

# Zrozumieć Fizykę 1: Krótkie Streszczenie

## Spis Treści

<b>I. Wstęp</b>	<b>1</b>
<b>II. Kinematyka</b>	<b>2</b>
A. Ruch Prostoliniowy . . . . .	2
B. Ruch Krzywoliniowy . . . . .	6
C. Ruch po Okręgu . . . . .	8
D. Przyspieszenie Dośrodkowe . . . . .	9
E. Zadania . . . . .	10
<b>III. Ruch i Siły</b>	<b>13</b>
A. Oddziaływania . . . . .	13
B. Dodawanie sił i rozkładanie ich na składowe . . . . .	14
C. Zasady Dynamiki Newtona . . . . .	16
D. Siła Tarcia . . . . .	16
E. Siła Dośrodkowa . . . . .	16
F. Siły Bezwładności . . . . .	16
G. Zadania . . . . .	16

## I. Wstęp

W tym pliku spróbuję zamieszczać informacje, które wydają mi się podstawowe do dobrze ugruntowanego zrozumienia tematów studiowanych przez nas. W żadnym wypadku ten materiał nie ma na celu zastąpienia tego, co studiowałeś w klasie, oraz nauki z podręczników i zeszytów ćwiczeń. Przed czytaniem tematów, które prezentuję tutaj spróbuj najpierw przeczytać ich odpowiedniki z książki.

Spróbowałem też zamieścić w tym pliku kilka zadań, które mają potwierdzić poprawne zrozumie materiału. Części materiału prezentowanego tutaj, które wydają mi się trudniejsze do zrozumienia zaznaczyłem symbolem sztyletu czyli <sup>†</sup>. Najważniejsze co moim zdaniem powinno być wyniesione z tego pliku to zrozumienie definicji (czy też teorii lub praw) i ich aplikacja do rozwiązywania zadań. Materiał/tekst, który trochę wybiega poza program zaznaczyłem na **czzerwono** (lecz wydaje mi, że są one w twoim zasięgu i pozwolą ci lepiej zrozumieć fizykę). Kończąc, przepraszam za mój wygięty język polski i powodzenia! Ostatnia rzecz, link do podstawy programowej:

<https://podstawaprogramowa.pl/Liceum-technikum/Fizyka>.

## II. Kinematyka

### A. Ruch Prostoliniowy

Ruch jest jednym z najbardziej podstawowych pojęć w Fizyce. Jego poprawny opis pozwala nam lepiej zrozumieć charakter fizycznych zjawisk. Na przykład, zauważ, że:

- Teoria Grawitacji Newtona przedstawia związek pomiędzy ruchem ciała a polem grawitacyjnym tworzoną przez gęstość mas innych ciał (pod koniec nauki w szkole ten związek powinien być dla ciebie zrozumiały dla stałych gęstości mas i co razem z tym idzie dla obiektów punktowych);
- Klasyczna Elektrodynamika przedstawia związek pomiędzy ruchem ciała a polem elektromagnetycznym tworzoną przez ładunki elektryczne i związane z nimi prądy (w szkole mogłeś zauważyć ten związek przy nauce prawa Coulomba).

Przedstawiony powyżej związek pomiędzy ruchem i polem grawitacyjnym w Teorii Grawitacji Newtona staje się oczywisty, gdy rozważamy równość sił wynikającą z drugiego prawa Newtona i siłę związaną z polem grawitacyjnym (Newtona). Istnieją inne formalizmy (mianowicie Mechaniki Lagrange’a i Hamiltona) lepiej przystosowane do zrozumienia tych tematów, lecz nie będziemy się nimi interesować na tym poziomie. Na zakończenie tego wprowadzenia zauważmy, że poznanie podstawowych opisów ruchu i jego rodzajów stanowi ważny krok w kierunku zrozumienia bardziej poważnych tematów w Fizyce.

**Definicja 1** *Układ odniesienia to punkt lub układ punktów w przestrzeni, względem którego określa się położenie lub zmianę położenia danego ciała.*

Wybór układu odniesienia jest koniecznym warunkiem opisu ruchu lub spoczynku. Układ odniesienia można wybrać dowolnie, tak, by wygodnie opisać ruch. W Fizyce różniamy pomiędzy układami inercjalnymi i nie-inercjalnymi. Szczególnie ważne przykłady układów odniesienia:

- układ laboratoryjny to układ, w którym laboratorium jest nieruchome;
- układ środka masy, ruch opisujemy tak jakby środek masy opisywanych ciał spoczywał;
- Ziemia, w pewnych sytuacjach, gdy obszar, w którym porusza się opisywane ciało jest wystarczająco mały, można założyć, że Ziemia jest płaska i nieruchoma, np. lot pocisku karabinowego, upadek kamienia, jadący samochód.

**Definicja 2** *Ruch ciała to zmiana jego położenia względem wybranego ciała zwanego układem odniesienia.*

Z **Definicji 2** wynika, że ruch jest pojęciem względnym i jego opis zależy od wyboru układu odniesienia. W związku z tym, pojęcia położenia, prędkości i przyspieszenia są zależne od wybranego układu odniesienia (**bardzo ważne: droga nie zależy od wybranego układu odniesienia, jak później zauważymy jest niezmiennikiem transformacji Galileusza**).<sup>†</sup> Tutaj warto zaznaczyć, że opis fizycznych praw nie powinien zależeć od układu odniesienia.<sup>†</sup> Znając opis danego zjawiska fizycznego w jednym (inercjalnym) układzie odniesienia, powinniśmy potrafić poznać jego charakter w jakimkolwiek innym (inercjalnym) układzie odniesienia.

