



Wrocław
University
of Science
and Technology

Fizyka

semestr zimowy

2020/2021

Grupa B: Piątek, 15:00 - 16:30

Grupa A: Piątek, 16:40 - 18:10

sala wirtualna

– zajęcia online

Sylwia Majchrowska

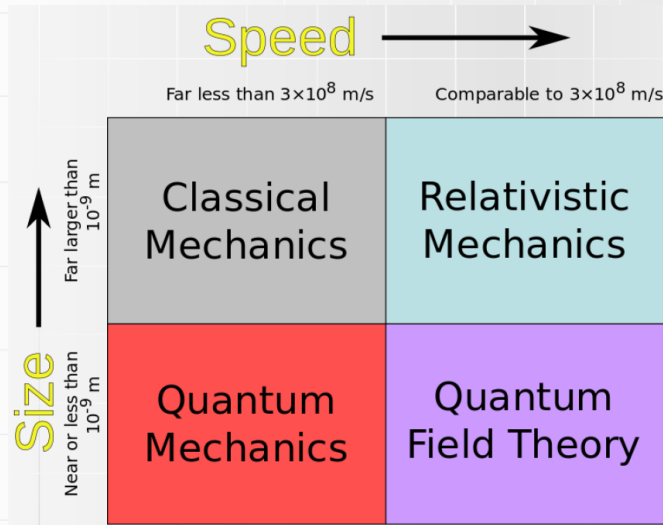
sylwia.majchrowska@pwr.edu.pl

<https://majsylw.netlify.app/teaching/>
pokój 213, budynek L-1



Fizyka klasyczna się kończy

Mechanika klasyczna, nazywana też mechaniką Newtonowską, nie dotyczy wszystkich sytuacji. Jeśli prędkości oddziałujących ciał są bardzo duże (stanowią pewną część prędkości światła) musimy zastąpić mechanikę klasyczną mechaniką relatywistyczną (specjalną teorią względności Einsteina), która obowiązuje przy dowolnej dużej prędkości, łącznie z prędkością bliską prędkości światła. Podczas gdy rozważane oddziałujące ciała mieszczą się w skali struktury atomowej (na przykład mogą to być elektrony w atomie), zamiast mechaniki klasycznej będziemy stosować mechanikę kwantową.



- Galileusz – (1564) - Prawa mechaniki są jednakowe we wszystkich układach inercjalnych.
- Jednostajny, prostoliniowy ruch układu odniesienia nie ma wpływu na zachodzące w nim zjawiska fizyczne.



Inercjalne układy odniesienia

Każda prędkość mierzona jest względem jakiegoś układu odniesienia. Na przykład prędkość samochodu mierzona jest względem punktu startowego na drodze, po której się przemieszcza, ruch pocisku – względem powierzchni, z której został wystrzelony, a ruch planety po orbicie – względem gwiazdy, wokół której orbituje. Układy odniesienia, w których zasady mechaniki mają najprostszą formę, to te o zerowym przyspieszeniu. Właśnie w takich układach spełniona jest pierwsza zasada dynamiki Newtona – zasada bezwładności.

INERCJALNY UKŁAD ODNIESIENIA

Inercjalny układ odniesienia (ang. inertial frame of reference) jest takim układem odniesienia, gdzie ciało spoczywające pozostaje w spoczynku, a ciało będące w ruchu porusza się ze stałą prędkością po linii prostej, jeżeli nie działają na nie siły zewnętrzne.

Przykładowo na pasażera samolotu lecącego ze stałą prędkością na stałej wysokości prawa fizyki działają tak samo jak na pasażera stojącego na powierzchni Ziemi. Sytuacja komplikuje się w momencie startu samolotu. W takim przypadku pasażer znajdujący się w stanie spoczynku wewnątrz samolotu zauważy, że siła wypadkowa nie jest równa iloczynowi masy i przyspieszenia ma . Zamiast tego F jest równa ma powiększonemu o pozorną siłę/siłę bezwładności. Ta sytuacja nie jest tak prosta, jak w przypadku inercjalnego układu odniesienia. Słowo „szczególna” w „szczególnej teorii względności” odnosi się jedynie do przypadków z inercjalnymi układami odniesienia. Późniejsza ogólna teoria względności Einsteina bierze pod uwagę wszystkie rodzaje układów odniesienia, w tym także przyspieszające, a co za tym idzie nieinercjalne układy odniesienia.



