięcie, wraz z uzasadnieniem i porównaj z wyjaśnieniem wzorcowym.

Ćwiczenie 8



Wykonaj ćwiczenie 7. Następnie przeanalizuj pomocniczą definicję ciała izolowanego, podaną w słowniczku. W przykładzie stwierdzono, że gdy pociąg porusza się jednostajnie po linii prostej, waliza jest ciałem izolowanym (w myśl tej definicji). Rozstrzygnij, czy waliza jest ciałem izolowanym, gdy pociąg hamuje. Rozpatrz dwa przypadki:

1. Gdy pociąg hamuje „łagodnie” i nie dochodzi do zerwania tarcia statycznego.
2. Gdy pociąg hamuje „gwałtownie” i waliza przemieszcza się po półce.

Zapisz swoje rozstrzygnięcia, wraz z uzasadnieniem i porównaj z wyjaśnieniem wzorcowym.

straszliwe:

Dla nauczyciela

Imię i nazwisko autora:	Przemysław Michalski
Przedmiot:	Fizyka
Temat zajęć:	Układy inercjalne i nieinercjalne - niezły kosmos!
Grupa docelowa:	III etap edukacyjny, liceum, technikum, zakres podstawowy i rozszerzony

Podstawa programowa:	Cele kształcenia - wymagania ogólne Wykorzystanie pojęć i wielkości fizycznych do opisu zjawisk oraz wskazywanie ich przykładów w otaczającej rzeczywistości. II. Rozwiązywanie problemów z wykorzystaniem praw i zależności fizycznych. Zakres podstawowy Treści nauczania - wymagania szczegółowe I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem; 5) rozróżnia wielkości wektorowe i skalarne; 6) tworzy teksty, tabele, diagramy lub wykresy, rysunki schematyczne lub blokowe dla zilustrowania zjawisk bądź problemu; właściwie skaluje, oznacza i dobiera zakresy osi; II. Mechanika. Uczeń: 9) rozróżnia układy inercjalne i nieinercjalne; posługuje się pojęciem siły bezwładności; Zakres rozszerzony Treści nauczania - wymagania szczegółowe I. Wymagania przekrojowe. Uczeń: 4) przeprowadza obliczenia liczbowe posługując się kalkulatorem; 5) rozróżnia wielkości wektorowe i skalarne, wykonuje graficznie działania na wektorach (dodawanie, odejmowanie, rozkładanie na składowe); 6) tworzy teksty, tabele, diagramy lub wykresy, rysunki schematyczne lub blokowe dla zilustrowania zjawisk bądź problemu; właściwie skaluje, oznacza i dobiera zakresy osi; II. Mechanika. Uczeń: 18) rozróżnia układy inercjalne i nieinercjalne; omawia różnice między opisem ruchu ciał w układach inercjalnych i nieinercjalnych; posługuje się pojęciem siły bezwładności.
------------------------------------	---

Kształtowane kompetencje kluczowe:	Zalecenie Parlamentu Europejskiego i Rady UE z 2018 r: • kompetencje w zakresie rozumienia i tworzenia informacji, • kompetencje matematyczne oraz kompetencje w zakresie nauk przyrodniczych, technologii i inżynierii, • kompetencje cyfrowe, • kompetencje osobiste, społeczne i w zakresie umiejętności uczenia się.
Cele operacyjne:	Uczeń: 1. opisuje przykładowe efekty związane z działaniem sił bezwładności w odniesieniu do przestrzeni kosmicznej, 2. zapisuje bilans sił działających na ciała w układach inercjalnych oraz nieinercjalnych, 3. stosuje siły bezwładności w rozwiązywaniu zadań problemowych i rachunkowych, 4. wyprowadza abstrakcyjne relacje w przykładowych zjawiskach związanych z działaniem sił bezwładności.
Strategie nauczania:	flipped classroom
Metody nauczania:	- pogadanka, - pokaz multimedialny, - ćwiczenia rachunkowe.
Formy zajęć:	praca indywidualna, rozwiązywanie zadań przy tablicy
Środki dydaktyczne:	komputer, projektor
Materiały pomocnicze:	zdjęcia w formie cyfrowej do wyświetlenia
PRZEBIEG LEKCJI	
Faza wprowadzająca:	

