



12 10 2003

7. Fizyka relatywistyczna - II

6.2. Mechanika relatywistyczna:

- masa, pęd i siła relatywistyczna,
- kinetyczna energia relatywistyczna,
- energia relatywistyczna,
- czasoprzestrzeń jako element ogólnej teorii względności:
 - zasada równoważności,
 - zakrzywienie światła przez masę,
 - grawitacyjne spowolnienie czasu,
 - ogólna teoria grawitacji.
- Ogólna (Einstein) a szczególna (Newton) teoria grawitacji.



Masa, pęd i siła relatywistyczna

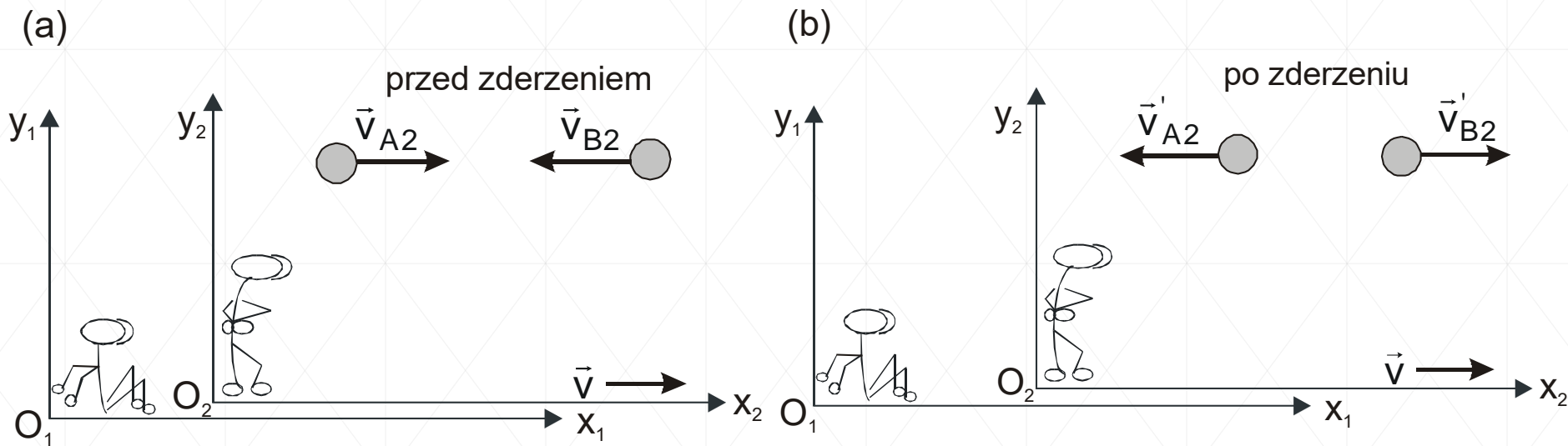
W mechanice klasycznej prawo zachowania pędu ($\mathbf{p} = m\mathbf{v}$) dla izolowanego układu cząstek jest najbardziej fundamentalnym prawem fizyki - izolowany układ cząstek m_1, m_2, \dots, m_n , nie podlegający działaniu sił zewnętrznych, będzie zachowywał się w czasie i przestrzeni w taki sposób, że:

$$\sum_i m_i \mathbf{v}_i = \text{const}$$

Kiedy zdarzenie obserwuje się z różnych, poruszających się układów odniesienia, nie ma powodu oczekiwać, że przestrzeń stanie się niejednorodna. Musimy zobaczyć, jak zachowuje się powyższe równanie gdy zastosujemy transformację Lorentza dla poruszających się układów współrzędnych.

Przewidując komplikacje dotyczące masy jakie mogą powstać, przy tym przekształceniu, przypisujemy masie specjalny symbol m_0 .

Masa m_0 jest masą ciała w spoczynku, mierzoną w nieruchomym układzie odniesienia i nosi nazwę masy spoczynkowej.



W. Moebs, S. J. Ling, J. Sanny, Fizyka dla szkół wyższych, t.1-3, openstax, Polska, 2018

Rys. (a) Obserwator O_2 widzi dwie kule zблиżające się do siebie z jednakowymi prędkościami. (b) Obserwator O_2 będzie widział kule odskakujące z równymi ale przeciwnie skierowanymi prędkościami.

Rozważmy dwie identyczne i idealnie sprężyste kule w poruszającym się układzie O_2 , każda o masie spoczynkowej m_0 . W poruszającym się układzie O_2 , kule A i B mają prędkości odpowiednio równe

$$v_{A2} = V; \quad v_{B2} = -V$$

W wyrażeniach na prędkość zastosujemy transformację Lorentza, aby powiązać obserwacje tego samego zjawiska z obu układów.

Z transformacji Lorentza wynika, że w układzie O_1 (nieruchomym):

$$v_{A1} = \frac{v_{A2} + v}{1 + \beta(v_{A2}/c)} = \frac{V + v}{1 + \beta(V/c)} \quad v_{B1} = \frac{v_{B2} + v}{1 + \beta(v_{B2}/c)} = \frac{-V + v}{1 - \beta(V/c)} \quad (1, 2)$$

gdzie $\beta = v/c$

Jeżeli suma mas obserwowana z układu O_1 jest równa M , to ta masa pozostanie stała w procesie zderzenia i w chwili zderzenia mamy:

$$m_{A1}v_{A1} + m_{B1}v_{B1} = Mv \quad \text{gdzie:} \quad M = m_{A1} + m_{B1}$$

Zatem, podczas gdy obserwator O_2 widzi masy chwilowo w spoczynku, obserwator O_1 widzi, że poruszają się one z prędkością v . Z ostatniego równania mamy:

$$\begin{aligned} m_{A1}(v_{A1} - v_{B1}) &= M(v - v_{B1}) \\ m_{B1}(v_{B1} - v_{A1}) &= M(v - v_{A1}) \end{aligned} \quad (3)$$