Transformacje Galileusza

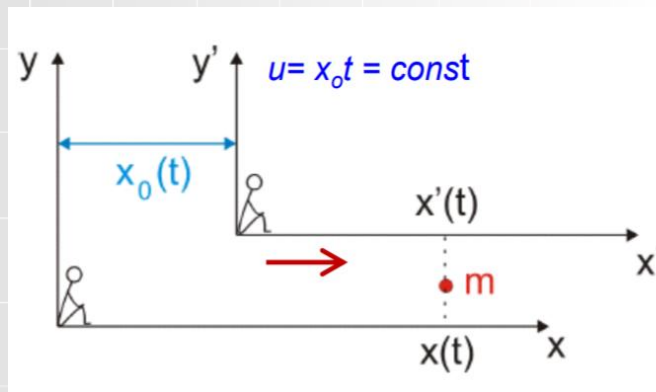
- Transformacja Galileusza dotyczyła procesów mechanicznych, pozwalała na znalezienie wartości danej wielkości fizycznej w nowym układzie odniesienia, o ile znana jest jej wartość w starym układzie odniesienia.
- XIX wiek – zastanawiano się czy transformacja Galileusza jest dobra dla zjawisk falowych, a zwłaszcza dla światła? Czy $c' = c + u$, czyli czy prędkość światła jest większa, gdy jest wysyłana w poruszającym się pojeździe?

Zdarzenie opisane jest za pomocą trzech współrzędnych przestrzennych i jednej współrzędnej czasowej (x, y, z, t) odpowiadających pewnemu układowi inercjalnemu S . Współrzędne te mogłyby np. opisywać położenie pewnej cząstki w czasie t , którą moglibyśmy następnie obserwować w różnych momentach i której ruch moglibyśmy określić. Załóżmy, że drugi układ odniesienia S' porusza się z prędkością u względem pierwszego. Dla uproszczenia przyjmijmy, że kierunek tej prędkości pokrywa się z osią x . Zależność współrzędnych przestrzennych w obu tych układach będzie wyglądała następująco

$$x = x' + ut, \quad y = y', \quad z = z'.$$

Zakładamy, że czas mierzony w obu układach jest taki sam, a więc $t = t'$.

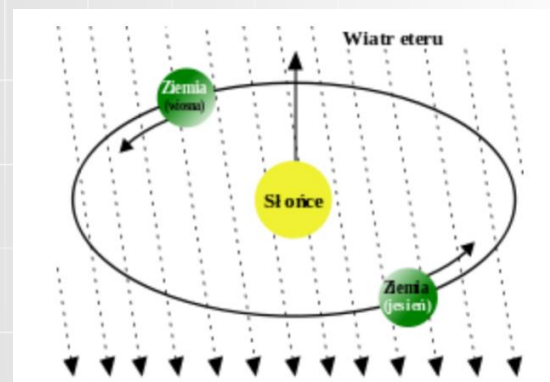
Te cztery równania znane są jako transformacja Galileusza (ang. Galilean transformation).





Koncepcja eteru

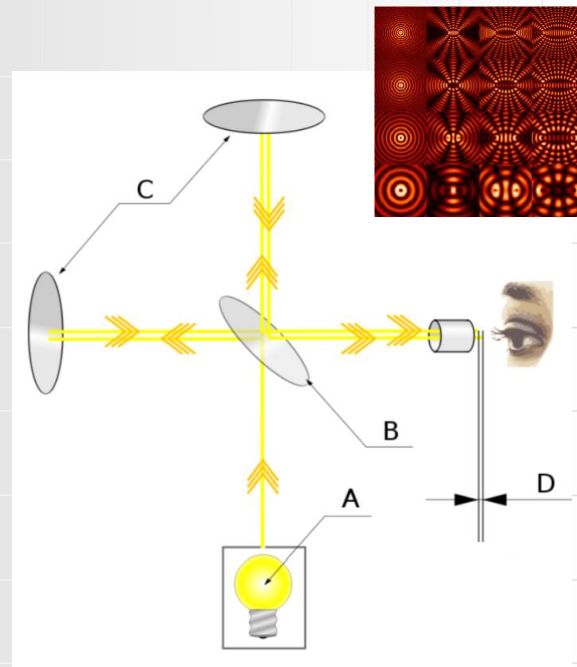
- Eter kosmiczny miał być specyficznym ośrodkiem, wypełniającym całą przestrzeń, który miał być nośnikiem fal świetlnych i pozostawać w spoczynku względem Wszechświata
- W XIX w. nikt już nie wierzył, że Ziemia jest jakimś szczególnie wyróżnionym układem odniesienia, więc uważano, że powinna ona poruszać się względem eteru.
- Z tego powodu prędkość światła powinna zależeć od kierunku jego rozchodzenia się (np. być mniejsza, gdy mierzy się ją w kierunku zgodnym z ruchem Ziemi względem eteru, a większa – gdy zmierzy się ją w kierunku przeciwnym).
- Jeśli inny układ porusza się względem eteru i w nim wysyłane jest światło, to zgodnie z transformacją Galileusza:
$$c' = c + V.$$
 - Prędkość Ziemi na orbicie to $3 \cdot 10^4$ km/s – prędkość światła powinna zależeć od prędkości Ziemi! I powinna być różna dla lata i zimy, i różna w kierunkach wschód-zachód i północ-południe (ale jak to zmierzyć?)





