

*„W dobrej edukacji nie chodzi o wkuwanie
wielu faktów, lecz o wdrożenie umysłu do myślenia”*

Albert Einstein

ELEMENTY OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI

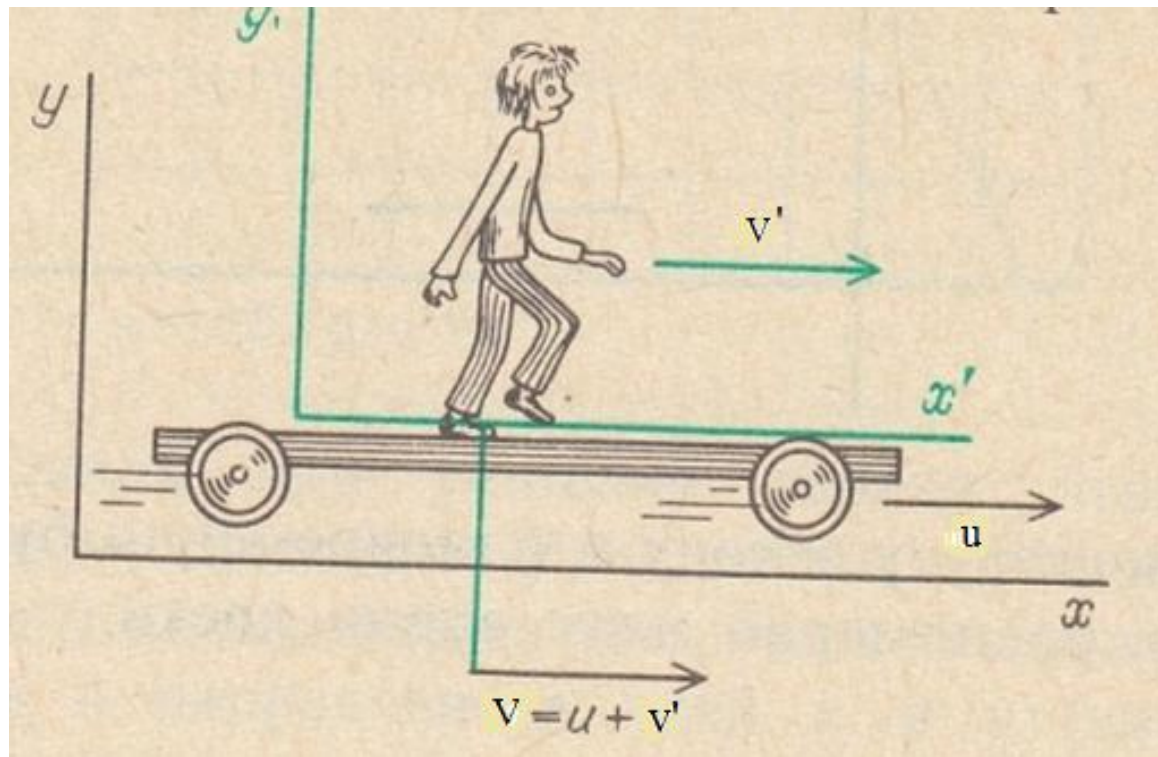
Podstawa tej teorii – zasada równoważności

Zakrzywienie przestrzeni

**Eksperymenty potwierdzające przewidywania ogólnej
teorii względności**

Obserwując otaczający nas świat, nabieramy określonych przekonań o zjawiskach w nim zachodzących. Nabieramy tak zwanego „zdrowego rozsądku”, dzięki któremu nie mamy wątpliwości, że jeśli wózek jedzie z prędkością względem obserwatora stojącego na ziemi z prędkością u (jak na rysunku), zaś chłopak idzie po platformie wózka z prędkością v' względem wózka, to porusza się on względem ziemi z prędkością