**Definicja 3** *Ruch jednostajny po torze prostoliniowym (ruch jednostajny prostoliniowy), czyli ruch odbywający się wzdłuż linii prostej ze stałą prędkością.*

Za pomocą **Definicji 3** możemy stwierdzić, że przyspieszenie w ruchu jednostajnym prostoliniowym jest równe zero, a prędkość średnia równa jest prędkości chwilowej. Ponadto wartość bezwzględna przemieszczenia (zmiany położenia) jest równa drodze pokonanej przez ciało.<sup>†</sup>

**Definicja 4** *Prędkość średnia ciała to iloraz jego całkowitego przemieszczenia ( $\Delta\vec{x}$ ), inaczej zmiany położenia, i czasu, w którym to przemieszczenie nastąpiło ( $\Delta t$ ):*

$$\vec{v}_{sr} = \frac{\Delta\vec{x}}{\Delta t}. \quad (1)$$

**Definicja 5** *Prędkość chwilowa to prędkość średnia dla której  $\Delta t \rightarrow 0$ :*

$$\vec{v} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\vec{x}(t + \Delta t) - \vec{x}(t)}{\Delta t} = \frac{d\vec{x}}{dt}. \quad (2)$$

**Definicja 5** może na pierwszy rzut oka wyglądać tak, że trudno byłoby znaleźć jakieś proste zastosowanie dla niej (formalnie definicja ta mówi nam o tym, że prędkość chwilowa jest pochodną przemieszczenia w odniesieniu do czasu). Jednak, nam wystarczy wiedzieć, że jeżeli będziemy badać przemieszczenie ciała i będzie ono określone jakąś funkcji zależną od czasu, wtedy prędkość chwilowa w jakimś zadanym czasie będzie określona wartością nachylenia tej funkcji w zadanym czasie.<sup>†</sup>

Przekształcając wzór (1) możemy znaleźć zależność pomiędzy przemieszczaniem a czasem w ruchu jednostajnym prostoliniowym, ponieważ prędkość chwilowa jest równa do prędkości średniej w tym właśnie ruchu. Równaniem ruchu jednostajnego prostoliniowego, nazywamy równanie opisujące zależność pomiędzy zmianą położenia ( $\Delta \vec{x}$ ) i czasem, w którym to przemieszczenie nastąpiło ( $\Delta t$ ):

$$\Delta \vec{x} = \vec{v} \Delta t, \quad (3)$$

gdzie  $\vec{v}$  to prędkość (chwilowa) ciała. Zauważmy, że dla ruchu jednostajnego prostoliniowego, zmiana położenia jest wprost proporcjonalna do czasu.

**Definicja 6** *Tor ruchu (trajektoria) to krzywa zakreślana w przestrzeni przez wybrany punkt poruszającego się ciała (dla ciała punktowego mamy tylko jeden punkt do wyboru).*

**Definicja 7** *Droga jest długością odcinka toru, jaką pokonuje wybrany punkt ciała lub punkt materialny podczas swojego ruchu. Droga nie oznacza odległości pomiędzy dwoma punktami wyznaczającymi początek i koniec ruchu. Liczy się ją wzdłuż toru ruchu, czyli po krzywej, po której porusza się ciało.<sup>†</sup>*

Na początku wspomnieliśmy, że ruch jest zależny od układu odniesienia, a co za tym idzie fizyczne wartości takie jak na przykład prędkość będą miały różne wartości w różnych układach odniesienia. Formalnie możemy opisać te różnice transformacjami Galileusza (możemy je stosować tylko gdy opisywana prędkość w danym układzie odniesienia jest dużo mniejsza niż prędkość światła w próżni, inaczej wkraczamy w teren Specjalnej Teorii Względności Einsteina). W życiu codziennym poruszamy się z prędkościami znacznie mniejszymi od prędkości światła w próżni i dlatego transformacja Galileusza bardzo dobrze opisuje najbliższe otoczenie człowieka.

**Definicja 8** Układ inercjalny jest układem odniesienia, w którym każde ciało, **niepodlegające zewnętrznemu oddziaływaniu z innymi ciałami oraz nie będące w ruchu okrężnym**, porusza się bez przyspieszenia (ruchem jednostajnym prostoliniowym) lub pozostaje w spoczynku.<sup>†</sup>

**Definicja 9** Zasada względności głosi, że prawa fizyki w dwóch inercjalnych układach odniesienia są takie same (odkrył ją Galileusz). Jej konsekwencją są transformacje Galileusza, zakładając, że mechanika Newtona jest prawdziwa (patrz **Definicja 10**). *“Uogólnieniem” zasady względności (pozwalającym włączyć pola grawitacyjne do naszych rozważań) jest zasada równoważności. Zasada równoważności to zasada dotycząca równości masy grawitacyjnej i masy bezwładnej. Zasada posiada kilka wersji. **Słaba zasada równoważności** głosi: “wszystkie prawa ruchu dla ciał w spadku swobodnym są takie same jak w układzie inercjalnym”. Zgodnie z **silną wersją**: “wszystkie prawa fizyki są takie same w jednorodnym statycznym polu grawitacyjnym jak w równoważnym układzie nieinercjalnym. W sformułowaniu Einsteina słaba wersja jest prawdziwa i dodatkowo: “Wynik dowolnego lokalnego nie-grawitacyjnego eksperymentu jest niezależny od prędkości swobodnie spadającego układu odniesienia, w którym jest przeprowadzany” oraz “wynik dowolnego lokalnego nie-grawitacyjnego eksperymentu jest niezależny od tego gdzie i kiedy we wszechświecie się go przeprowadza”.*