Doświadczenie Michelsona-Morleya

- Doświadczenie miało na celu bezpośrednie sprawdzenie wpływu ruchu źródła światła na prędkość światła, a pośrednio – sprawdzenie, czy istnieje eter kosmiczny.
- W celu wykonania doświadczenia został wykorzystany interferometr Michelsona.
- Interferometr Michelsona służy do precyzyjnego pomiaru długości fal świetlnych. Jego zasada działania opiera się na interferencji światła: równa częstotliwość, korelacja faz.



Ponieważ długość fali zależy od jej prędkości ($\lambda = v/f$, gdzie v – prędkość fali, zaś f – jej częstotliwość), położenie prążków interferencyjnych powinno zmienić się po obrocie interferometru o 90 stopni. Efektu tego jednak nie zaobserwowano, co świadczy o tym, że prędkość rozchodzenia się światła na Ziemi nie zależy od kierunku jego rozchodzenia się.



Szczególna teoria względności

1. Jednostajny prostoliniowy ruch układu odniesienia nie ma wpływu na zachodzące w nim dowolne zjawiska fizyczne (mechaniczne, elektromagnetyczne i inne). Wszystkie inercjalne układy odniesienia są równouprawnione, nie można za pomocą żadnych doświadczeń fizycznych stwierdzić, czy dany układ pozostaje w spoczynku, czy porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym.
2. Prędkość światła w próżni nie zależy od prędkości obserwatora i źródła światła i jest jednakowa we wszystkich układach odniesienia.

Kosztym spełnienia tych postulatów jest zmiana definicji czasu i przestrzeni. Transformacja Galileusza zostaje zastąpiona **transformacją Lorentza**.



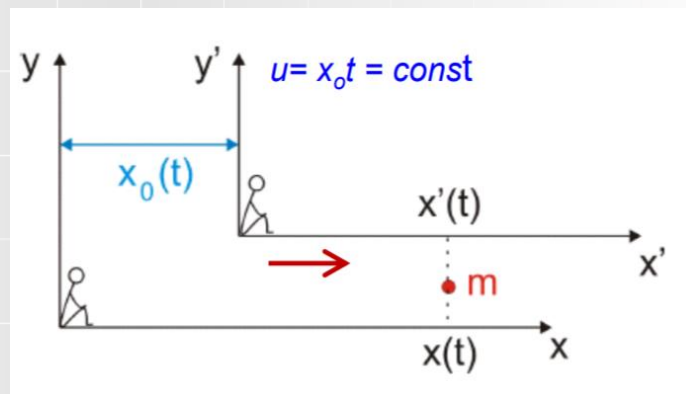
Transformacja Lorentza jako konsekwencja postulatów Einsteina

- Szukamy takiej transformacji współrzędnych, żeby w obu układach współrzędnych wiązka światła miała prędkość, czyli: jeśli: $\mathbf{x} = \mathbf{ct}$, to również: $\mathbf{x}' = \mathbf{ct}'$
- Otrzymamy ostatecznie transformacje, które spełniają nasze postulaty, w postaci:

$$x' = \gamma(x + ut), t' = \gamma\left(t + \frac{u}{c^2}x\right)$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