Zaciekawienie:

- Nauczyciel wprowadza tematykę i objaśnia nazwę zajęć – „niezły kosmos” odnosi się do analizy ruchów w iuo (inercyjnym układzie odniesienia) oraz niuo (nieinercyjnym...) poprzez rozwiązywanie zadań opartych na tematyce kosmicznej.
- Nauczyciel wskazuje na względność opisu ruchu – np. mówiąc, że te same zjawiska oglądane z różnych układów odniesienia będą opisywane w różny sposób. Inny sposób opisu wykorzysta inercjalny obserwator (np. kosmonauta swobodnie unoszący się w przestrzeni), a inny – obserwator nieinercjalny (np. kosmonauta znajdujący się w przyspieszającej rakiecie).

Faza realizacyjna:

Lekcja ma (głównie, lecz nie tylko!) charakter ćwiczeniowy. Konstruowanie i rekonstruowanie wiedzy uczniów polega na rozwiązywaniu zadań rachunkowych. Każde zadanie powinna poprzedzić dyskusja z uczniami – z jakim obiektem należy, ich zdaniem, związać układ odniesienia, aby najsprawniej rozwiązać dane zagadnienie. Rozwiązanie zadania powinno jednak uwzględniać narysowanie rozkładu sił wywołujących ruch (oraz ich nazwanie), zarówno w iuo jak i niuo (dla porównania i wskazania różnic w opisie).

Przed zadaniem 1 nauczyciel odwołuje się do jednego z przypadków opisanych w filmie-samouczku: kulki wirującej na nitce. Nauczyciel pyta uczniów, jakie zjawiska w kosmosie są „analogiczne” do opisanego przypadku (np. ruch planet wokół Słońca, ruch sztucznego satelity wokół Ziemi). Po tym wprowadzeniu, nauczyciel przechodzi do rozwiązywania zadań.

Zadanie 1:

Satelita geostacjonarny jest rodzajem satelity, który porusza się wzdłuż ziemskiego równika, z taką samą prędkością kątową jak nasza planeta. W wyniku, wydaje się, że jest on stale „zawieszony” nad ustalonym punktem nad powierzchnią Ziemi. Nazwij i narysuj siły działające na satelitę w inercyjnym (zewnętrznym) układzie odniesienia oraz w układzie nieinercyjnym, związanym z ciałami znajdującymi się wewnątrz satelity.

Uwaga: w zależności od poziomu klasy, można samodzielnie wyprowadzić wzór na promień orbity satelity i na tej podstawie wartości siły grawitacji (dośrodkowej)/odśrodkowej. Dla klas słabszych/o profilu podstawowym można ograniczyć się do treści zadania.

Przed zadaniem 2, nauczyciel zauważa, że siły bezwładności mogą być spowodowane nie tylko przyspieszeniem rakiety bądź satelity związanym jedynie z ich ruchem obrotowym, lecz w ogólności – z każdym rodzajem przyspieszenia. Nauczyciel powinien zauważyć, że wariant zadania bez dodatkowego przyspieszenia jest tożsamy

z przypadkiem analizowanym w zadaniu 1.

Zadanie 2: Rakieta o masie $M = 500$ ton krąży wokół Ziemi w ustalonej odległości $R = 600$ km od jej powierzchni. Odległość R jest na tyle duża, że wpływ tarcia o atmosferę można zaniedbać i rakieta porusza się jedynie pod wpływem siły grawitacji. W pewnym momencie, kapitan włącza silniki rakiety zapewniające siłę ciągu $F_c = 500$ kN. Zakładając, że odległość między rakieta a Ziemią się nie zmienia (wektor prędkości rakiety jest nadal styczny do powierzchni planety), wyznacz kąt pomiędzy linią łączącą rakieta ze środkiem Ziemi, a wektorem siły bezwładności działającej na kapitana rakiety. Zaniedbaj zmianę masy rakiety związaną ze spalaniem paliwa. Dane są: promień i masa Ziemi oraz stała grawitacyjna G .