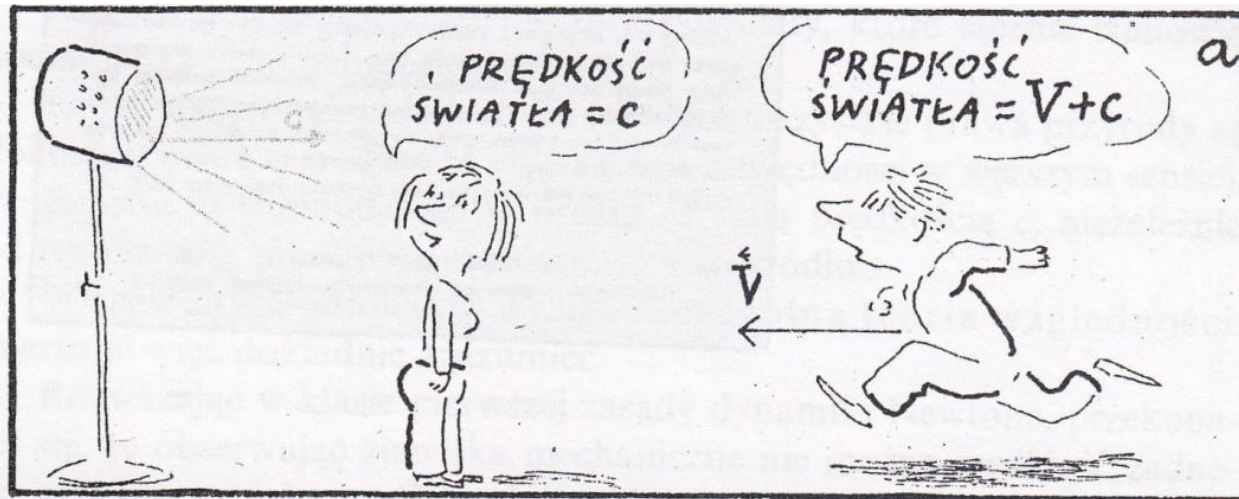
$$v = u + v'.$$



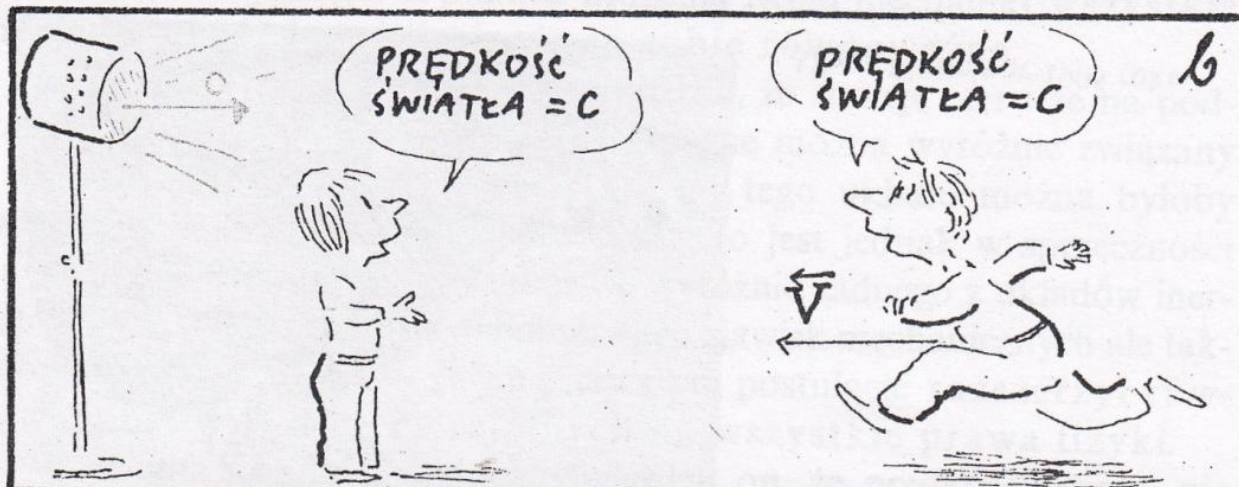
Postulat Einsteina podstawą szczególnej teorii względności

Prędkość światła jest niezależna od ruchu jego źródła względem układu odniesienia, w którym jest ona mierzona.

Innymi słowy: wszyscy obserwatorzy otrzymają jednakową wartość prędkości światła w próżni niezależnie od ich względnej prędkości.