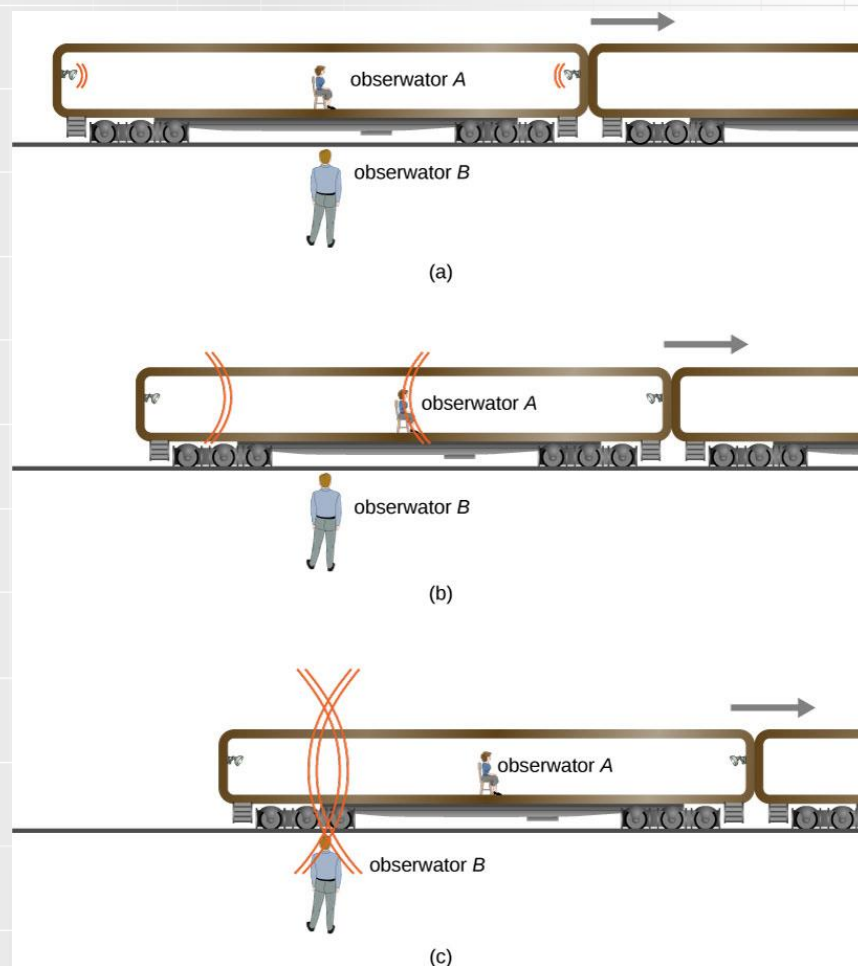
- I transformacje przeciwne:
 $x = \gamma(x' - ut'), t = \gamma\left(t' - \frac{u}{c^2}x'\right)$





Względność jednoczesności zdarzeń

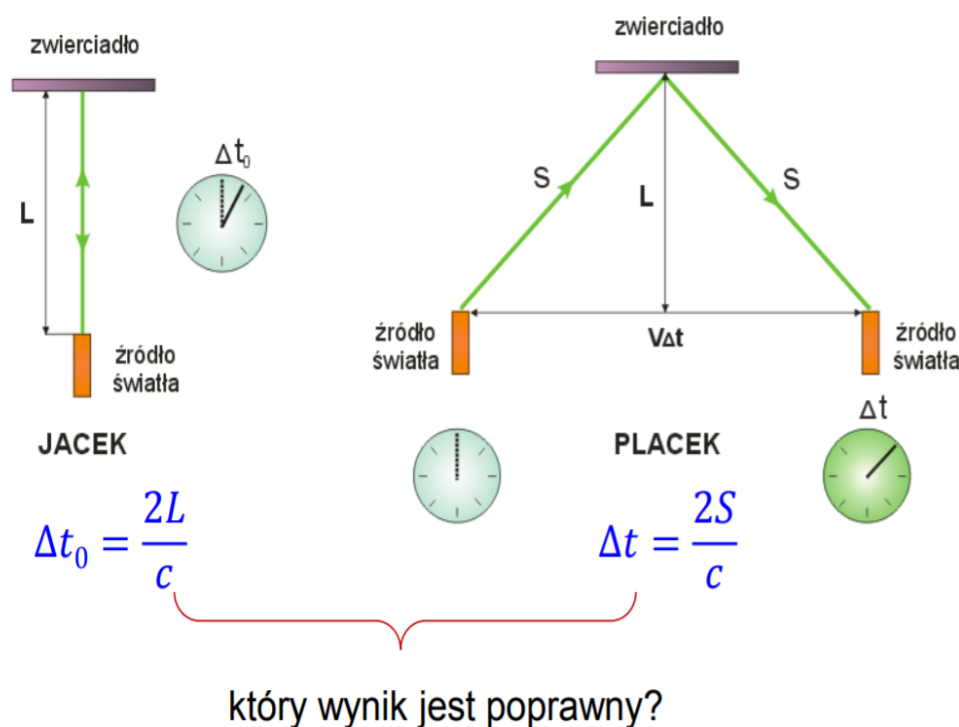
- a) Dwa impulsy świetlne emitowane w tym samym czasie względem obserwatora B.
- b) Ze względu na ruch wagonu obserwatora A jako pierwszy obserwuje on impuls wyemitowany przez prawą lampę, z czego wnioskując, że emisja nie była jednoczesna.
- c) Impulsy docierają równocześnie do obserwatora B.