**Definicja 10** Jeżeli przyjmiemy, że zdarzenie w układzie inercjalnym  $A$  opisane jest współzrędnymi czasoprzestrzennymi  $(t, \vec{x})$  a w układzie inercjalnym  $B$ , przemieszczającym się z prędkością  $\vec{v}$  względnie do  $A$ , są to odpowiednio  $(t', \vec{x}')$  to transformacja współzrędných będzie opisana układem równań:

$$t' = t, \quad (4)$$

$$\vec{x}' = \vec{x} - t\vec{v}, \quad (5)$$

przy czym w chwili początkowej  $t = 0$  początki obu układów odniesienia pokrywały się, oraz przyjęliśmy, że pomiar czasu w obu układach jest zsynchronizowany.

**Teraz patrz na zadania 1, 2, 3, 4 i 5 w części D.**

Do tej pory skupialiśmy się na układach inercjalnych, w których ciała poruszały się ze stałą prędkością. Jednak jak mogłeś zauważyć ze swoich zajęć fizyki, wiele interesujących zjawisk fizycznych jest związanych z istnieniem siły (grawitacja, elektryczność). Jednak zanim zaczniemy badać siły w fizyce musimy poznać jak zachowują się ciała poruszające się z prędkością zmieniającą się z czasem.

**Definicja 11** Przyspieszenie to iloraz zmiany prędkości ( $\Delta \vec{v}$ ) i czasu, w którym nastąpiła ta zmiana ( $\Delta t$ ):

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (6)$$

Przyspieszenie średnie jest ilorazem całkowitej zmiany prędkości i całkowitego czasu trwania ruchu. Przyspieszenie chwilowe to przyspieszenie średnie dla którego  $\Delta t \rightarrow 0$ .

**Definicja 12** Ruch prostoliniowy jednostajnie zmiennym nazywamy taki ruch prostoliniowy, w którym przyspieszenie jest stałe. W ruchu jednostajnie zmiennym przyrost prędkości jest wprost proporcjonalny do czasu.

**Definicja 13** Zmiana położenia ciała w ruchu prostoliniowym równa jest polu pod wykresem zależności  $\vec{v}(t)$ , przy czym dla fragmentów wykresu znajdujących się pod osią  $t$  odpowiadające im pola uwzględniamy za znakiem minus.

Teraz patrz na zadania 6, 7, 8, 9, i 10 w części D.

## B. Ruch Krzywoliniowy

Gdy ciało porusza się po linii krzywej, wektor jego prędkości jest skierowany wzdłuż stycznej do toru. W ruchu krzywoliniowym wektor prędkości zmienia się również wtedy, gdy jej wartość pozostaje stała, ponieważ zmienia się kierunek prędkości. W klasyfikacji ruchów ruch zmienny jest przeciwieństwem (dopełnieniem) ruchu jednostajnego prostoliniowego.

**Definicja 14** Ruch prostoliniowy zmienny to ruch, w którym nie zmienia się kierunek prędkości, natomiast zmienia się jej wartość. Jeśli przyrost prędkości w ruchu prostoliniowym ma wartość stałą, mówi się o ruchu jednostajnie przyspieszonym lub opóźnionym w tym drugim wartość przyspieszenia przybiera wartości ujemne (oba te ruchy to ruchy prostoliniowe jednostajnie zmienne - patrz **Definicja 11**).

**Definicja 15** Ruch krzywoliniowy jednostajny to ruch, w którym zmienia się kierunek jego prędkości, a nie zmienia się jej wartość. Szczególnym przypadkiem tego ruchu jest ruch jednostajny po okręgu, w którym prędkość zmiany kierunku jest stała.

Pozostałe przypadki ruchu zmiennego obejmują ruch, w którym zmienia się zarówno kierunek jak i wartość prędkości. Przykładem takiego ruchu może być ruch ze zmienną prędkością po okręgu. Teraz skupmy się na prostym przykładzie ruchu zmiennego, rzucie poziomym. Rzut poziomy (ukośny) jest ruchem, który najłatwiej studiować za pomocą

rozłożenie wektora prędkości ( $\vec{v}$ ) na wektory bazowe (pracujemy w 2. wymiarach używając Kartezjańskich bazowych wektorów; w tej części pomijamy opory wiatrów oraz jakikolwiek inne efekty jest to model minimalny rzut ukośnego w polu grawitacyjnym):