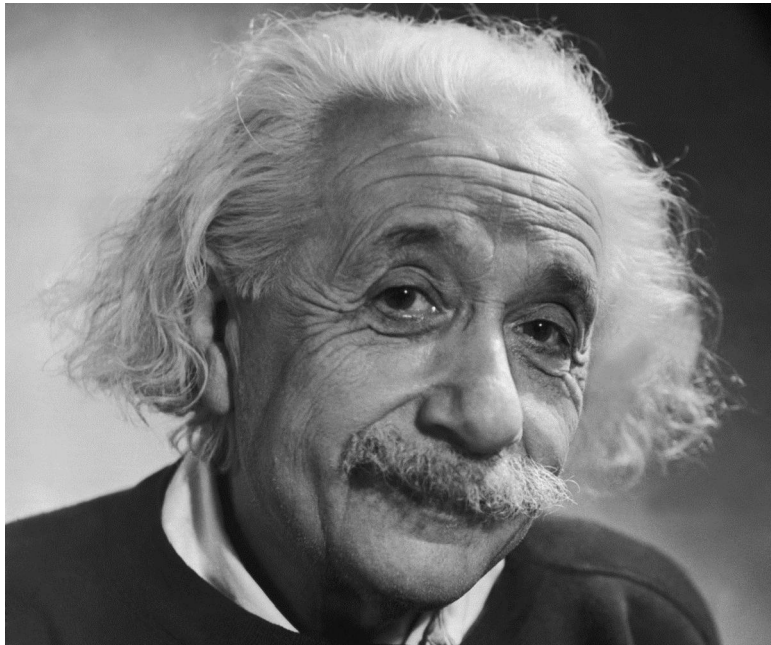


a) zgodnie ze „zdrwym rozsądkiem”



b) według postulatu Einsteina

Albert Einstein o zdrowym rozsądku



*„Zdrowy rozsądek to
suma przesądów,
których nabywamy
przed ukończeniem 18
lat.”*

Albert Einstein (1879 – 1955)

Teoria względności: szczególna -1905 r. (przedstawiona na poprzednich wykładach), oraz **ogólna teoria względności – 1915 r.**

Szczególna teoria względności dotyczy świata wyidealizowanego, świata bez planet, bez grawitacji

Ogólna teoria względności zajmuje się układami odniesienia przyspieszonymi względem siebie oraz grawitacją. Wymaga ona stosowania zaawansowanej matematyki.

Elementy ogólnej teorii względności: zasada równoważności

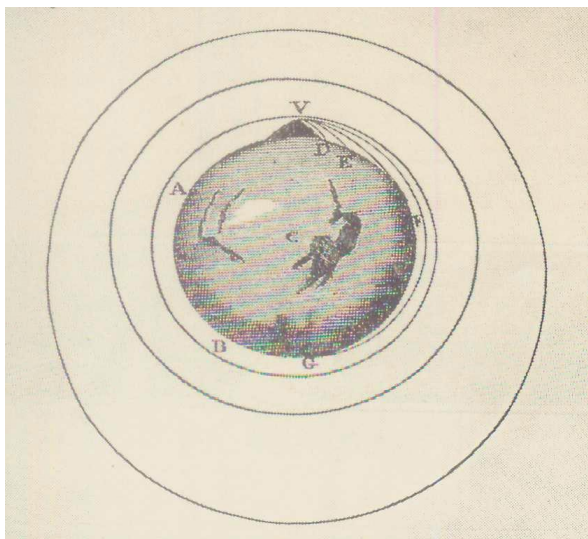
Siła przyciągania przez Ziemię $F = G \cdot \frac{M_z m_g}{R^2}$, $g = G \cdot \frac{M_z m_g}{R^2 \cdot m_g} = G \cdot \frac{M_z}{R^2}$.

$$\mathbf{a} = \frac{\mathbf{F}}{m_b} = \frac{m_g \cdot \mathbf{g}}{m_b}, \text{ skoro } m_g = m_b, \text{ to } \mathbf{F} = m_g \cdot \mathbf{g} \quad \mathbf{a} = \mathbf{g}$$

Wszystkie ciała spadają z jednakowym przyspieszeniem niezależnie od ich masy.

Jest to fakt zdumiewający!

Tak samo spada słoń jak liść lub piórko.