Dylatacja czasu

- Odcinki czasu mają różne wartości w różnych układach odniesienia.
- Problem z dodawaniem prędkości – obserwator (Placek) stoi na peronie i widzi, jak światło (wysłane przez Jacka) biegnie w odjeżdżającym pociągu



W układzie Placeka światło przebywa dłuższą drogę – czas powinien też być dłuższy. Czas zmierzony w układzie Jacka to czas własny t_0 .

Dylatacja czasu to różnica w czasie zmierzonym przez Placeka i Jacka: $t - t_0$

Oba wyniki są poprawne – przykład czas życia mionu (zadanie 1 – H6)!



Przykład 8.1

Dylatacja czasu

Amerykański bezzałogowy statek powietrzny HTV-2 (ang. Hypersonic Technology Vehicle 2) może się poruszać lotem szybującym z prędkością 21 000km/h (5830m/s). Jeżeli zegar elektroniczny znajdujący się na pokładzie HTV-2 zmierzy upływ dokładnie 1s, to jaki czas przelotu zmierzą naukowcy w laboratorium na Ziemi?

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = 1.000000000189 \text{ s} \approx \Delta t_0$$

Prędkość statku jest zbyt mała aby uwzględniać efekty relatywistyczne!



Przykład 8.2

Prędkości relatywistyczne

Z jaką prędkością musi się przemieszczać pojazd, aby w czasie jednej sekundy mierzonej na zegarku jego pasażera pomiar ten różnił się od pomiaru obserwatora znajdującego się poza pojazdem o 1%?

$$\Delta t = \gamma \Delta t_0 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$\frac{\Delta t_0}{\Delta t} = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow v = c \sqrt{1 - \frac{\Delta t_0^2}{\Delta t^2}} = 0.14c$$

Aby efekty relatywistyczne były znaczące ciało musi poruszać się z prędkością równa około 10% prędkości światła.

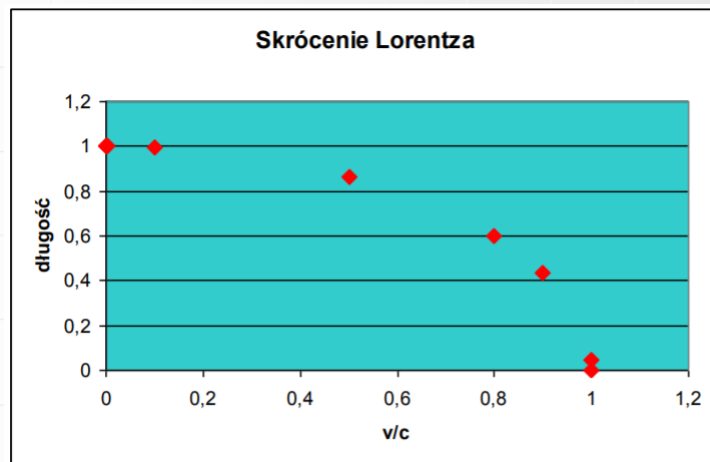
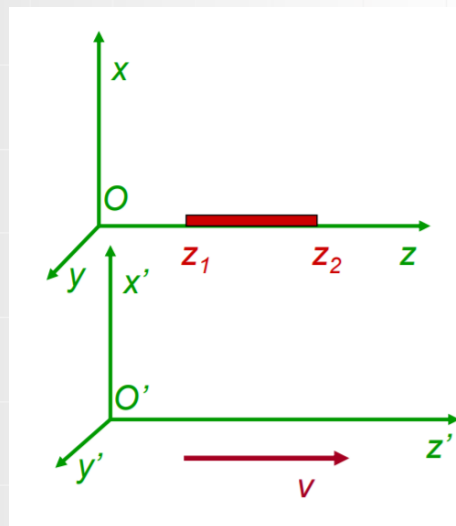