Po zastosowaniu równań transformacyjnych (1, 2) i uproszczeniu, stosunek wyrażeń (3) wynosi

$$\frac{m_{A1}}{m_{B1}} = \frac{1 + \beta(V/c)}{1 - \beta(V/c)} \quad (4)$$

Korzystając z wyrażenia (1) otrzymujemy

$$v_{A1} = \frac{v_{A2} + v}{1 + \beta(v_{A2}/c)} = \frac{V + v}{1 + \beta(V/c)}$$

$$1 - \frac{v_{A1}^2}{c^2} = 1 - \frac{(V + v)^2}{c^2[1 + \beta(V/c)]^2}$$

co można przekształcić algebraicznie, otrzymując

$$\sqrt{1 - \frac{v_{A1}^2}{c^2}} = \frac{\sqrt{1 - \beta^2} \sqrt{1 - (V/c)^2}}{1 + \beta(V/c)}$$

Podobnie, korzystając z równania (2), otrzymujemy

$$v_{B1} = \frac{v_{B2} + v}{1 + \beta(v_{B2}/c)} = \frac{-V + v}{1 - \beta(V/c)}$$

$$\sqrt{1 - \frac{v_{B1}^2}{c^2}} = \frac{\sqrt{1 - \beta^2} \sqrt{1 - (V/c)^2}}{1 - \beta(V/c)}$$

Czynniki $[1 + \beta(V/c)]$ oraz $[1 - \beta(V/c)]$ mogą być teraz wyznaczone z powyższych równań i podstawione do równania (4):

$$\frac{m_{A1}}{m_{B1}} = \frac{1 + \beta(V/c)}{1 - \beta(V/c)}$$

Otrzymujemy w ten sposób następujące wyrażenie na stosunek dwóch mas widzianych z układu O_1

$$\frac{m_{A1}}{m_{B1}} = \frac{\sqrt{1 - (v_{B1}/c)^2}}{\sqrt{1 - (v_{A1}/c)^2}}$$

$$\frac{m_{A1}}{m_{B1}} = \frac{\sqrt{1 - (v_{B1}/c)^2}}{\sqrt{1 - (v_{A1}/c)^2}}$$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - (v/c)^2}$$

Zatem masa widziana z poruszającego się układu odniesienia nie jest równa m_o , ale jest odwrotnie proporcjonalna do czynnika Lorentza, który jest zawsze większy od 1, ale zbliża się do 1 gdy prędkość staje się bardzo mała w porównaniu z prędkością światła c . Pozwala to sformułować ogólne twierdzenie, że

$$m_{A1} \sqrt{1 - \frac{v_{A1}^2}{c^2}} = m_{B1} \sqrt{1 - \frac{v_{B1}^2}{c^2}} = m_o$$

Czyli

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma m_o$$

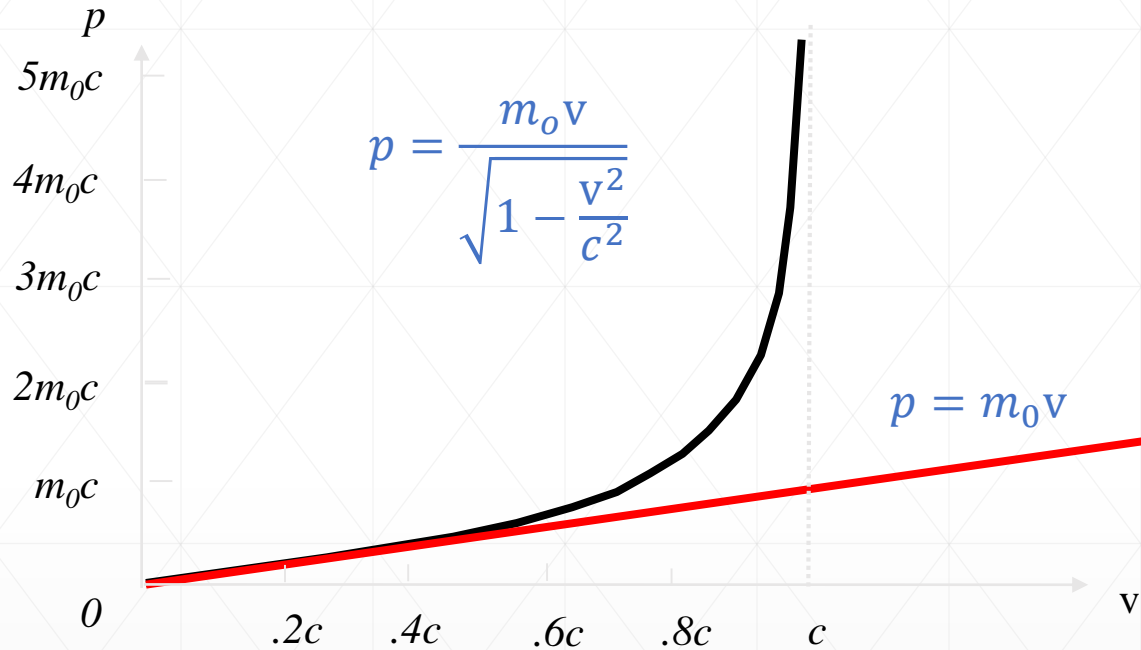
Masa ciała nie jest w ogólności stała ani taka sama dla wszystkich obserwatorów, ale jest wielkością która:

- zależy od układu odniesienia z jakiego jest obserwowana,
- jest równa m_o kiedy ciało jest w spoczynku w układzie odniesienia z którego jest obserwowane.