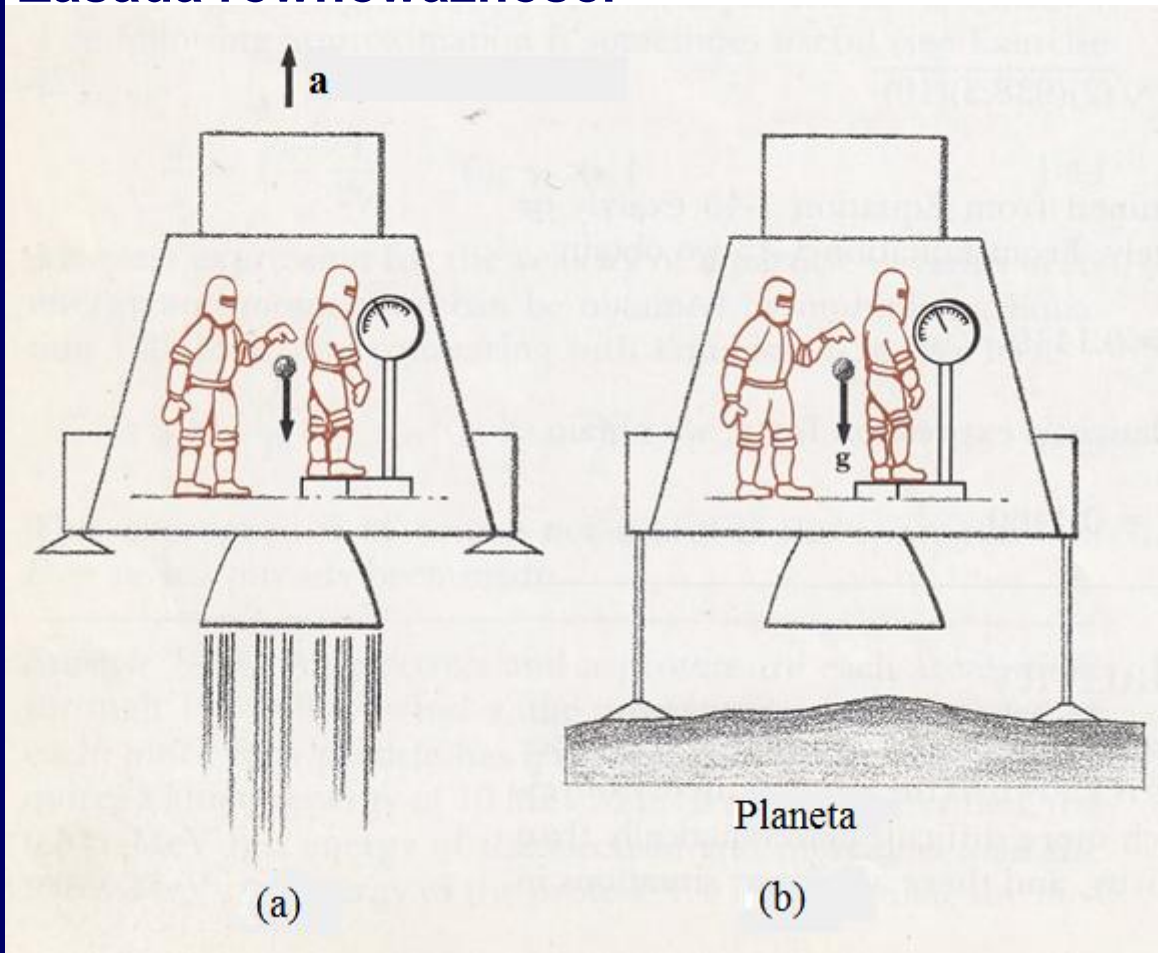


Philosophiae Naturalis Principia Mathematica
(Matematyczne Zasady Filozofii Przyrody).

Naturalnym ruchem wszystkich ciał, jest spадanie z przyspieszeniem g .

Wszechświat jest pełen spadających swobodnie spadających ciał, takich jak Księżyc, Ziemia, Słońce...