$$\vec{v}(t) = v_x(t)\hat{e}_x + v_y(t)\hat{e}_y. \quad (7)$$

Na ciało poruszające się ruchem ukośnym będzie działała siła grawitacji wzdłuż pionowej osi ruchu, a więc początkowa prędkość  $v_y(t=0)$  wzdłuż pionowej osi ruchu będzie zmieniała się wraz z czasem (dzieje się tak z powodu konwersji między energią kinetyczną a grawitacyjną energią potencjalną). Prędkość wzdłuż osi równoległej ruchu będzie stała w ruchu ukośnym (w układzie Kartezjańskim). Jak mogłeś już zauważyć, badanie ruchu ukośnego sprowadza się do badania poszczególnych ruchów składowych, które go tworzą: ruchu jednostajnego wzdłuż osi  $x$  oraz ruchu jednostajnego przyspieszonego wzdłuż osi  $y$  (czemu możemy rozłożyć ruch ukośny na składowe ruchy).<sup>†</sup> Poniżej przedstawiam równania opisujące ruch ukośny (czy jest jasne dla ciebie znaczenie wszystkich terminów w równaniach poniżej):

$$\vec{a}(t) = a_x(t)\hat{e}_x + a_y(t)\hat{e}_y \quad (8)$$

$$a_x(t) = 0, \quad (9)$$

$$a_y(t) = -g, \quad (10)$$

$$\vec{v}(t) = v_x(t)\hat{e}_x + v_y(t)\hat{e}_y, \quad (11)$$

$$v_x(t) = v_x(0) = v(0) \cdot \cos \phi, \quad (12)$$

$$v_y(t) = v_y(0) - g \cdot t = v(0) \cdot \sin \phi - g \cdot t, \quad (13)$$

$$\vec{r}(t) = x(t)\hat{e}_x + y(t)\hat{e}_y, \quad (14)$$

$$x(t) = v_x(0)t + x(0), \quad (15)$$

$$y(t) = v_y(0)t - \frac{gt^2}{2} + y(0). \quad (16)$$

**Definicja 16** *Rzut poziomy (tutaj zakładam  $v_y(t=0) = 0$ ) to ruch w jednorodnym polu grawitacyjnym z prędkością początkową prostopadłą do kierunku pola grawitacyjnego. Torem ruchu jest parabola o wierzchołku w punkcie rzutu. Parametry rzutu poziomego to,*

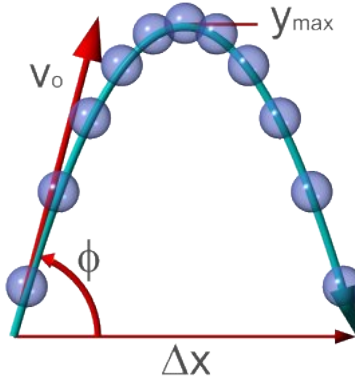
- *czas trwania ruchu:*

$$t = \sqrt{\frac{2h}{g}}, \quad (17)$$

- zasięg  $\Gamma$  rzutu to odległość, mierzona po ziemi, od miejsca rzutu do miejsca upadku:

$$\Gamma = tv(t = 0) . \quad (18)$$

Gdzie  $g$  to wartość przyspieszenia ziemskiego,  $t$  to całkowity czas trwania ruchu,  $v(t)$  to wielkość prędkości od czasu, i  $h$  wysokość, z której zrzucono ciało.<sup>†</sup>



Rysunek 1: Schematyczny rysunek rzutu ukośnego (rzutem poziomym nazwalibyśmy ruch, dla którego punkt początkowy jest równy  $y_{max}$  na powyższym rysunku), rzut poziomy otrzymuje kiedy pionowa składowa prędkości początkowej ma wartość równą zero, zasięg to  $\Delta x$ ,  $v_0$  początkowa wartość prędkości.

### C. Ruch po Okręgu

Szczególnym przypadkiem ruchu po krzywej jest ruch po okręgu. Jeżeli wartość prędkości w tym ruchu jest stała, to mówimy o ruchu jednostajnym po okręgu. Takim ruchem porusza się np. każdy punkt bębna pralki podczas wirowania (czy też wskazówki zegar z twoją podobizną w kuchni). Można przyjąć, że w przybliżeniu po okręgu wektor prędkości, jako styczny do toru, jest w każdym punkcie toru prostopadły do promienia łączącego ten punkt ze środkiem okręgu.

**Definicja 17** *Ruch jednostajny po okręgu jest przypadkiem ruchu krzywoliniowego, którego wartość prędkości nie ulega zmianie. W ruchu występuje siła dośrodkowa, która powoduje powstanie przyspieszenia dośrodkowego (normalnego), które powoduje zmianę kierunku wektora prędkości.*

Jedną z cech tego ruchu jest wielkość zwana okresem  $T$ . Jest to czas, w ciągu którego ciało pokonuje całą długość toru - czyli obwód koła. Oznacza to, że po czasie  $T$  ciało wraca do punktu wyjścia. Czas jednego obrotu, czyli okres, możemy zamienić na inną



wielkość - częstotliwość. Jest to liczba obrotów wykonanych w ciągu jednostki czasu. Szybkość ciała ( $u$ ) poruszającego się ruchem jednostajnym po okręgu obliczamy jak w ruchu jednostajnym. Wiemy, że ciało pokonuje drogę równą obwodowi koła ( $2\pi r$ ) w czasie równym okresowi ( $T$ ), więc:

$$u = \frac{2\pi r}{T}. \quad (19)$$

Jak już wspomniałem, prędkość w jednostajnym ruchu po okręgu jest zawsze skierowana stycznie do okręgu - co oznacza, że zwrot prędkości podczas ruchu cały czas się zmienia. Jednak co wpływa na to, że prędkość liniowa jest cały czas styczna do okręgu ruchu?<sup>†</sup>