Skrócenie długości

- W układzie własnym mierzymy największą długość i najkrótszy czas.
- Pomiar długości w dwóch układach odniesienia:
W układzie, w którym pręt spoczywa: $l = z_2 - z_1$
ale układzie poruszającym się: $l' = z_2' - z_1'$

$$z_1 = \frac{z_1' + vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}},$$

$$z_2 = \frac{z_2' + vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



$$z_2 - z_1 = \frac{z_2' - z_1'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$l' = l * \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{l}{\gamma}$$



Przykład 8.3

Skrócenie długości

Założmy, że astronauta porusza się z taką prędkością, że $\gamma=30$:

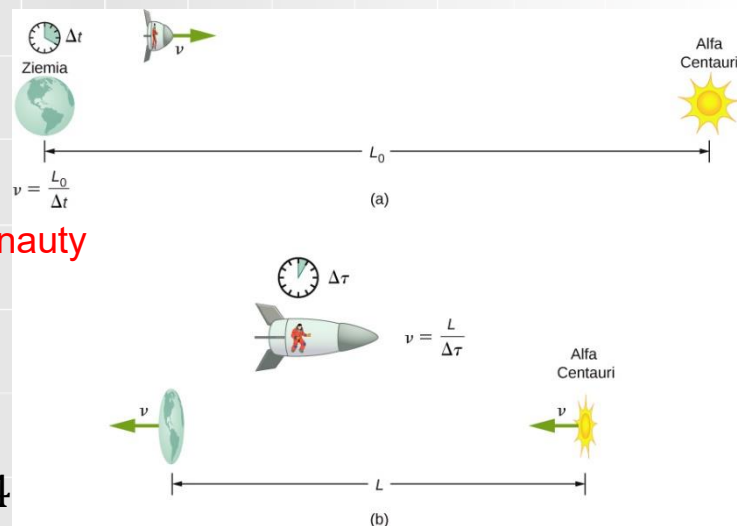
- a) Astronauta podróżuje z Ziemi do najbliższego układu planetarnego – Alfa Centauri, który jest oddalony o 4,3 roku świetlnego (mierzone przez obserwatora na Ziemi). Jak daleko są od siebie Alfa Centauri i Ziemia względem układu odniesienia związanego z astronautą?
- b) Jaka jest prędkość astronauty względem Ziemi? Wynik podajmy w jednostkach c . Pomińmy ruch Ziemi wokół Słońca (rysunek).

a) $L = \frac{L_0}{\gamma} = \frac{4.3ly}{30} = 0.14ly$ (*skrócenie długości*)

Mierzona przez obserwatora odległość między Ziemią, a Alfą jest odległością własną, gdyż znajduje się on na Ziemi i oba ciała niebieskie są dla niego nieruchome. Z punktu widzenia astronauty Ziemia i Alfa poruszają się ze stałą prędkością, a więc odległość między nimi ulega skróceniu.

b)

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}} = \sqrt{1 - \frac{1}{30^2}} = 0.99944$$





Składanie prędkości

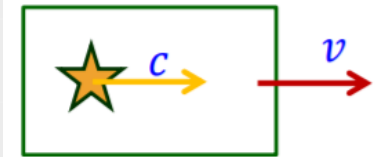
- Galileusz: $u = u' + v$

- Einstein: $\frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{\frac{\Delta x'}{\Delta t'} + v}{1 + \frac{v \Delta t'}{c^2}} = \frac{u' + v}{1 + \frac{vu'}{c^2}}$