Zasada równoważności

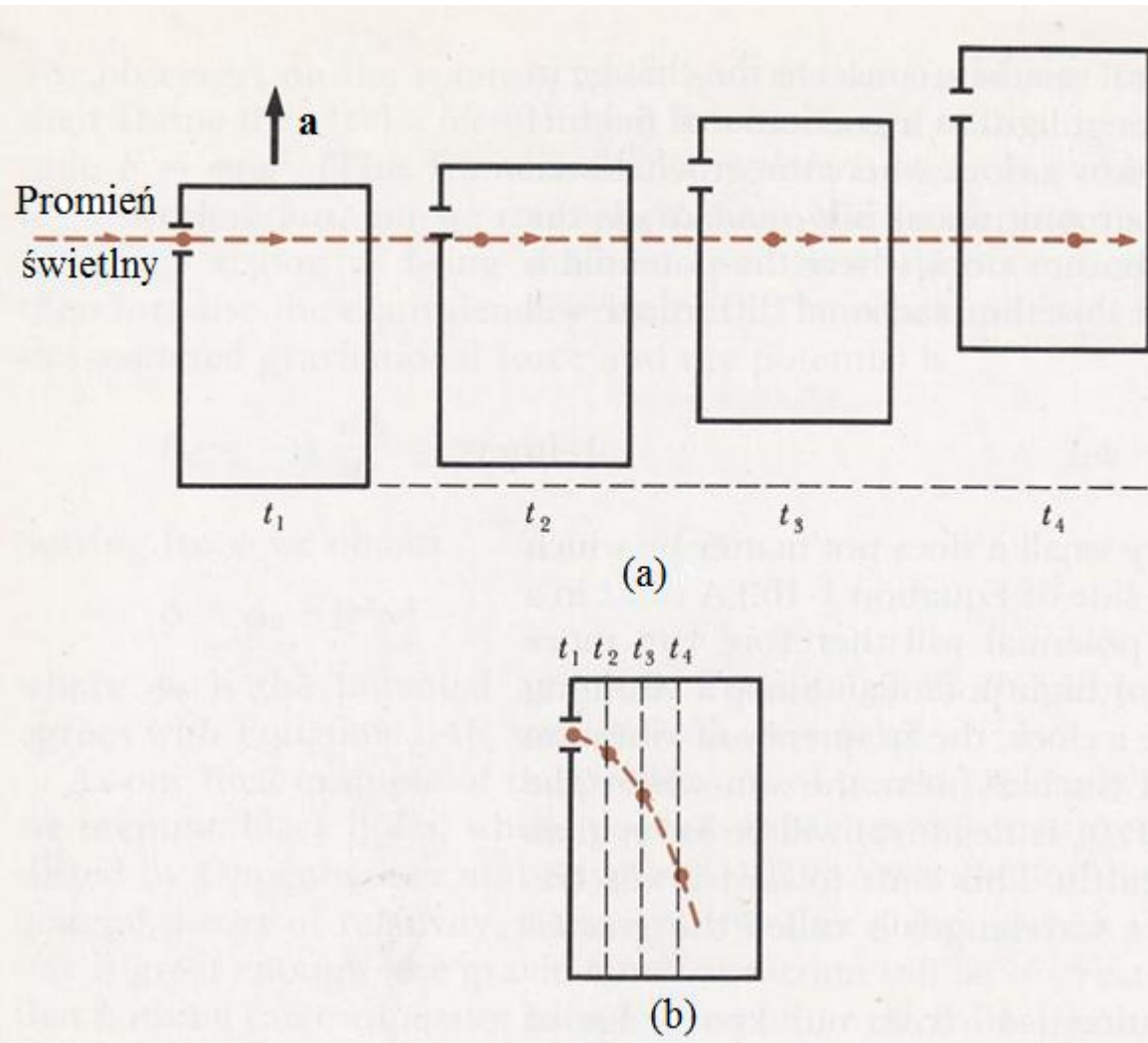


Jeśli kabina (statku kosmicznego) jest nieprzezroczysta, to znajdujący się w niej obserwator nie może odróżnić sytuacji (a) od (b)

Jednorodne pole grawitacyjne jest całkowicie równoważne polu w jednostajnie przyspieszanym układzie odniesienia. .

Konsekwencje zasady równoważności

Jak zachowuje się promień świetlny w przyspieszanym układzie



(a) Promień świetlny biegnący po prostej przez przyspieszaną klatkę.

(b) Względem przyspieszanej klatki (czyli względem obserwatora znajdującego się w klatce) światło porusza się po paraboli!

Czasoprzestrzeń Minkowskiego

Pierwsze słowa wykładu Hermana Minkowskiego „Raum und Zeit” na Zjeździe niemieckich przyrodników i lekarzy (1908 r.).

„Odtąd przestrzeń sama w sobie i czas sam w sobie mają całkowicie stać się cieniami i tylko pewien rodzaj ich związku utrzymać ma niezależną realność...”

Skąd to się bierze?

Wiemy, że czas zależy od ruchu, odległość zależy od ruchu.

Czy jest coś, co od ruchu nie zależy?

Owszem, jest to **interwał** – odległość między dwoma punktami w czasoprzestrzeni:

$$\Delta s_{12}^2 = c^2 (t_2 - t_1)^2 - \left[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2 \right].$$

Tak zdefiniowany interwał jest taki sam dla wszystkich obserwatorów we Wszechświecie.

Ogólna teoria względności

Wiedząc o czasoprzestrzeni, w 1915 r. Einstein ogłosił to, co nazywamy *ogólną teorią względności*:



- *Istnieją tylko lokalne układy inercjalne.*
- *Materia zakrzywia czasoprzestrzeń.*
- *Grawitacja jest przejawem zakrzywienia czasoprzestrzeni.*

Geometria czasoprzestrzeni

Obecność materii czyni z przestrzeni coś krzywego; zakrzywia przestrzeń a grawitacja jest przejawem tego zakrzywienia.

Ogólna teoria Einsteina sprowadza się do następującego, niewinnego wzoru:

$$G = \kappa \cdot T,$$

G – tensor Einsteina określa geometrię czasoprzestrzeni, T – tensor określa rozkład materii we Wszechświecie.