Właściwości czynnika Lorentza powodują, że masa staje się bardzo duża i w końcu zbliża się do nieskończoności, kiedy prędkość względna zbliża się do c . 7

Zgodnie ze wzorem na masę, wyrażenie relatywistyczne na pęd ma postać:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} = \gamma m_0 \mathbf{v}$$



Zaś zasada zachowania pędu układu izolowanego, przyjmuje postać:

$$\sum_{i=1}^n m_i \mathbf{v}_i = \sum_{i=1}^n \gamma m_{oi} \mathbf{v}_i = \text{const}$$

Definicja siły relatywistycznej

Chociaż prawa mechaniki klasycznej nie są na tyle uniwersalne, aby opisywały także zjawiska relatywistyczne, to drugie prawo Newtona

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(m\mathbf{v})$$

jest na tyle ogólne, że stosuje się również w mechanice relatywistycznej. Wykonanie różniczkowania po prawej stronie prowadzi do wyrażenia:

$$\mathbf{F} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \mathbf{v} \frac{dm}{dt}$$

gdzie m oznacza teraz γm_0 .

Kinetyczna energia relatywistyczna

Z zasady zachowania energii – praca wykonana nad układem zamkniętym równa jest przyrostowi jej energii. Niech cząstka swobodna o masie spoczynkowej m_0 zacznie się poruszać po drodze dx na skutek siły F , wówczas

$$E_k = \int F dx = \int m_0 \frac{d(\gamma v)}{dt} dx = m_0 \int \frac{d(\gamma v)}{dt} \frac{dx}{dt} dt = m_0 \int v \frac{d}{dt} \left(\frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) dt$$

Obliczmy prawą stronę tego równania wykonując całkowanie przez części

$$\int f(x) \cdot g'(x) dx = f(x) \cdot g(x) - \int f'(x) g(x) dx$$

$$\begin{aligned} E_k &= m_0 \left[\frac{v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \int \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \frac{dv}{dt} dt \right]_0^V = m_0 \left[\frac{v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right]_0^V = \\ &= \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 = m_0 c^2 \left[\frac{\frac{v^2}{c^2} + 1 - \frac{v^2}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right] - m_0 c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 c^2 \end{aligned}$$

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

Energia relatywistyczna

Równość masy i energii

$$E_k = mc^2 - m_0c^2 = (m - m_0) c^2$$

Energia całkowita

$$E = E_0 + E_k \Rightarrow E = m_0c^2 + (m - m_0) c^2 \Rightarrow E = mc^2$$

Zwróćmy uwagę, iż energia relatywistyczna nie zawiera pojęcia energii potencjalnej.

Pęd a energia cząstki

$$E_k = \frac{p^2}{2m} - \text{klasycznie}$$

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c^2)^2 - \text{relatywistycznie}$$

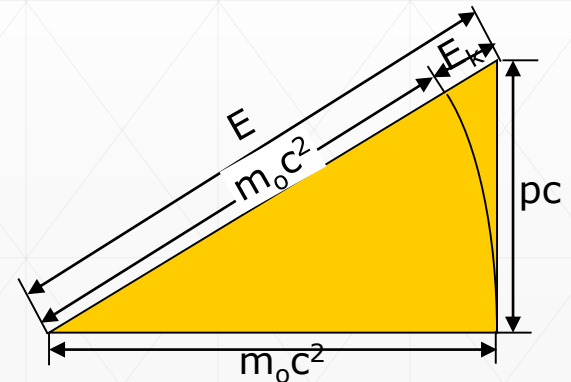


Diagram pomocniczy

Przykład 1

Obliczmy energię spoczynkową ciała o masie 1 g.

$$E_0 = m_0 c^2 = (10^{-3} \text{ kg}) \left(3 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 = 9 \cdot 10^{13} \text{ J}$$

Co odpowiada jednej 20-kilotonowej bombie atomowej. Jest 2-nie większa od bomby zrzuconej na Hiroszime i 10 000 większa od energii kinetycznej lotniskowca.

1kg odważnik = 1000 gramów = 1000 bomb 20 kT

Przykład 2

Niesprężyste zderzenie 2 kul o masie m_0 poruszających się przeciwnie z prędkością v



W. Moebis, S. J. Ling, J. Sanny, Fizyka dla szkół wyższych, t.1-3, openstax, Polska, 2018

Energia kul przed zderzeniem $E = 2mc^2 = 2m_0 c^2 + 2 \frac{m_0 v^2}{2}$

Po zderzeniu kule pozostają nieruchome $E = M_0 c^2$

Z zasady zachowania energii $(M_0 - 2m_0) c^2 = m_0 v^2$

$$m_0 v^2 > 0 \Rightarrow M_0 > 2m_0 \quad \Delta m = M_0 - 2m_0 = \frac{E_k}{c^2}$$

energia kinetyczna zamieniła się w energię wewnętrzną co spowodowało wzrost masy kul

- w skali makro $\Delta m \sim 10^{-13} \text{ m}$
- w skali kwantowej ($v \sim c$) $\Delta m \sim m$



Czasoprzestrzeń jako element ogólnej teorii względności

Theory of Special Relativity - STW rozwinięta przez Einsteina w 1905 r. dotyczy jedynie układów inercjalnych, natomiast **Theory of General Relativity** – OTW podana przez Einsteina w 20.03.1916 r. uwzględnia także układy poruszające się ruchem przyspieszonym. U jej podstaw leży pogląd, że skutki wywołane grawitacją i przyspieszeniem nie dadzą się rozróżnić – jest to współczesna teoria grawitacji.

W (W-03) stwierdziliśmy, że dla każdego obiektu ważne pojęcia to – **grawitacja** i **bezwładność**, które wiążą się ściśle z masą obiektu, która jest miarą ilości materii w nim zawartej.

Pojęcie masy związane jest z **bezwładnością** czyli zdolnością ciał do przeciwstawiania się zmianom ich ruchu (**II zasada Newtona** - ciało dąży do zachowania stanu spoczynku), stąd określenie masy jako tzw. **masy bezwładnej**.