Uwaga: w trudniejszym wariantcie można rozwiązać zadanie dla dowolnej F_c i otrzymać zależność kąta od F_c .

Przed zadaniem 3, nauczyciel prezentuje i porównuje ze sobą dwa zdjęcia (najlepiej obok siebie/na jednym slajdzie): Międzynarodowej Stacji Kosmicznej (ISS) oraz koncepcyjnego statku Naulitius X (konceptcja autorstwa NASA). Obrazy do znalezienia w Google/Wikipedii. Nauczyciel zauważa, że projekt Naulitiusa różni się od ISS obecnością pierścienia i prosi uczniów o pomysły – do czego może on służyć. Wspólnie z uczniami dąży do poprawnej odpowiedzi: pierścień może się obracać. Ze względu na przyspieszenie odśrodkowe (w układzie odniesienia związanym z kosmonautą wewnątrz pierścienia), możliwe jest „zasymulowanie” pola grawitacyjnego. Miałoby to pozytywny wpływ na zdrowie kosmonautów w porównaniu z sytuacją, gdy znajdują się oni w stanie nieważkości.

Zadanie 3: Promień pierścienia stacji kosmicznej Naulitius wynosi R . Załóżmy, że laboratoria stacji znajdują się w korytarzach w odległości połowy długości promienia pierścienia od jego środka. Wyznacz wzór opisujący z jaką prędkością liniową powinny poruszać się punkty stacji znajdujące się w tym miejscu, aby naukowcy pracujący w laboratoriach odczuwali przyspieszenie równe 75% przyspieszenia ziemskiego. Oblicz wartość tego przyspieszenia dla $R = 500$ m.

Uwaga: w klasach bardziej zaawansowanych można wyprowadzić ogólny wzór dla dowolnych wartości odległości od środka i ułamka przyspieszenia grawitacyjnego (np. ...laboratoria znajdują się w odległości kR od środka pierścienia ($0 < k < 1$)..., ...odczuwali przyspieszenie n razy mniejsze/większe od przyspieszenia ziemskiego...).

Faza podsumowująca:

W ramach podsumowania nauczyciel prosi uczniów o ponowne wymienienie kilku zjawisk, które wywołane są obecnością przyspieszenia, w odniesieniu do ruchu w kosmosie; czas na pytania uczniów i wyjaśnianie wątpliwości.

Praca domowa:

Dodatkowe poszerzenie wiedzy o efekty związane z bezwładnością w układach wirujących: siła Coriolisa. Aby wykonać doświadczenie, uczniowie muszą mieć dostęp do pomocy dydaktycznych w postaci wirującego wokół własnej osi dysku.

Przeprowadź doświadczenie, które zobrazuje, jak różni się ruch danego ciała obserwowany w układzie inercyjnym i nieinercyjnym. Potrzebne będą Ci: telefon komórkowy lub inne urządzenie do nagrywania filmów, piłeczka pingpongowa oraz wirująca platforma. Doświadczenie polega na upuszczaniu piłeczki pingpongowej z ustalonej wysokości. W pierwszej kolejności nagraj ruch piłeczki w inercyjnym układzie odniesienia (dobrym przybliżeniem jest nagrywanie obrazu przez stojącą obok osobę). Następnie nagraj ruch, w sytuacji, gdy kamera znajduje się w układzie nieinercyjnym (na wirującej platformie) – w tej sytuacji piłeczka powinna być upuszczana prostopadle na platformę. Wykorzystując dostępne w internecie informacje dotyczące siły Coriolisa, narysuj i opisz siły działające na piłeczkę w obydwu przypadkach i na tej podstawie wyjaśnij różnice w obserwowanym ruchu.

Wskazówki metodyczne opisujące różne zastosowania danego multimedium:

Film-samouczek można wykorzystać w trakcie lekcji (we wcześniejszej fazie) jako przykład sposobu rozwiązania zadań.