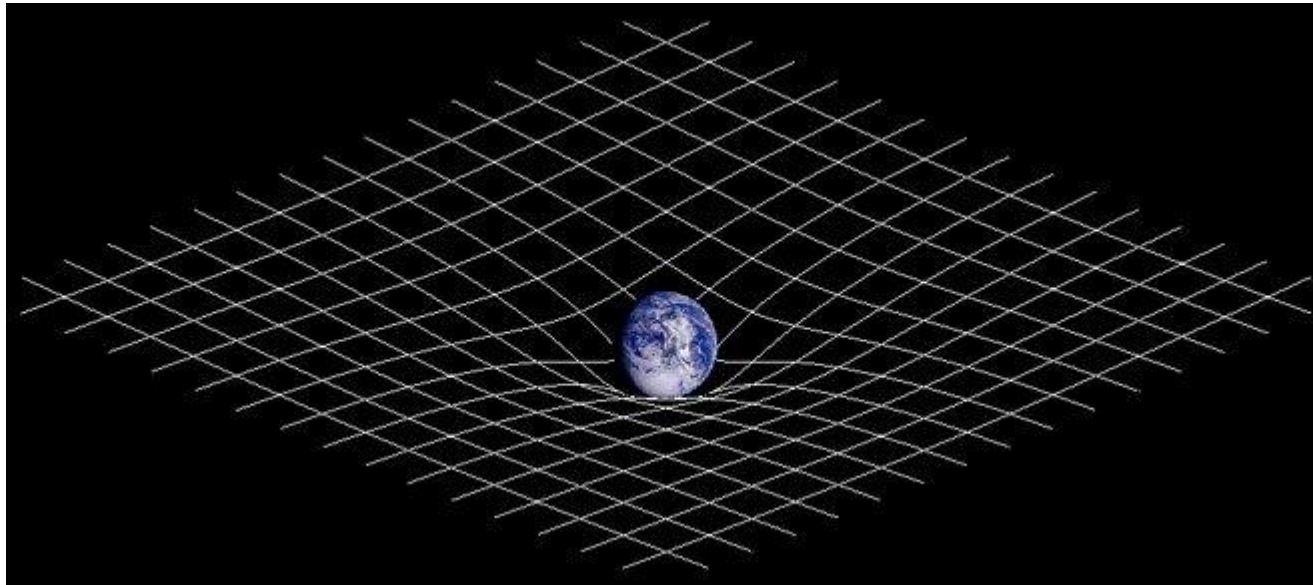
Ile wynosi K ?

Otóż

[illegible]

κ jest bardzo, bardzo małe! Z tego wynika, że sprzężenie między rozkładem gęstości energii i pędu a krzywizną przestrzeni jest bardzo słabe

Zakrzywienie czasoprzestrzeni



Czasoprzestrzeń jest wykrzywiana przez obecność materii.

Niezwykle trafne są słowa amerykańskiego fizyka prof. Johna Wheelera:

„Materia mówi czasoprzestrzeni jak się ma zakrzywiać a czasoprzestrzeń mówi materii jak się ma poruszać.”

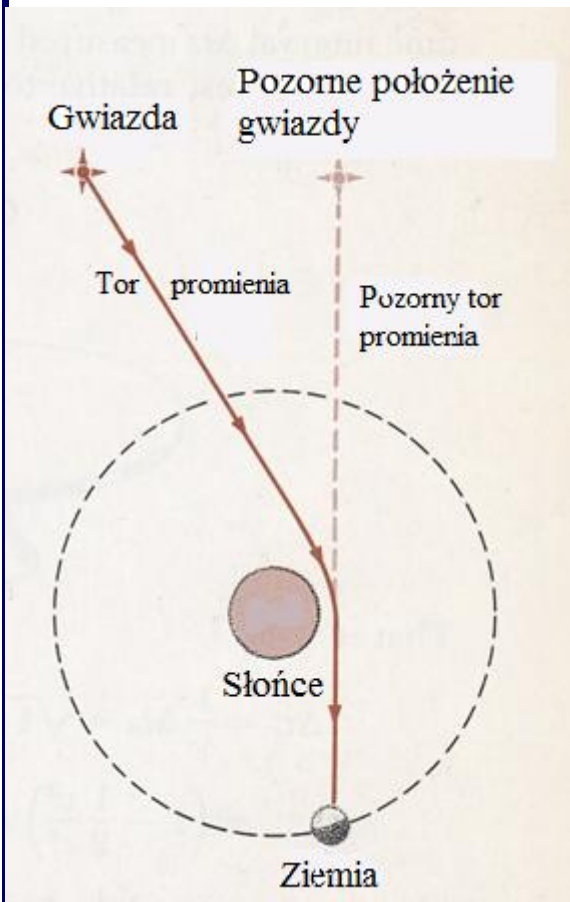
Potwierdzenie przewidywań ogólnej teorii względności

1. Odchylenie światła w polu grawitacyjnym

2. Ruch peryhelium Merkurego

3. Zależność biegu czasu od pola grawitacyjnego.

Ad 1.