Z drugiej strony **grawitacja** to oddziaływanie obserwowane jako przyciąganie mas w postaci siły ciężkości (**prawo grawitacji Newtona, 1687r.** – siła przyciągania jest wprost proporcjonalna do iloczynu mas a odwrotnie proporcjonalnej do kwadratu ich odległości), stąd określenie masy jako tzw. **masy ciężkiej**.

Ale dlaczego dwa „różne” określenia **jednej fizycznej** masy ????

STW – prędkość światła jest prędkością graniczną daje fundamentalne stwierdzenie, iż przestrzeń i czas nie są absolutne. Ma to istotne dwie konsekwencje dotyczące założeń dla praw Newtona.

I – odnośnie założenia Newtona, że grawitacja jest siłą działającą **natychmiastowo**, co oznacza, że sygnał bądź energia przekazywane są natychmiast od masy m_1 do masy m_2 .

W ten sposób naruszone jest jedno z podstawowych założeń teorii względności, że żaden sygnał (żadna postać energii) nie może się rozchodzić z prędkością większą od prędkości światła.

II – odnośnie założenia Newtona, że możliwe jest **oddzielnie traktowanie** masy: występującej w prawie powszechnego ciężenia oraz masy z II zasady dynamiki (masa ciężka i masa bezwładna).

OTW – „uwalnia” nas z założeń Newtona opisując **geometrię czasoprzestrzeni** (**space-time geometry**) oraz to jak masy i przyspieszenie oddziałują z czasoprzestrzenią i jak ją zakłócają.

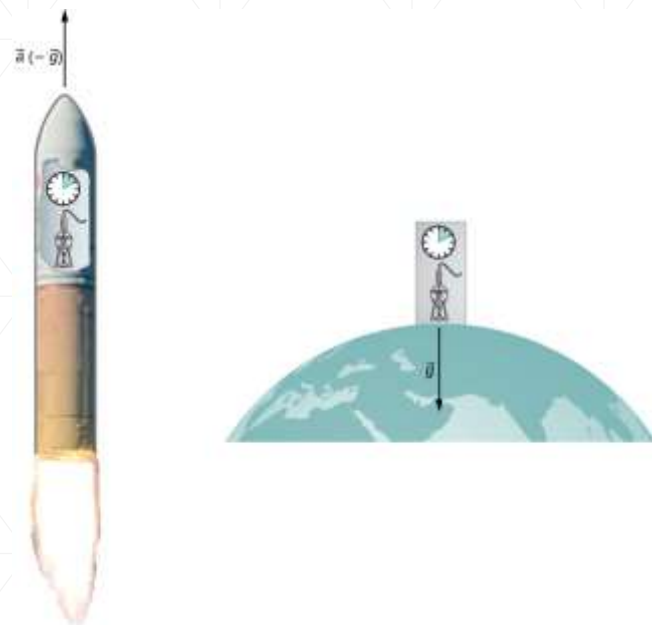
Grawitacja nie jest siłą działającą między dwoma ciałami, lecz jest wynikiem oddziaływania każdego ciała z efektami, jakie inne ciała wywierają na czasoprzestrzeń go otaczającą.

Zasada równoważności

Wyobraźmy sobie, że lecimy statkiem kosmicznym ze stałą prędkością względem Ziemi i gwiazd – w statku mamy stan nieważkości, wszystko może się swobodnie unosić, nie ma pojęcia „góra” , „dół”.

Włączamy silniki - **pojawiają się efekty podobne do grawitacji**. Ściana przylegająca do silników naciska na wszystkie obiekty wewnątrz kabiny i staje się podłogą, natomiast przeciwległa staje się sufitem.

Gdyby przyspieszenie a osiągnęło wartość g to pasażerom wydawałoby się, że statek nie porusza się a stoi na powierzchni Ziemi.



Wyniki wszystkich doświadczeń przeprowadzonych w jednorodnym polu grawitacyjnym w laboratorium są identyczne z wynikami takich samych eksperymentów, przeprowadzonych w jednostajnie przyspieszającym laboratorium.

Zasada równoważności

Obserwacje czynione w przyspieszającym układzie odniesienia są nieodróżnialne od analogicznych obserwacji w zwykłym polu grawitacyjnym

Zasada równoważności (Principle of Equivalence) – nie ma różnicy pomiędzy spadkiem swobodnym i przebywaniem w stanie nieważkości. Nie ma różnicy między jednorodnym polem grawitacyjnym i jednostajnym przyspieszeniem w przypadku braku grawitacji.

W. Moebs, S. J. Ling, J. Sanny, Fizyka dla szkół wyższych, t.1-3, openstax, Polska, 2018

Zakrzywianie światła przez masę

Wyobraźmy sobie, że do statku kosmicznego poruszającego się pionowo ruchem przyspieszonym wpuścimy poziomo promień światła – co widzi obserwator:

- dla obserwatora spoza statku promień będzie się poruszał po linii prostej,
- dla obserwatora wewnątrz światło porusza się po linii zakrzywionej w dół

Według Einsteina światło nie ma masy, ale ma energię -> pole grawitacyjne przyciąga energię świetlną gdyż jest ona równoważna masie

Równoważność masy i energii ($E=mc^2$) oznacza, że światło powinno ulegać przyciąganiu grawitacyjnemu.

Światło przebiegające w pobliżu Słońca na drodze porównywalnej ze średnicą Słońca równej $1,44 \times 10^9$ m w czasie $t = 1,44 \times 10^9 / c = 5$ s powinno "spaść" o $h = (1/2)g_s t^2 = 3,7 \times 10^3$ m, gdzie g_s oznacza przyśpieszenie w pobliżu Słońca. Wówczas kąt odchylenia promienia wynosi $\alpha = h/R_s = 5 \times 10^{-6}$ radiana czyli około 1,75 sekundy.