**Definicja 18** *Prędkość kątowna, jeśli w ciągu czasu  $\Delta t$  ciało przebyło po okręgu drogę z jednego punktu do drugiego, której odpowiada  $\Delta\vec{\varphi}$ , to prędkością kątową nazywamy:*

$$\vec{\omega} = \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t}. \quad (20)$$

Używając wzorów (9) i (10) można wyprowadzić następujący wzór na prędkość w ruchu jednostajnym po okręgu (gdzie terminy użyte w równaniu mają swoje zwykłe znaczenie):  $\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{r}$ . W ruchu jednostajnym po okręgu nie musimy rozróżniać średniej i chwilowej prędkości kątowej. Dla ruchów niejednostajnych takie rozróżnienie można wprowadzić podobnie jak dla prędkości liniowej.

**Definicja 19** *Chwilową prędkość kątową otrzymujemy:*

$$\vec{\omega}_{ch} = \frac{\Delta\vec{\varphi}}{\Delta t}, \quad (21)$$

gdy  $\Delta t \rightarrow 0$ .

**Definicja 20** *Przyspieszenie kątowe to iloraz zmiany prędkości kątowej i czasu, w którym nastąpiła ta zmiana:*

$$\vec{\varepsilon} = \frac{\Delta\vec{\omega}}{\Delta t} \quad (22)$$

## D. Przyspieszenie Dośrodkowe

W ruchu prostoliniowym przyspieszenie ma kierunek (ale niekoniecznie zwrot) zgodny z kierunkiem prędkości. Poza tym pełni ono tylko jedną rolę – wpływa na zmiany wartości prędkości. konkretniej - przyspieszenie wywołuje wzrost, lub malenie prędkości. W przypadku ruchu krzywoliniowego sytuacja jest bardziej skomplikowana. Tutaj dochodzi jeszcze dla przyspieszenia pojawia się jeszcze jedna rola: zmiana kierunku prędkości

(a więc także kierunku ruchu ciała). Podczas nauki w szkole będziesz tylko rozważać przyspieszenie w ruchu jednostajnym po okręgu.

**Definicja 21** W ruchu jednostajnym po okręgu przyspieszenie chwilowe jest skierowane w stronę środka okręgu. Nazywamy je przyspieszeniem dośrodkowym i oznaczamy  $\vec{a}_d$ , wartość przyspieszenia dośrodkowego jest zadana wzorem:

$$a_d = \frac{v^2}{r} = \omega^2 r, \quad (23)$$

gdzie  $v$  to wartość prędkości liniowej,  $r$  to promień okręgu,  $\omega$  to prędkość kątowa.

Poznaliśmy do tej pory całkiem sporą liczbę wzorów ale będzie ich tylko więcej w następnych temat. Spróbuj wymienić wszystkie równania, które poznałeś w tym rozdziale, oraz wyjaśnij pochodzenie każdego z tych równań? Jest ich trochę więcej niż 2! Zauważ, że nie wymieniałem wszystkich z nich *explicite* w tym pliku.

Teraz patrz na zadania 11, 12, 13, 14, 15 i 16 w części D.

## E. Zadania

Poziomy trudności zadań rosną po kolei od **niebieskiego** przez **zielony** do **czerwonego**. Odpowiedzi dodam dopiero później, ale wydaje mi się, że najlepiej będzie jeżeli sam spróbujesz odpowiedzieć na prostsze pytania, a tam gdzie będziesz miał problemy to spróbuję pomóc. Oczekuję, że trudniejsze pytania będziemy przerabiać razem. Spróbowałem zebrać/ułożyć pytania tak żeby **niebieskie** pytania były dosyć standardowe, **zielone** za to mogą wydawać się, chociaż na początku, trochę nie standardowe.

**1. Droga w ruchu jednostajnym prostoliniowym.** Zaproponuj postać wzoru na drogę w ruchu jednostajnym prostoliniowym argumentując jego słuszność.

**2. Szybkość w ruchu jednostajnym prostoliniowym.** Zbyszek wyruszył w trasę z szybkością  $v = 25 \text{ km/h}$ , a 2h później wyruszył za nim Bonnie z szybkością  $u = 50 \text{ km/h}$ . Należy obliczyć: po jakim czasie od chwili wyruszenia Zbyszka, Bonnie dogoni Zbyszka, w jakiej odległości od miejsca startu to nastąpi, w jakiej odległości będą od siebie po 4h od chwili ruszenia Zbyszka.

**3. Transformacja Prędkości za pomocą Transformacji Galileusza.** Wykaż, za pomocą wzorów (4) i (5) wzór na transformację prędkości pomiędzy dwoma układami inercjalnymi A i B, gdzie układ B przemieszcza się z prędkością  $\vec{v}$  względnie do A.

**4. Układy odniesienia w ruchu jednostajnym prostoliniowym.** Pociąg, o długość 30 m porusza się ze stałą prędkością 100 km/h. Z czoła pociągu został wysłany na jego tyły Bonnie z meldunkiem. Szybkość Bonnie to 50 km/h (mierzona przez pasażerów pociągu). W jakim czasie Bonnie potwierdzi wykonanie rozkazu? (Bonnie musi wrócić na czoło pociągu żeby potwierdzić wykonanie rozkazu). Jaka prędkość zmierzyłby człowiek stojący na zewnątrz pociągu (patrzac prosto na jeden z boków pociągu) dla Bonnie: kiedy Bonnie biegł na tył i kiedy Bonnie wracał na czoło?

