100 lat ogólnej teorii względności

Einstein dla laików

AKW

14 kwietnia 2016

Zdrowy rozsądek to suma przesądów, których nabywamy przed ukończeniem 18 lat



Zgodnie ze zdrowym rozsądkiem

Ziemia jest płaska i leży w środku świata



Świat jest przecież płaski!



"Jak to jest z tymi, którzy wyobrażają sobie, że pod naszymi stopami są antypody? Czy jest ktoś tak nierozsądny, żeby uwierzył, że są ludzie, którzy mają stopy nad głowami, ...że zboża i drzewa rosną w dół, że deszcz, śnieg i grad padają w górę na ziemię..."

Laktancjusz, Divinae institutiones, księga 3, rozdział 24



Flat Earth Society (Lancaster, Kalifornia)



Kopernik stawia hipotezy "niedorzeczne, absurdalne, sprzeczne ze zdrowym mniemaniem i **zdrowym rozsądkiem** i rzec można zuchwałe"

Christophorus Clavius, 1570

Od Galileusza do Einsteina

Galileusza zasada względności

Prawa mechaniki są jednakowe dla wszystkich obserwatorów, poruszających się względem siebie jednostajnie po liniach prostych





Przestrzeń absolutna, przez swą naturę, bez związku z czymkolwiek zewnętrznym, pozostaje zawsze taka sama i nieruchoma...

Czas absolutny, prawdziwy i matematyczny, sam z siebie i przez swą naturę upływa równomiernie bez związku z czymkolwiek zewnętrznym i inaczej nazywa się trwaniem...

Każde dwie bryły materii we wszechświecie przyciągają się proporcjonalnie do wielkości swych mas i odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości między nimi...

Newtona prawo powszechnego ciążenia

$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$

"Nie jestem przekonany przez jego teorie budowane na zasadzie przyciągania, która wydaje mi się absurdem. Dziwię się często, jak mógł on zadać sobie taki trud wykonania licznych badań i trudnych rachunków, nie mających innej podstawy niż ta zasada..."



Christiaan Huygens o Newtonie w liście do Gottfrieda Wilhelma Leibniza (18 XI 1690)



Doświadczenie myślowe Newtona



De Mundi Systemate Liber

Zasada pomiaru prędkości światła (Galileusz, 1638)



Prędkość światła c jest jednakowa dla wszystkich obserwatorów

111 lat temu

Dr A. Einstein, Bern, Aegertenstr. 53 30 czerwca 1905 r.

Einsteina zasada względności



Prawa fizyki są takie same dla wszystkich obserwatorów, poruszających się względem siebie jednostajnie po liniach prostych

Szczególna teoria względności

Einsteina zasada względności Stałość prędkości światła c

Prędkość światła c jest stałą przyrody!

1 nanosekunda \longleftrightarrow 30 cm







Równoczesność zjawisk jest pojęciem względnym



















Czas płynie różnie dla różnych obserwatorów















To samo stwierdza obserwator ZIELONY porównując chód swojego zegara z ciągiem zegarów zsynchronizowanych w układzie CZERWONYM, względem którego jest w ruchu z prędkością –













W obu wypadkach porównuje się chód jednego zegara w jednym układzie z chodem ciaqu zegarów zsynchronizowanych w drugim układzie

Ilościowa miara efektów relatywistycznych



przy
$$v \approx 0,0001 c$$
 $\gamma \approx 1,00000001$ przy $v = 0,5 c$ $\gamma \approx 1,16$ przy $v = 0,87 c$ $\gamma \approx 2$ przy $v = 0,995 c$ $\gamma \approx 10$
Skrócenie długości





Równość sprawdzona doświadczalnie z dokładnością 0,00004% (2005)

109 lat temu

Dr A. Einstein, Bern, Aegertenstr. 53 listopad 1907 r.

"Siedziałem sobie na krześle w moim pokoju w biurze patentowym. Nagle uświadomiłem sobie, że jeżeli człowiek spada swobodnie, to nie czuje swego ciężaru. Zostałem głęboko poruszony. Ten prosty eksperyment myślowy wywarł na mnie wielkie wrażenie. On właśnie poprowadził mnie do teorii grawitacji."

"To był najszczęśliwszy pomysł w moim życiu."

Siła przyciągania przez Ziemię *F* = *gm*_g

Przyspieszenie **a = F/m** = **gm**/m

skoro $m_g = m_b$, to a = g

wszystkie ciała spadają z jednakowym przyspieszeniem, niezależnie od ich masy

Jest to fakt zdumiewający!