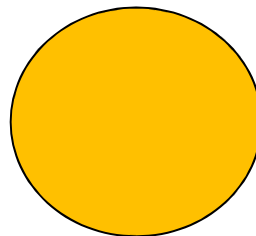
1,75 sekundy kątowej – przewidywane odchylenie promieni świetlnych przebiegających w pobliżu Słońca.

1 sekunda kątowa = $1/3600$ stopnia

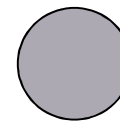
6-go listopada 1919 roku tego typu odchylenie zmierzono, porównując fotografie nieba podczas całkowitego zaćmienia Słońca z fotografiami nocnego nieba, gdy Słońca nie było.

Otrzymano wynik zgodny z przewidywaniami Einsteina.

Uwaga! **Ugięcie promienia świetlnego nie następuje w wyniku działania siły. Jest ono rezultatem zakrzywienia przestrzeni.**



Słońce: 1,75 sekund kątowych

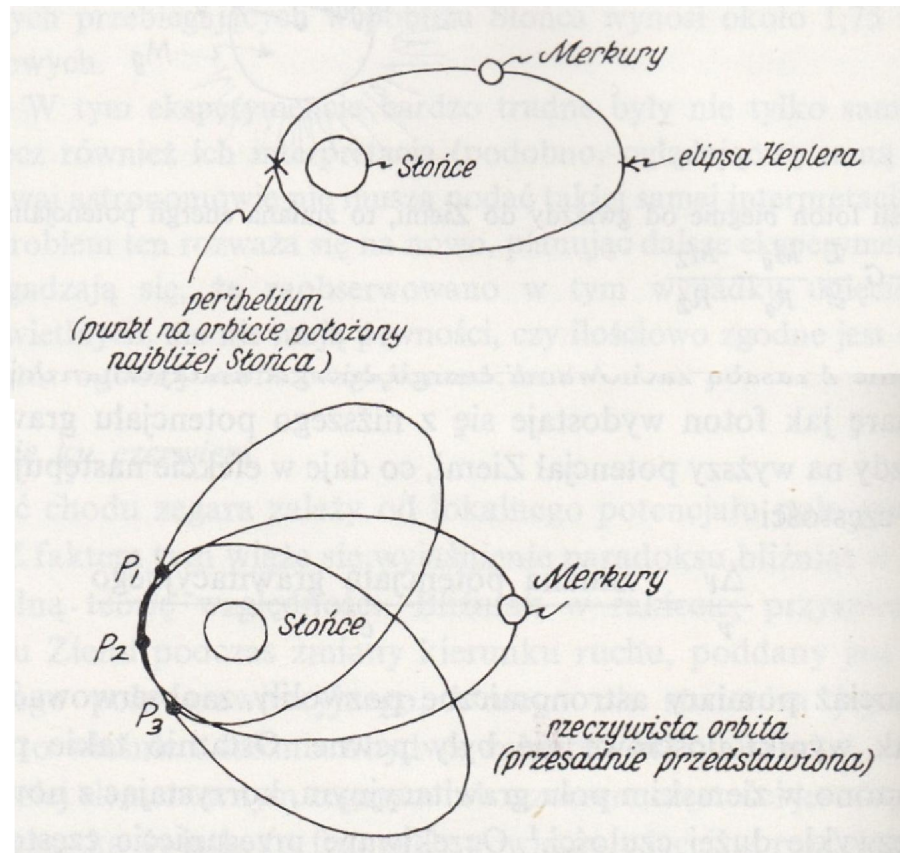


Jowisz: 0,017 sekundy kątowej

Potwierdzenie przewidywań ogólnej teorii względności, cd.

2. Ruch peryhelium Merkurego

Kepler odkrył, że planety poruszają się wokół Słońca po elipsach.



Mimo uwzględnienia oddziaływania na Merkurego pozostałych ciał niebieskich, zawsze przy obliczaniu ruchu peryhelium, wyniki obserwacji w ciągu stulecia ruchu peryhelium wykazywały nadwyżkę w stosunku do wyników obliczeń według mechaniki klasycznej. Nadwyżka nieduża, zaledwie $43''$ (sekundy kątowej).