**5. Mapowanie ruchu.** Przedstaw wizualnie funkcje położenie ciała w stosunku do czasu, toru ruchu (w 2D), i drogi przebytej w zależności od czasu dla dowolnie wybranego przez ciebie ruchu.

**6. Ruch Prostoliniowy Jednostajny Zmienny.** Wyprowadź wzór na przemieszczanie oraz drogę przebytą w stosunku do czasu w tym właśnie ruchu (używając **Definicji 12**).

**7. Opóźnienia i Przyspieszenia.** Gdy kierowca samochodu zobaczył w odległości 30 m przed samochodem przeszkodę rozpoczął gwałtownie hamować z opóźnieniem o wartości  $5 m/s^2$ . Jednak po czasie 2 s samochód uderzył w przeszkodę. W jakiej odległości przed przeszkodą kierowca powinien zacząć hamowanie, aby bezpiecznie się zatrzymać? Samochód ruszył ruchem jednostajnie przyspieszonym, z przyspieszeniem  $3 m/s^2$ . W ostatniej sekundzie tego ruchu przebył drogę 16.5 m. Oblicz jaka była cała droga, na której samochód przyspieszał i jak długo trwał ten ruch.

**8. Ogólne Transformacje Galileusza.** Podaj postać wzorów (4) i (5) dla dwóch układów inercjalnych A i B, gdzie czas w A względem B jest spóźniony o stałą  $t_d$  oraz gdy oba układy A i B pokrywają się w chwili  $t = t_0$ .

**9. Droga jako niezmiennik Transformacja Galileusza.** Pokaż, że droga jest niezmiennikiem Transformacji Galileusza.

**10. Transformacja Przyspieszenia za pomocą Transformacji Galileusza i Drugie Prawo Newtona.** Najpierw wytłumacz czym charakteryzuje się układ nie-inercjalny. Wykaż, że przyspieszenie jest niezmiennikiem transformacji Galileusza zaczynając od równań (4) i (5). Teraz przypomnij sobie drugie prawo (**dynamiki**) Newtona i przedstaw jego sformułowanie. W końcu pokaż, że drugie prawo Newton jest niezmiennie podczas Transformacji Galileusza. (Uff! To dobry znak, charakter praw fizycznych jest zachowany w różnych układach inercyjnych. Drugie Prawo dynamiki Newtona opisuje więc poprawnie ruch w każdym układzie inercjalnym. **Idąc dalej można by pokazać, że wszystkie prawa mechaniki wyglądają identycznie we wszystkich inercjalnych układach odniesienia. Na zakończenie zastanów jeszcze raz się czym są układy nie-inercjalne i czemu mogą być**

ważne w Fizyce, wróćmy do tego przy nauce ruchu po okręgu. Uwaga na marginesie: w 1905 Einstein podczas studiowania Elektrodynamiki Klasycznej zauważył, że transformacje Galileusza są jedynie przybliżeniem. Dla dużych prędkości, bliskich prędkości światła, zaczynają się kłopoty podczas używania transformacji Galileusza i trzeba je zmodyfikować. I co za tym idzie równanie  $\vec{F} = m\vec{a}$  nie jest podstawowym równaniem w układach inercjalnych, przy założeniu, że  $m$  czyli masa jest stała w czasie.)

**11. Mapowanie Ruchu po Okręgu.** Przedstaw szkic drogi i przemieszczenia w stosunku do czasu oraz toru ruchu (w 2D) dla ruchu jednostajnego po okręgu.

**12. Radiany.** Radian to jednostka miary łukowej kąta zaliczana do jednostek pomocniczych układu SI. Przedstaw wzór, który pozwoli ci zamienić radiany na stopnie. Następnie, przedstaw wzór na długość łuku okręgu w stosunku do kąta podanego w radianach oraz za pomocą wzoru, który wyprowadziłeś powyżej przedstaw wzór na długość łuku okręgu w stosunku do kąta podanego w stopniach.

**13. Szybkość w ruchu jednostajnym po okręgu.** Oblicz szybkość (w  $m/s$ ) obiegu TRAPPIST-1d wokół czerwonego karła TRAPPIST-1, potrzebne dane znajdź w Wikipedii. Porównaj wynik z oficjalnymi danymi i zasugeruj kilka powodów dlaczego twój wynik różni się od pomiarów. Teraz oblicz prędkość kątową TRAPPIST-1d wokół czerwonego karła TRAPPIST-1.

**14. Rzuty poziome i więcej.** Z armaty z lufą ustawioną pod kątem 45 stopni wystrzelono pocisk z prędkością początkową  $30 m/s$ . Jaką maksymalną wysokość osiągnie pocisk? W jakiej odległości spadnie? Przyjmij  $g = 10 m/s^2$ . Zaniedbaj opory powietrza.