Zasada równoważności



Obserwator w pomieszczeniu o nieprzezroczystych ścianach nie może rozróżnić między tymi dwiema sytuacjami

108 lat temu

21 września 1908 r. Getynga, Zjazd Przyrodoznawców i Lekarzy

Wykład Raum und Zeit

Czasoprzestrzeń Minkowskiego



"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..."

Czasoprzestrzeń Minkowskiego $ds^2 = c^2 dt^2 - (dx^2 + dy^2 + dz^2)$



101 lat temu

Berlin, Pruska Akademia Nauk 25 listopada 1915 r.

Ogólna teoria względności



Istnieją tylko Iokalne układy inercjalne

Materia zakrzywia czasoprzestrzeń

Grawitacja jest przejawem zakrzywienia czasoprzestrzeni



von

A. Einstein



Ogólna teoria względności

Leipzig :: Verlag von Johann Ambrosius Barth :: 1916



Przerywnik matematyczny

Przestrzeń płaska

Przestrzenie zakrzywione



v + z = 180⁰ Х+



Twierdzenie Pitagorasa w przestrzeni płaskiej (Euklidesa)



2-wymiarowa przestrzeń zakrzywiona



$$x\delta x + y\delta y + z\delta z = 0$$

(r² - x² - y²) = z²
(\delta s)² = (\delta x)² + (\delta y)² + (x\delta x + y\delta y)²/z²

$$(\delta s)^2 = g_{xx}(x,y) (\delta x)^2 + g_{yy}(x,y) (\delta y)^2 + g_{xy}(x,y) \delta x \delta y + g_{yx}(x,y) \delta x \delta y$$

oznaczenia

$$g_{xx}(x,y) = 1 + \frac{x^2}{z^2}$$

$$g_{yy}(x,y) = 1 + \frac{y^2}{z^2}$$

$$g_{xy}(x,y) = g_{yx}(x,y) = \frac{xy}{z^2}$$

Przestrzeń N-wymiarowa

$$(\delta s)^2 = \sum g_{\mu\nu}(\delta x_a)(\delta x_b) \qquad \mu, \nu = 1....N$$
$$g_{\mu\nu} = g_{\nu\mu}$$

N(N+1)/2 niezależnych parametrów

N = 4

$$\begin{pmatrix} g_{00} & g_{01} & g_{02} & g_{03} \\ g_{10} & g_{11} & g_{12} & g_{13} \\ g_{20} & g_{21} & g_{22} & g_{23} \\ g_{30} & g_{31} & g_{32} & g_{33} \end{pmatrix}$$

Czasoprzestrzeń (4-wymiarowa)

$$R_{\mu\nu} - (1/_2) R g_{\mu\nu} = (8\pi G/c^4) T_{\mu\nu}$$

$G_{\mu\nu} = \kappa T_{\mu\nu}$ Równanie Einsteina







John Wheeler

Materia "mówi" czasoprzestrzeni jak ma się zakrzywiać, a czasoprzestrzeń "mówi" materii jak ma się poruszać







Przewidywania Ogólnej Teorii Względności

Ruch perihelium Merkurego

Odchylenie promieni światła w polu grawitacyjnym

Zależność biegu czasu od pola grawitacyjnego

Ruch perihelium Merkurego w sekundach łuku na stulecie

42,56 ± 0,94 43,03 ± 0,03	nadwyżka obserwacji nad teorią klasyczną przewidywanie Ogólnej Teorii Względności
5557,18 ± 0,85	(277,856 Wenus; 153,584 Jowisz; 90,038 Ziemia; 7,3 Saturn) całkowite przewidywanie teorii Newtona
$5025,04 \pm 0,50$ 531,54 ± 0,68	znane perturbacje od planet
$5599,74 \pm 0,41$	sumaryczne przesunięcie
	aumanyazna przedupiedia



Odchylenie światła w polu grawitacyjnym



1,75 sekundy łuku dla promienia biegnącego tuż przy powierzchni Słońca

1 sekunda łuku = 1/3600 stopnia

97 lat temu

6 listopada 1919 r. Londyn, Royal Society Astronom królewski Frank Dyson ogłasza, że pomiary fotografii nieba podczas zaćmienia Słońca są zgodne z przewidywaniami ogólnej teorii względności