~~$c = c + c$~~

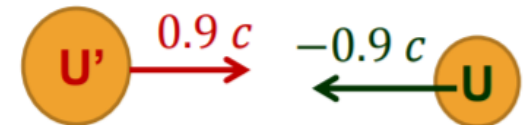
Przykład 8.4: Światło w poruszającym się pociągu ma prędkość:

$$c = \frac{c + c}{1 + \frac{c * c}{c^2}} = \frac{2c}{1 + \frac{c^2}{c^2}} = c$$



Przykład 8.5: Dwie cząstki poruszające się w przeciwnych kierunkach z $v = 0.9 c$:

$$v = \frac{v + u}{1 + \frac{v * u}{c^2}} = \frac{1.8c}{1 + 0.9^2} = 0.994c$$





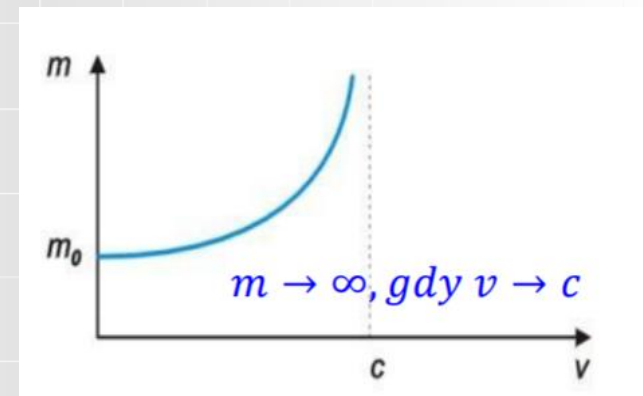
Relatywistyczny pęd

- Klasycznie: $p = mv = m \frac{\Delta x}{\Delta t}$
- Relatywistycznie: czas – czas własny $\Delta t_0 = \frac{\Delta t}{\gamma}$ i nowa def pędu:

$$p = m_0 \frac{\Delta x}{\Delta t} \gamma = \gamma m_0 v = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} v = mv$$
$$p = \gamma m_0 v$$

Masa relatywistyczna m cząstki rośnie z jej prędkością: dla $v \rightarrow 0$; $m \rightarrow m_0$,
 m_0 – masa spoczynkowa

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m_0$$





Energia relatywistyczna

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow m^2 \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right) = m_0^2$$

$$m^2 c^2 = m^2 v^2 + m_0^2 c^2$$

$$m^2 c^4 = m^2 v^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

$$m^2 c^4 = p^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

$$(\gamma m c^2)^2$$

Energia spoczynkowa

Całkowita energia ciała jest
równa iloczynowi jego masy
relatywistycznej i kwadratu
prędkości światła w próżni

$$E^2 - (pc)^2 = m_0^2 c^4$$

Niezmiennik relatywistyczny

Energia kinetyczna

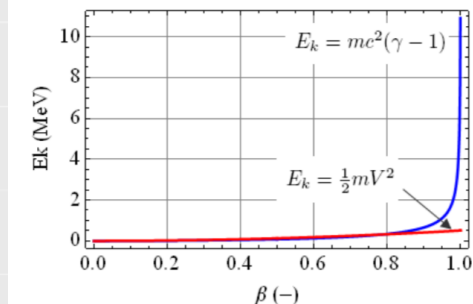
Energia całkowita

$$E = mc^2$$

$$\gamma m_0 c^2 = \frac{m_0 v^2}{2} + m_0 c^2$$

$$E_k = E - m_0 c^2$$

$$E_k = mc^2(\gamma - 1)$$



co oznacza, że ciało o niezerowej masie
spoczynkowej, porusza się z $v < c$



Słowniczek

inercjalny układ odniesienia (ang. inertial frame of reference)

– jest takim układem odniesienia, gdzie ciało spoczywające pozostaje w spoczynku, a ciało będące w ruchu porusza się ze stałą prędkością po linii prostej, jeżeli nie działają na nie siły zewnętrzne.

układ spoczynkowy

– układ odniesienia, w którym obserwator jest w spoczynku względem danego obiektu

teoria względności

– zajmuje się pomiarami zdarzeń: ustalenia gdzie i kiedy one zachodzą; ponadto zajmuje się transformacjami wyników pomiarów tych wielkości między poruszającymi się względem siebie układami odniesienia.

szczególna teoria względności

– dotyczy tylko inercjalnych układów odniesienia.

pierwszy postulat Einsteina

– Prawa fizyki są takie same we wszystkich inercjalnych układach odniesienia.

doświadczenie Michelsona-Morleya

– (ang. Michelson-Morley experiment) dowiodło, że prędkość światła w próżni nie zależy od ruchu Ziemi wokół Słońca.

drugi postulat Einsteina

– Światło w próżni rozchodzi się z tą samą prędkością c we wszystkich kierunkach w każdym inercjalnym układzie odniesienia.