**15. Ruch po Okręgu jako układ nie-inercjalny.** Za pomocą tego lub innych źródeł wyargumentuj czemu układ odniesienia związany z ciałem poruszającym się po okręgu jest układem nie-inercjalnym. Następnie wyargumentuj słuszność istnienia siły odśrodkowej bezwładności działającej na ciało poruszające w ruchu okrężnym (siła odśrodkowa bezwładności przedstawiona w tym przykładzie jest nazywana w fizyce siłą fikcyjną/pozorną; **siły fikcyjne pojawiają się w nie-inercjalnym układzie odniesienia, za wynikiem przyspieszenia tego układu oraz, jeżeli istnieje, jakiegoś zakrzywienie, zakrzywienie ma tutaj specyficzne matematyczne znaczenie ale wystarczy jeżeli zrozumiesz, że zakrzywienie pojawia się wtedy gdy pracujemy z współrzędnymi, które opisują ruch odbywający się na kuli, siodle, torusie, itp. czyli nie na płaszczyźnie**).

**16. Zwrot Prędkości w ruchu jednostajnym po okręgu.** Wyłumacz/pokaż dlaczego w ruchu jednostajnym po okręgu przyspieszenie chwilowe jest skierowane w stronę środka okręgu.

**17. Siła/Efekt Coriolisa.** Wstęp: zasady dynamiki Newtona obowiązują dla układów inercjalnych. Możliwa jest jednak transformacja tych równań do układów nie-inercjalnych. W wyniku takiej transformacji otrzymujemy równania analogiczne do równań Newtona, przy czym transformacja powoduje powstanie dodatkowych wyrazów (o wymiarze siły). Właśnie te dodatkowe wyrazy nazywa się siłami bezwładności, nie są to jednak siły fizyczne, a tylko matematyczne artefakty zmiany układu współrzędnych. Siła Coriolisa to zjawisko występujące, gdy ciało porusza się w obracającym się układzie odniesienia. Siła Coriolisa wyrażona jest wzorem:

$$\vec{F}_C = -2m(\vec{\omega} \times \vec{v}), \quad (24)$$

gdzie  $m$  to masa ciała,  $\vec{v}$  jego prędkość,  $\vec{\omega}$  prędkość kątowna układu. Wyznacz jak siła Coriolisa wpływa na spadek swobodny z dużej wysokości na Ziemi.

### III. Ruch i Siły

#### A. Oddziaływania

*“... cała trudność filozofii naturalnej polega na tym, żeby na podstawie zjawisk ruchu poznać siły przyrody, a następnie - na podstawie tych sił - objaśnić pozostałe zjawiska.”*

— Sir Isaac Newton, *Philosophiae naturalis principia mathematica*.

Dotychczas opisywaliśmy ruch ciał. W tym rozdziale, podążać za śladem Newtona, zajmiemy się wyjaśnieniem i opisem jego przyczyn. W naturze wyróżniamy cztery następujące oddziaływania fundamentalne: grawitacyjne, elektromagnetyczne, silne i słabe.

Oddziaływania grawitacyjne były po raz pierwszy formalnie zrozumienie przez I. Newtona w jego teorii grawitacji. W dalszej części naszych zajęć spróbujemy zrozumieć siły grawitacji za pomocą formalizmu Newtona. Jednak teoria grawitacji Newtona posiada kilka defektów/wad (nie zrozum mnie źle, teoria Newtona jest w przybliżeniu prawdziwa w słabym reżimie pola grawitacyjnego, więc można ją szczęśliwie zastosować do przyziemnych obliczeń; jeśli zastanawiasz się, kiedy mamy do czynienia z takim polem grawitacyjnym, jest to wtedy gdy opisujemy zwykły codzienny ruch na Ziemi lub jakichkolwiek ciał niebieskich w układzie słonecznym, w każdym razie teoria Newtona ma poważne wady nawet w reżimie słabego pola, np. całkowicie nie przewiduje zakrzywienia ruchu światła obok masywnego obiektu światła). **Mianowicie w teorii Newtona zmiany w po-**

lu grawitacyjnym są propagowanie natychmiastowo (prędkość propagacji tych zmian jest nieskończona - jest to w sprzeczności ze zdrowym rozsądkiem i co więcej eksperymentami). Dalej, teoria Newtona nie tłumaczy “co” tak naprawdę propaguje pole grawitacyjne (teoria Newtona posiada jeszcze wiele innych defektów)! Dopiero A. Einstein zauważył w jaki sposób można te problemy rozwiązać, owocem jego pracy nad grawitacją jest ogólna teoria względności (opublikowany w 1915 roku). Na koniec zauważ, że w teorii A. Einstein grawitacja nie jest fundamentalna siłą (byliśmy z tym konfrontowani w zadaniach 1 i 2 z kinematyki).

Następnie spójrzmy na (klasyczne) oddziaływania elektromagnetyczne. Podstawy tej teorii były formułowane przez wielu fizyków w XVIII i XIX wieku, zwieńczeniem ich prac było sformułowanie przez J. C. Maxwell’a równań elektrodynamiki opisujących zachowanie pól magnetycznych i elektrycznych w obecności ładunków elektrycznych i prądów. Maxwell dzięki swoim równaniom mógł zauważyć, że światło jest falą elektromagnetyczną. Uwaga: aby uzupełnić klasyczną teorię podstawowych oddziaływań elektromagnetyzmu, należy podać siłę Lorentza, która opisuje, jak pola elektryczne i magnetyczne wpływają na ruch ciał naładowanych elektrycznie. W tym miejscu zakończmy nasze bardzo krótkie wprowadzenie do podstawowych interakcji. Zauważ, że umyślnie unikałem omawiania oddziaływań słabych i silnych, ponieważ ich prawidłowe zrozumienie wymaga znajomości kwantowej teorii pola i jeszcze kilku innych rzeczy (na koniec warto zauważyć, że właściwe zrozumienie słabej siły było możliwe tylko w schemacie unifikacji z elektrodynamiką kwantową).