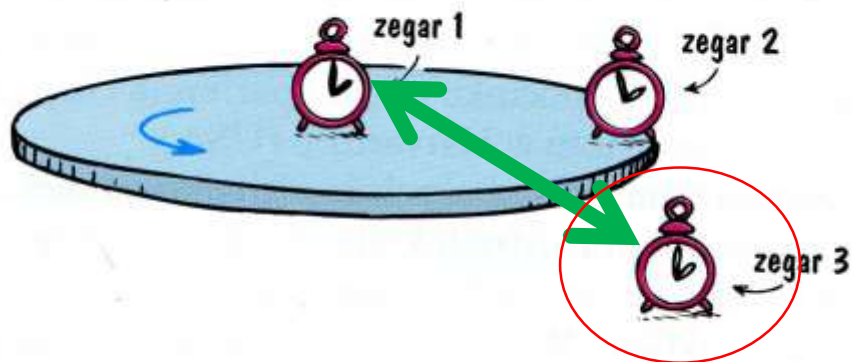
Zjawisko to zaobserwowano podczas zaćmienia Słońca (pierwszy raz w 1919) jako zmianę położenia pewnych gwiazd.

To był kolejny krok do sformułowania OTW:

- światło zakrzywia swój tor gdy się porusza w zakrzywionej czasoprzestrzeni
- zakrzywienie przestrzeni związane jest z obecnością masy.

Grawitacyjne spowolnienie czasu

Zgodnie z OTW grawitacja powoduje spowolnienie czasu.



W. Moebis, S. J. Ling, J. Sanny, Fizyka dla szkół wyższych, t.1-3, openstax, Polska, 2018

Na zegar 2 (brzegowy) działa siła odśrodkowa i to ona jest powodem wolniejszego chodu zegara brzegowego

Z zasady równoważności, w myśl której każdy efekt związany z przyspieszeniem ma swój odpowiednik grawitacyjny – dochodzimy do wniosku, że *ruch w kierunku zgodnym z polem grawitacyjnym musi powodować spowolnienie czasu*.

Dotyczy to wszystkich zegarów: fizycznych, chemicznych i biologicznych:

- urzędniczka pracująca na parterze wieżowca starzeje się wolniej jak jej bliźniaczka pracująca na ostatnim piętrze.
- W odniesieniu do atomów – atom na Słońcu emituje światło o niższej częstotliwości niż taki sam atom na Ziemi. → *grawitacyjne przesunięcie¹⁷ ku czerwieni*

Wyobraźmy sobie trzy zegary jak obok:

- zegar 1 i zegar 3 pokazują ten sam czas bo są nieruchome względem siebie
- Zegar 2 zachowuje się inaczej – porusza się względem ziemi i dlatego jego czas płynie wolniej. *Czyli mimo że zegary 1 i 2 znajdują się w tym samym układzie odniesienia ich wskazania nie są zgodne.*

W tym miejscu należy podkreślić, że czas jest względny zarówno w STW jak i w OTW. Ale ... **W obu teoriach nie jest możliwe wydłużenie własnego życia.**

Długość życia innych ludzi może ci się wydawać większa, o ile podróżują z dużymi prędkościami, lub gdy znajdują się w silnym polu grawitacyjnym.

Długość naszego życia może się zwiększyć ale tylko z punktu widzenia innych ludzi.

Zmiany czasu są zawsze postrzegane przez innych w OTW

Ogólna teoria grawitacji

Stwierdziłmy:

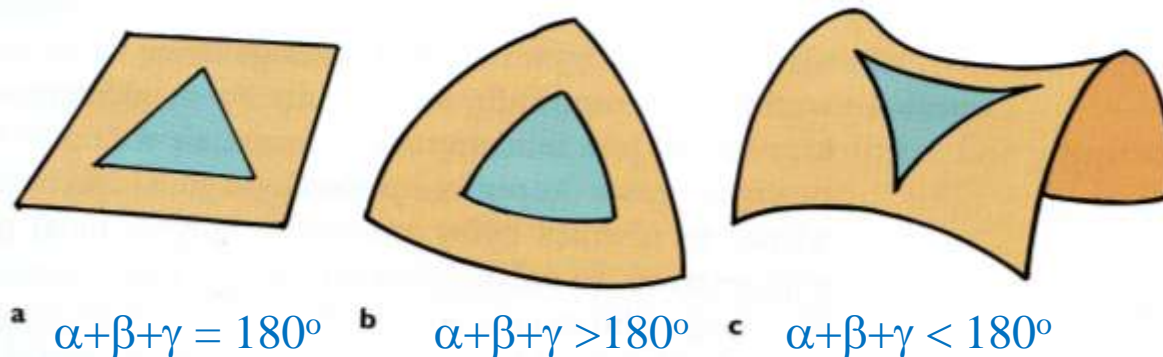
- zasada równoważności: przyspieszenie i grawitacja są "nierozróżnialne",
- równość masy i energii: zakrzywienie światła przez masę,
- grawitacja powoduje spowolnienie czasu,

Zatem czym jest grawitacja??

Popularne prawa geometrii euklidesowej [takie jak stosunek obwodu koła do jego średnicy jest zawsze równy π , suma kątów w trójkącie równa jest 180° , ...] mają zastosowanie do różnych figur rysowanych na kartce papieru. Prawa te odnoszą się do przestrzeni płaskiej. **Geometria euklidesowa jest geometrią płaskiej przestrzeni.**

Geometria euklidesowa - przestrzeń jest płaska (występuje w prawach Newtona).
 Jej cechy: linia prosta jest najkrótszą odległością pomiędzy dwoma punktami, suma kątów każdego trójkąta wynosi 180 stopni, linie równoległe nigdy się nie przecinają.

Jeśli figury (np. trójkąt) narysujemy na powierzchni zakrzywionej to ...