Słowniczek

eter

- miał być ośrodkiem fizycznym, ale nie posiadającym masy, według teorii XIX-wiecznych (zakładano, że światło rozchodzi się w jakimś hipotetycznym ośrodku)

zdarzenie

- zjawisko w czasie i przestrzeni opisane przez współrzędne czasowe i przestrzenne (x, y, z, t) , obserwowane względem pewnego układu odniesienia

dylatacja czasu

- to wydłużenie badanego odcinka czasu związane z różnicą w pomiarze dokonywanym jednocześnie w dwóch różnych układach odniesienia, z których jeden porusza się względem drugiego.

czas własny

- to czas mierzony w układzie, w którym zdarzenia zachodzą w tym samym miejscu.

długość własna L_0

- odległość między dwoma punktami mierzona przez obserwatorów będących w spoczynku względem obu punktów (czyli w ich układzie spoczynkowym); na przykład długość ogona myszy laboratoryjnej mierzona przez biologów

skrócenie długości

- zmniejszenie obserwowanej długości L zdarzenia w stosunku do jego długości własnej L_0 , gdy długość ta mierzona jest w układzie odniesienia poruszającym się z prędkością względną v



Słowniczek

pęd relatywistyczny

– jest klasycznym momentem pędu pomnożonym przez relatywistyczny czynnik γ .

prędkość światła

– żadne ciało o niezerowej masie nie może osiągnąć prędkości światła (ang. speed of light).

masa spoczynkowa

– masa obiektu mierzona przez obserwatora pozostającego w spoczynku w stosunku do danego obiektu (dla odróżnienia od masy relatywistycznej, określenia używanego w starszych podręcznikach; obecnie niekonieczny jest tu przymiotnik „spoczynkowa”)

transformacja Galileusza

– przekształcenie współrzędnych przestrzennych i czasowych pewnego zdarzenia z jednego układu odniesienia na drugi, zgodne z mechaniką klasyczną

transformacja Lorentza

– przekształcenie współrzędnych przestrzennych i czasowych pewnego zdarzenia z jednego układu odniesienia na drugi, zgodne ze szczególną teorią względności



Praca domowa

- wytyczne

1. Format: plik pdf lub skan/zdjęcie (upewnij się, że Twoje pismo jest czytelne!)
2. Czytaj uważnie polecenia i wykonuj zawarte w nich zadania.
3. Pamiętaj aby **podpisać** swoją pracę.
4. Do rozwiązania dołącz:
 1. Rysunek – szkic sytuacji przedstawionej w zadaniu lub wykres wraz z danymi z zadania.
 2. Obliczenia – razem z przekształceniami wzorów, jeśli jest to konieczne.
 3. Wnioski sformułowane na podstawie dokonanej analizy.
5. Pamiętaj aby przesłać rozwiązania w terminie na adres email prowadzącej.



Wrocław
University
of Science
and Technology

Terminy

		PAŹDZIERNIK					LISTOPAD					GRUDZIEŃ				STYCZEŃ				LUTY			
PN	28	5	12	19	26	2	9	16	23	30	7	14	21	28	4	11	18	25	1 Pn N	8	15	22	
WT	29	6	13	20	27	3	10	17	24	1	8	15	22 Śr P	29	5	12	19	26	2	9	16	23	
ŚR	30	7	14	21	28	4	11	18	25	2	9	16	23	30	6	13	20	27	3	10	17	24	
CZ	1	8	15	22	29	5	12	19	26	3	10	17	24	31	7	14	21	28	4	11	18	25	
PT	2 Pn	9 wt P	H1 16	H2 23	H3 30	H4 6	H5 13 Śr P	TEST 20	27	H6 4	H7 11	H8 18	25	1	H9 8	H10 15	Egzamin 22	29	5	12	19	26	
SO	3	10	17	24	31	7	14	21	28	5	12	19	26	2	9	16	23	30	6	13	20	27	
N	4	11	18	25	1	8	15	22	29	6	13	20	27	3	10	17	24	31	7	14	21	28	
P - PARZYSTY N - NIEPARZYSTY	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	P	N	

H6: 4.12.20 godz. 12:00

Email: sylvia.majchrowska@pwr.edu.pl