Oddziaływanie	Zasięg oddziaływań	Rząd wielkości stałych sprzężenia oddziaływań	Przykład Oddziaływania
silne	$\sim 10^{-15}$ m	$\sim 1$	wiąże nukleony
elektromagnetyczne	$\infty$	$\sim 10^{-2}$	radiometr Crookesa
słabe	$\sim 10^{-18}$ m	$\sim 10^{-5}$	promieniowanie $\beta$
grawitacyjne	$\infty$	$\sim 10^{-38}$	ruch ciał niebieskich

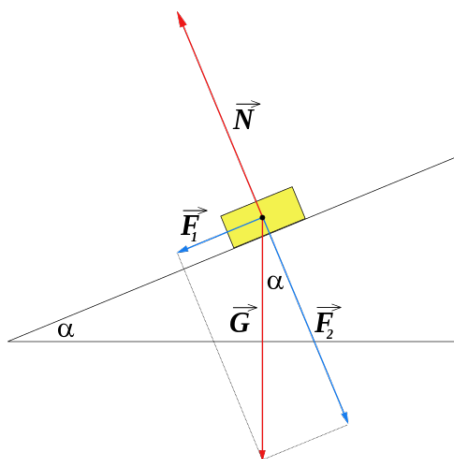
Tabela 1: Główne cechy oddziaływań podstawowych, każdemu typowi sił odpowiada stała sprzężenia mnożąca funkcję opisującą zależność siły od odległości.

## B. Dodawanie sił i rozkładanie ich na składowe

Teraz przedstawię kilka podstawowych rzeczy na temat sił, abyśmy mogli zacząć z nimi pracować. Siła jest wielkością wektorową. Ma wartość, kierunek i zwrot oraz punkt przyłożenia. Oddziaływania sił są wzajemne. Często zdarza się, że na ciało działa jednocześnie działa wiele sił, sumą wektorową tych sił nazywamy siłę wypadkową działającą na ciało.

**Definicja 22** *Siła wypadkowa jest sumą wektorową wszystkich sił działających na ciało.*

Jednym z najczęstszych ćwiczeń w fizyce jest badanie ruchu obiektów na równi pochyłej. Studiowanie takiego ruchu pozwoli nam opracować metody potrzebne do bardziej abstrakcyjnych problemów związanych z rozkładaniem sił na składowe.



Rysunek 2: Rozkład sił na równi pochyłej.

Równia to płaska powierzchnia nachylona do poziomu pod pewnym kątem. Wyznaczanie parametrów ruchu ciała po tej powierzchni (przede wszystkim wyznaczenie przyspieszenia) nazywane jest zagadnieniem równi. Istnieje szereg komplikacji, które możemy wziąć pod uwagę podczas opisywania ruchu naszego obiektu po równi pochyłej, takich jak rozważanie efektów sił tarcia na ruch naszego ciała (wrócimy do tego problemu później w podrozdziale D). Na razie skupmy się tylko na ruchu uwzględniającym siły grawitacji i zobaczmy, co możemy ustalić z naszego modelu (rysunek 2). Jeżeli między ciałem a powierzchnią równi nie występuje tarcie, to ciało przyspiesza w kierunku stycznym do powierzchni w dół. Przyspieszenie to jest proporcjonalne do iloczynu przyspieszenia ziemskiego i sinusa kąta nachylenia równi. Szybki przegląd rysunku 2 daje:

$$G = mg, \quad (25)$$

$$F_1 = G \sin \alpha, \quad (26)$$

$$ma = F_1, \quad (27)$$

$$ma = mg \sin \alpha, \quad (28)$$

$$a = g \cdot \sin \alpha, \quad (29)$$

gdzie:  $g$  – przyspieszenie ziemskie,  $\alpha$  – kąt nachylenia równi do poziomu.

**Spróbuj sam wyznaczyć równania związane z  $F_2$ , oraz wytłumacz czym jest  $\vec{N}$ .** Bardziej ogólne równania (nie wykorzystujące wprost definicji siły grawitacji) opisujące rysunek 2 są zaprezentowane poniżej:

$$\sin \alpha = \frac{F_1}{G}, \quad (30)$$

$$\cos \alpha = \frac{F_2}{G}. \quad (31)$$

Zauważ, że udało nam się rozłożyć siłę ciężkości ( $\vec{G}$ ) działającą na ciało w rysunku 2 na składowe prostopadłe i równoległe do równi pochyłej. Składowa prostopadła powoduje nacisk na równie, a równoległa powoduje ruch ciała. Na koniec, zauważ, że operacja rozkładania sił na składowe jest operacją odwrotną do dodawania wektorów.

### C. Zasady Dynamiki Newtona

#### D. Siła Tarcia

#### E. Siła Dośrodkowa

#### F. Siły Bezwładności

#### G. Zadania