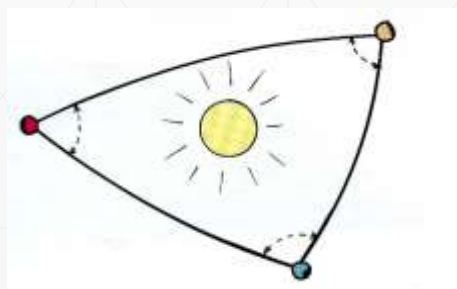
Matematyczny opis tego typu geometrii (tzw. geometrii nieeuklidesowych) podał B. Reimanna (1854r.), tzw. geometrie riemannowskie - wielowymiarowe uogólnienia klasyfikacji geometrii różniczkowej na dwuwymiarowych powierzchniach (zapoczątkowanej przez C.F. Gaussa).

Interwał przestrzenny:

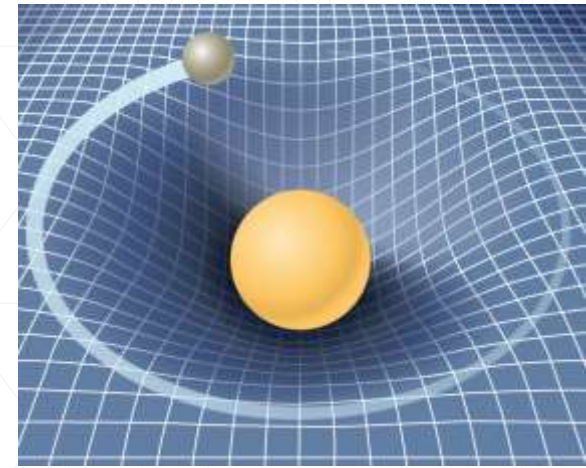
$$ds^2 = \sum_{\mu, \nu}^N g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

$g_{\mu\nu}$ – tensor metryczny

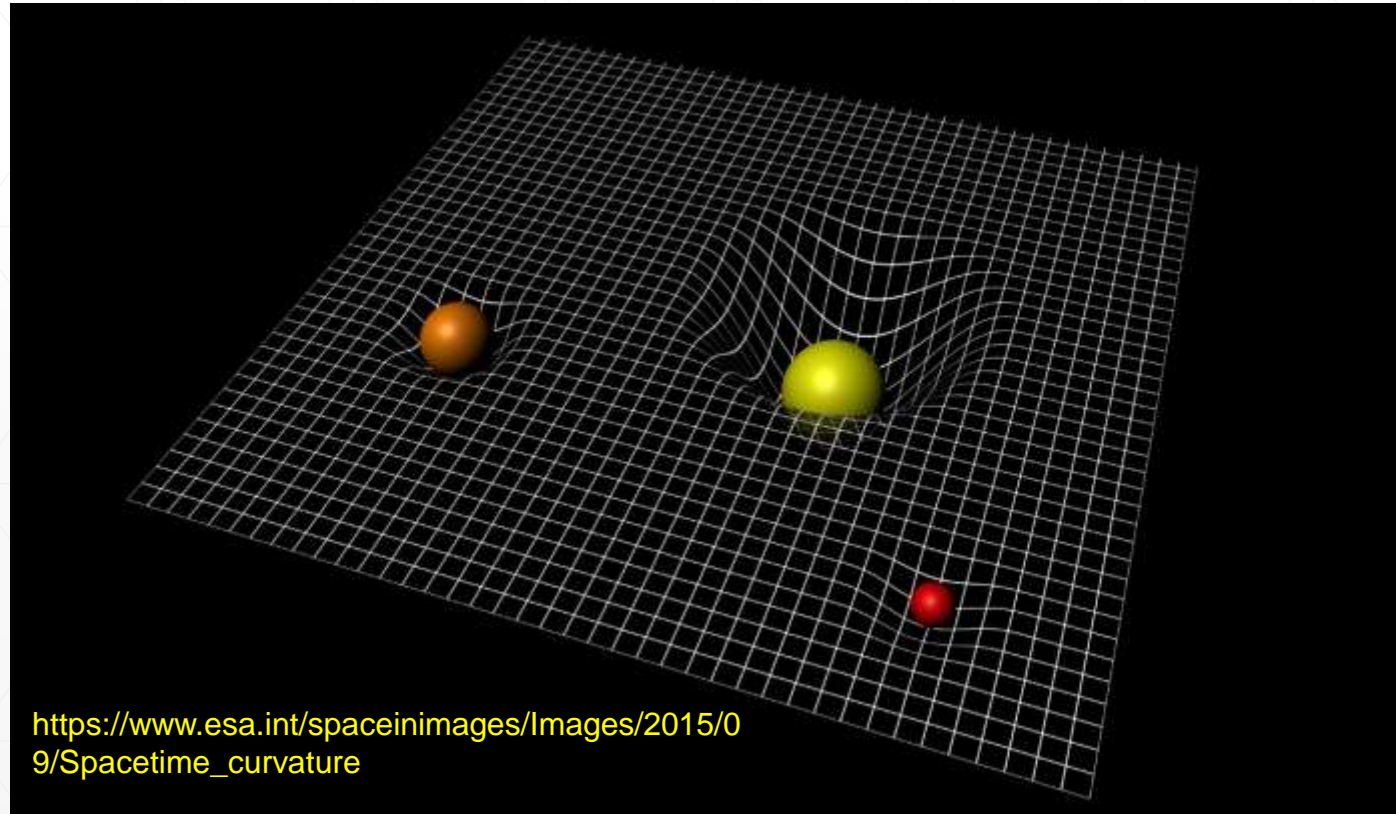
Promienie świetlne przebiegające między trzema planetami wyznaczają trójkąt. Ponieważ w pobliżu Słońca ulegają zakrzywieniu, suma kątów w tym trójkącie jest większa od 180°