REVOLUTION IN SCIENCE THEORY OF THE UNIVERSE. NEW NEWTONIAN IDEAS OVERTHROWN. Yesterday alternoon in the rooms of the Royal Bociety, at a joint session of the Royal Astronomical Bocietics, the results ob with observers of the total solar by the bree the IN SCIENCEION SIR O. LODGE ON EINSTEIN'S THEORY. ÎN SCIENCE. "A TERRIBLE TIME" FOR EINSTEIN V. NEWTON. PHYSICISTS. Before an interested company, which included a number of physicats and estronomers, Hr Oliver Lating bectured on and dence of Lord Gienconner, No. gate, Westrainster, last night. Among those present wore the Hiskop of London. Mr. Ballour, Lord Gienconner, Lord Dunraven, Lord Wide interest in POPULAT ENTINENT Mr. Ballour, Lord Haldase, Sir Hobert Hadflohd circles has been created in Popular as well Lytton, Lord Haldase, Sir Hobert Haggard, Stook place at the rooms of the date well as in sciet of Hudson, Bir Hider Haggard, Stook place at the rooms of the date of the da Lodge loctured on Einstein's predictions, at the rest-Among those present wore the Hishop on Among those present wore the Hishop on Mr. Ballour, Lord Glencomner, Lord Dumraven, Lord Withe interest in popular as Will CISTS. Mr. Ballour, Lord Haldane, Bir Hider Haggard, Stook place has been created by CISTS. Lytton, Lord Haldane, Bir Hider Haggard, Stook place at the rooms of the data in science as Robert Hudson, Bir R. A. Gregory, JThurnday aft the rooms of the data in science husband, Bir R. A. Gregory, Manday aft moon of the data in science wither British "Toom of the data of the science" Antropo of Ballicer Moya with the second state of Ballicer And Sta fulta of Conw man thr to observe the Artin John S. Kelile. of Commons topic of Commons topic of Commons topic of Commons topic of the Commons topic of the Common time to the Common time to the Common topic of the Common topic Paget. the These were Frank Chrand the House Jubject done 4

Odchylenie światła w polu grawitacyjnym





Jowisz 0,017 sekundy łuku

Słońce I,75 sekundy łuku

Obserwacja zakrzywienia biegu światła w polu grawitacyjnym Jowisza



Treuhaft & Lowe, AJ 102, 1879-1888 (1991)



soczewka optyczna



soczewka grawitacyjna
Fotografia z Teleskopu Hubble'a

Czas w teorii względności

Dylatacja czasu w szczególnej teorii względności - efekt kinematyczny

Dylatacja czasu w ogólnej teorii względności - czas biegnie wolniej w silniejszym polu grawitacyjnum

Eksperymenty z zegarami atomowymi (Joseph C. Hafele i Richard E. Keating, 1972)







Eksperymenty z zegarami atomowymi (Joseph C. Hafele i Richard E. Keating, 1972)



Project GREAT: General Relativity Einstein/Essen Anniversary Test Clocks, Kids, and General Relativity on Mt Rainier

Tom Van Baak, wrzesień 2005



GPS – Global Positioning System









Satelity GPS krążą 20200 km nad Ziemią z prędkością ok. 3,9 km/s

Dylatacja czasu grawitacyjna = + 46 mikrosekund/dobę Dylatacja czasu kinematyczna = - 7 mikrosekund/dobę Całkowity efekt wynosi + 39 mikrosekund/dobę Lokalna sekunda na satelitach musi być dłuższa o ok. 0,44 ns



Zegar bliższy powierzchni Ziemi chodzi WOlniej niż identyczny zegar umieszczony na większej wysokości

Dylatacja czasu w polu grawitacyjnym Ziemi jest jednak bardzo mała

6 lat temu

Boulder, CO National Bureau of Standards



National Bureau of Standards, Boulder

"Science" 24 IX 2010



Measurement number

National Bureau of Standards, Boulder

"Science" 24 IX 2010

Zegar znajdujący się na wysokości 1 km nad Ziemią przyspieszy w ciągu miliona lat o 3 sekundy w stosunku do identycznego zegara na powierzchni



2 miesiące temu

Odkrycie fal grawitacyjnych

Über Gravitationswellen.

Von A. Einstein.

(Vorgelegt am 31. Januar 1918 [s. oben S. 79].)

Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder ertolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiearbeit von mir behandelt worden'. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

Wie damals beschränke ich mich auch hier auf den Fall, daß das betrachtete zeiträumliche Kontinuum sich von einem «galileischen» nur sehr wenig unterscheidet. Um für alle Indizes

$$g_{ss} = -\delta_{ss} + \gamma_{ss}, \tag{1}$$

setzen zu können, wählen wir, wie es in der speziellen Relativitäts-

Konsekwencje teorii względności wydają się sprzeczne ze zdrowym rozsądkiem, ale są potwierdzane przez setki doświadczeń