$42,56'' \pm 0,94''$ nadwyżka wyników obserwacji nad teorią klasyczną. Stosując prawa ogólnej teorii względności, otrzymuje się nadwyżkę nad wynikiem obliczeń otrzymanych według mechaniki klasycznej równą $43,03'' \pm 0,03''$, co rozwiązało problem niezgodności obserwacji z obliczeniami.

3. Czas w ogólnej teorii względności

Dylatacja czasu w szczególnej teorii względności - efekt kinematyczny

Dylatacja czasu w ogólnej teorii względności - czas biegnie wolniej w silniejszym polu grawitacyjnym. Bieg czasu zależy od pola grawitacyjnego.

Zostało to sprawdzone doświadczalnie w 1972 roku.

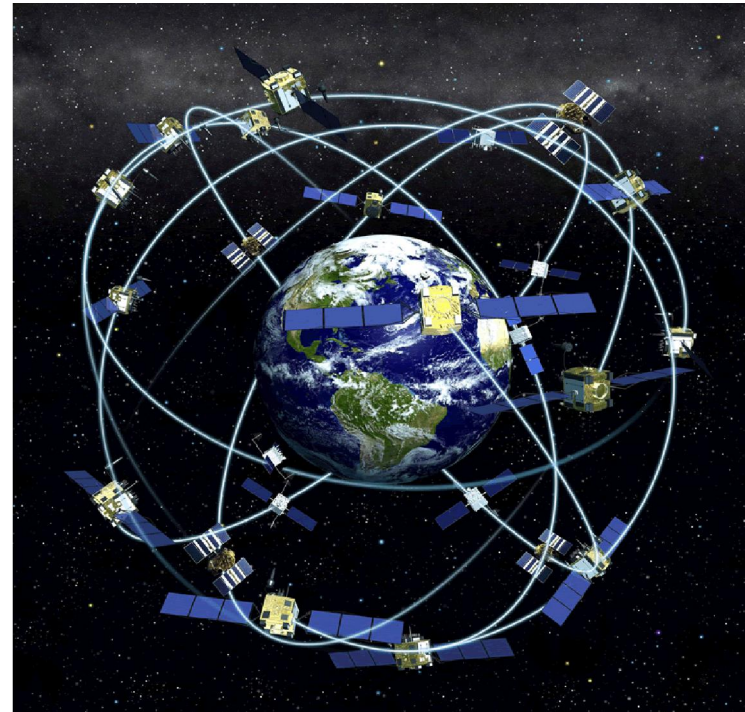
Dwaj Amerykanie: Josef C. Hafele i Richard E. Keating postanowili przeprowadzić bardzo prosty eksperyment. Wtedy zegary już mierzyły czas z dokładnością nanosekundową. Poprosili o grant w wysokości 8 000 \$. Grant był potrzebny na to, aby kupić bilety na samolot. Normalnymi samolotami, zabierając ze sobą zegary i zostawiając kilka na lotnisku, oblecieli świat w jedną i drugą stronę.

Przewidywanie: łącznie efekty kinematyczny i grawitacyjny, na przykład przy locie

na zachód: $275ns \pm 21ns$

Wynik doświadczalny: $273ns \pm 7ns$

Ad 3. Zależność biegu czasu od pola grawitacyjnego. Zasada działania GPS (Global Positioning System)



Dylatacja grawitacyjna daje $+ 46 \mu\text{s}$ na dobę.

Otóż, gdyby tej poprawki nie uwzględniać, to po kilkunastu minutach GPS przestałby działać!

Mówimy tu o mikrosekundach, a w ciągu nanosekundy światło przebiegnie odległość równą dłuższemu bokowi kartki A4. Zatem w ciągu mikrosekundy – odległość 1000 razy większą. Zatem zamiast powiedzieć, że jesteśmy tu, to usłyszelibyśmy, że jesteśmy, gdzieś na ul. Grójeckiej. (Z wykładu prof. Andrzeja Kajetana Wróblewskiego pt.: *Einstein dla laików*)

Bez poprawki relatywistycznej GPS nie działałby! Jest to najbardziej namacalny dowód prawdziwości ogólnej teorii względności.

W słabszym polu grawitacyjnym zegary chodzą szybciej!
Efekt jest bardzo, bardzo niewielki. Jeśli bylibyśmy 1 *km* nad powierzchnią Ziemi to „przyspieszenie” zegara wyniosłoby 3s na milion lat

**Konsekwencje ogólnej teorii
względności wydają się
sprzeczne ze zdrowym
rozsądkiem, ale są potwierdzone
przez setki eksperymentów.**

If you can't explain it **simply**, you
don't understand it well enough.

– Albert Einstein