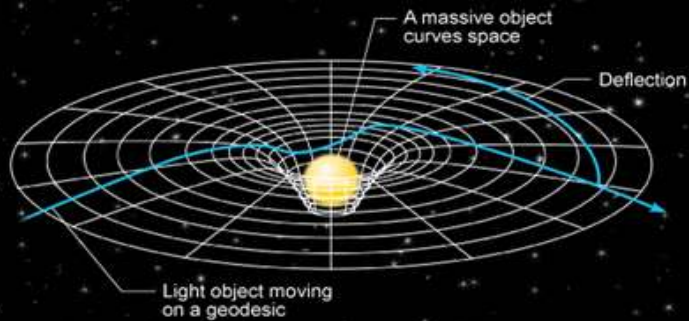


Zatem tylko pusta przestrzeń jest płaska (euklidesowa). Obecność masy lub energii ($E=mc^2$, konsekwencja STW), wg. OTW zakrzywia czas i przestrzeń wokół niej. Ruch każdego ciała posiadającego masę jest reakcją na zakrzywienie czasoprzestrzeni. Zatem masy a także promienie świetlne poruszają się po tzw. **liniach geodezyjnych**, które są najkrótszymi drogami pomiędzy dwoma punktami.

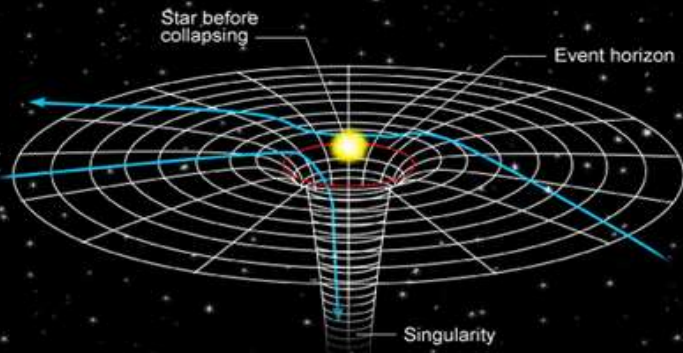


Obok pogładowe przybliżenie pomijające zakrzywienie czasoprzestrzeni przez mniejszą masę – w rzeczywistości obie masy są w ruch wokół ich wspólnego środka masy. W konsekwencji przestrzeń nie jest euklidesowa.





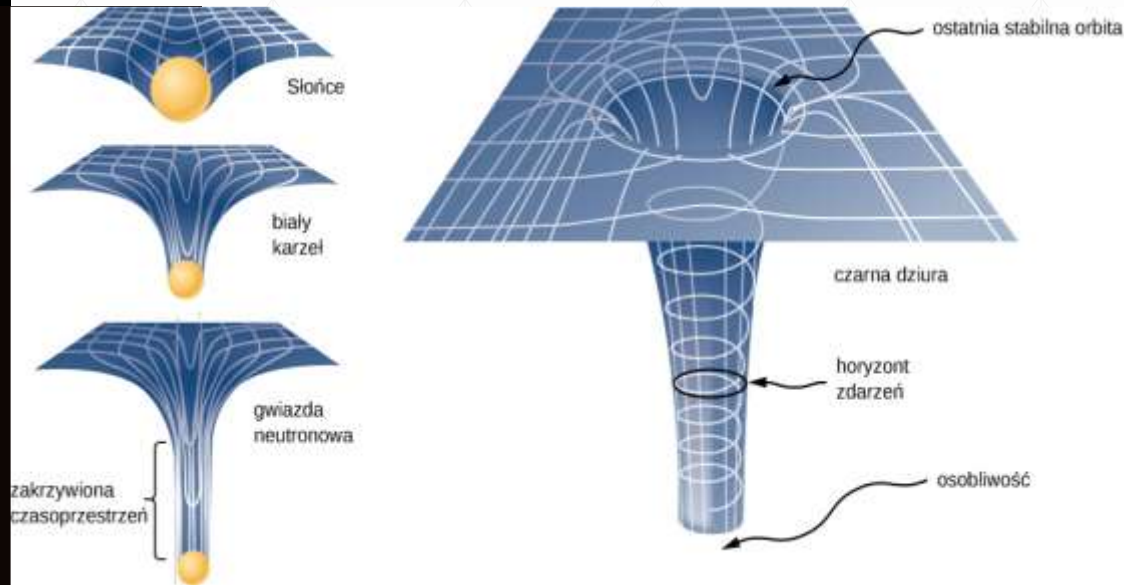
<https://physics.aps.org/articles/v2/71>



Im masa bardziej skupiona tym zakrzywienie jest większe – w granicznym przypadku światło nie może opuścić obszaru obiektu powstaje tzw. **czarna dziura** (John Wheeler). **Black hole** powstaje dla dostatecznie gęstego obiektu, który zapada się pod wpływem własnej grawitacji i jest otoczony **horyzontem zdarzeń** (**event horizon**). Cokolwiek znajdzie się w jego wnętrzu, nawet światło, nie może uciec spod wpływu przyciągania grawitacyjnego czarnej dziury (Karl Schwarzschild – 1916)

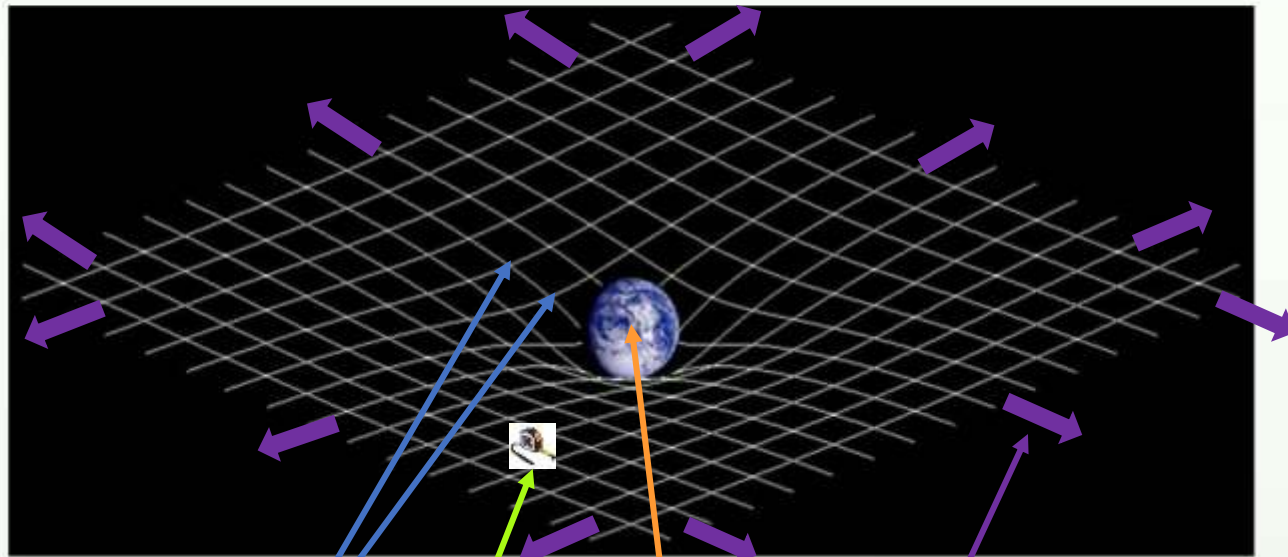
$$R_s = \frac{2GM}{c^2}$$

Słońce z 700 0000 km do 3 km
Ziemia → 2 cm



Cień czarnej dziury w centrum galaktyki M87
(EHT 10.04.2019)

Einstein field equations



https://en.wikipedia.org/wiki/File:Spacetime_curvature.png

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} - \Lambda g_{\mu\nu}$$

opisuje jak zmienia się krzywizna z pkt. do pkt.

opisuje jak liczyć odległość przy danej krzywiznie w pkt.

źródło zakrzywienia czasoprzestrzeni

dodany przez Einsteina dla zachowania stabilności wszechświata

$R_{\mu\nu}$ - tensor krzywizny Ricci

R - skalar krzywizny

$g_{\mu\nu}$ tensor metryczny

G - stała grawitacji Newtona

$T_{\mu\nu}$ - tensor energii-pędu

Λ - stała kosmologiczna

Teoria grawitacji: ogólna (Einstein) a szczególna (Newton)

OTW podstawa astrofizyki (kosmologii) – nauki o powstaniu, rozmiarach i budowie Wszechświata:

Wyjaśnia takie zjawiska jak:

- zwiększenie długości fali przy emitowaniu światła przez ciała o dużej masie,
- zakrzywienie promienia świetlnego ku Słońcu przechodzącego w pobliżu jego powierzchni,
- mechanizm powstawania "czarnych dziur" (specjalnego typu gwiazd),
- przyczynę wzajemnego „uwięzienia” gwiazd i planet.

Teoria grawitacji Newtona jako podstawa opisu zjawisk w klasycznej mechanice:

Wyjaśnia takie zjawiska jak:

- oddziaływania ciał w układzie słonecznym,
- orbity komet i asteroidów,
- istnienie innych nie odkrytych planet,
- tory sond wysyłanych w kierunku Księżyca i Marsa.

Pole grawitacyjne tych ciał jest bardzo słabe i czasoprzestrzeń w ich pobliżu jest prawie płaska.

Podsumowanie:

Mechanika relatywistyczna

- masa $m=\gamma m_0$ zależy od:
 - układu odniesienia z jakiego jest obserwowana,
 - jest równa m_0 kiedy ciało jest w spoczynku w układzie z którego jest obserwowane.
- pęd $p=\gamma m_0 v$ w odróżnieniu od ujęcia klasycznego rośnie nieliniowo z prędkością
- siła $F=mdv/dt+vdm/dt$ – dla prędkości zbliżającego się do prędkości światła staje się nieskończenie wielka
- energia kinetyczna $E_k=(m-m_0)c^2$
- energia całkowita $E=mc^2$ – nie zawiera energii potencjalnej i jest równoważna masie

Ogólna teoria względności – teoria grawitacji:

- zgodnie z **zasadą równoważności**, obserwacje czynione w przyspieszającym układzie odniesienia są nieodróżnialne od analogicznych obserwacji w zwykłym polu grawitacyjnym,
- masa i przyspieszenie zakrzywiają czasoprzestrzeń i w pewnych warunkach są one nierozróżnialne,
- zakrzywienie światła przez masę - wg. Einsteina światło nie ma masy, ale ma energię -> pole grawitacyjne przyciąga energię świetlną gdyż jest ona równoważna masie,
- grawitacyjne spowolnienie czasu - zgodnie z STW ruch powoduje spowolnienie czasu. Korzystając z zasady równoważności, w myśl której każdy efekt związany z przyspieszeniem ma swój odpowiednik grawitacyjny – musimy dojść do wniosku, że ruch w kierunku zgodnym z polem grawitacyjnym musi powodować spowolnienie czasu,

- grawitacja jest wynikiem zakrzywienia czasoprzestrzeni wywołanym lokalnym rozkładem energii (mas),
- czarne dziury, będące skutkiem grawitacyjnego zapadnięcia się masywnych obiektów, są osobliwością otoczoną horyzontem zdarzeń, którego promień jest proporcjonalny do ich masy.
- grawitacja nie jest siłą działającą między dwoma ciałami, lecz **jest wynikiem oddziaływania** każdego ciała z efektami, jakie inne ciała wywierają na czasoprzestrzeń go otaczającą.



17 10 2003