

Wykłady z Fizyki 14



Zbigniew Osiak

**Teoria
Względności**

ORCID

Linki do moich publikacji naukowych i popularnonaukowych, e-booków oraz audycji telewizyjnych i radiowych są dostępne w bazie ORCID pod adresem internetowym:

<http://orcid.org/0000-0002-5007-306X>

OZNACZENIA

B – notka biograficzna

C – ciekawostka

D – propozycja wykonania doświadczenia

H – informacja dotycząca historii fizyki

I – adres strony internetowej

K – komentarz

P – przykład

U – uwaga

Zbigniew Osiak (Tekst)

WYKŁADY Z FIZYKI
Teoria Względności

Małgorzata Osiak (Ilustracje)

© Copyright 2013 by
Zbigniew Osiak (text) and Małgorzata Osiak (illustrations)

Wszelkie prawa zastrzeżone.
Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji
zabronione bez pisemnej zgody autora tekstu i autorki ilustracji.

Portret autora zamieszczony na okładkach przedniej i tylnej
Rafał Pudło

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-3955-6

e-mail: zbigniew.osiak@gmail.com

“*Wykłady z Fizyki – Teoria Względności*” są czternastym z piętnastu tomów pomocniczych materiałów do jednorocznego kursu fizyki prowadzonego przeze mnie na różnych kierunkach inżynierskich. Zainteresowani studiowaniem fizyki znajdą tu podstawowe pojęcia, prawa, jednostki, wzory, wykresy i przykłady.

Uzupełnieniem czternastego tomu są eBooki:

Z. Osiak: *Szczególna Teoria Względności*. Self Publishing (2012)

Z. Osiak: *Ogólna Teoria Względności*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Giganci Teorii Względności*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Encyklopedia Fizyki*. Self Publishing (2012).

Z. Osiak: *Zadania Problemowe z Fizyki*. Self Publishing (2011).

Zapis wszystkich trzydziestu wykładów zgrupowanych w piętnastu tomach zostanie zamieszczony w internecie w postaci eBooków.

-
- Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Mechanika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Akustyka.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Hydromechanika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Grawitacja.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Termodynamika.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektryczność.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Magnetyzm.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Elektromagnetyzm.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Optyka.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Kwanty.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Ciało Stałe.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Jądra.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Cząstki Elementarne.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Teoria Względności.*
 - Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Stałe Uniwersalne i Jednostki.*

Szczególna teoria względności

dr Zbigniew Osiak

Rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

-
- Szczególna teoria względności 09
 - Doświadczalne podstawy szczególnej teorii względności 18
 - Matematyczne podstawy szczególnej teorii względności 28
 - Transformacje Lorentza 37
 - Podstawowe wyniki szczególnej teorii względności 43
 - Mechanika relatywistyczna 58
 - Wybrane testy szczególnej teorii względności 76

- Teoria względności 10
- Szczególna teoria względności 12
- Szczególna zasada względności 15
- Wartość prędkości światła 16
- Podstawowe założenia szczególnej teorii względności 17

• Teoria względności \Leftrightarrow wspólna nazwa szczególnej i ogólnej teorii względności. Szczególna teoria względności bada w inercjalnych układach odniesienia przy braku pola grawitacyjnego niezmienniki transformacji Lorentza oraz współzmienniczość równań względem tych transformacji. Ogólna teoria względności bada w nieinercjalnych układach odniesienia w obecności pola grawitacyjnego niezmienniki transformacji, których zadaniem jest maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów, oraz współzmienniczość równań względem tych transformacji.

H Głównym twórcą teorii względności był Einstein, który w ciągu 50 lat poświęcił tej tematyce ponad 150 prac.

H Nazwę teoria względności (Prinzip der Relativität) zaproponował Planck w 1906.

K Teoria względności ze względu na badane w jej ramach zagadnienia powinna mieć inną nazwę.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1921.

B Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), niemiecki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1918.

- Szczególna teoria względności (STW) \Leftrightarrow teoria zajmująca się badaniem zjawisk przebiegających (przy braku pola grawitacyjnego) w inercjalnych układach odniesienia w czterowymiarowej czasoprzestrzeni Minkowskiego.

H 30 czerwca 1905 uważany jest za datę powstania Szczególnej Teorii Względności. W tym dniu do redakcji Annalen der Physik wpłynęła praca Alberta Einsteina “Zur Elektrodynamik bewegter Körper” (O elektrodynamice poruszającego się ciała).

- Einstein przyjął dwa podstawowe założenia:
- Każde prawo fizyki powinno mieć ogólną postać niezależną od wyboru inercjalnego układu odniesienia.
- Wartość prędkości światła w próżni jest taka sama względem dowolnego inercjalnego układu odniesienia.

- Z założeń tych otrzymał m.in. następujące wyniki:
- Poddał szczegółowej analizie pojęcie równoczesności.
- zaproponował procedurę synchronizacji zegarów.
- Podał przekształcenia współrzędnych przestrzennych i czasu, względem których wartość prędkość światła jest niezmiennikiem.
- Jako wnioski z tych przekształceń przedstawił wzory na kontrakcję długości, dylatację czasu i składanie prędkości.
- Wykazał, że równania Maxwella-Hertza są współzmiennicze względem badanych transformacji.
- W przypadku płaskiej fali elektromagnetycznej wyprowadził wzory na transformacje jej częstotliwości (zjawisko Dopplera), kierunku propagacji (aberracja) i amplitudy.
- Otrzymał wzory na podłużną i poprzeczną masę oraz energię kinetyczną elektronu poruszającego się w polu elektromagnetycznym z małym przyspieszeniem.

H Einstein i Poincaré niemal równocześnie sformułowali STW. Wyniki opublikowali odpowiednio 30 czerwca i 23 lipca 1905. Podstawowa różnica między ich pracami polegała na interpretacji wniosków wynikających z transformacji Lorentza. Einstein uważał, że wskutek ruchu układu odniesienia czas i przestrzeń ulegają deformacji. Poincaré twierdził, że deformacje dotyczą ciał materialnych.

H Istotny wkład w rozwój STW wniósł Minkowski, wprowadzając w 1908 pojęcie czterowymiarowej czasoprzestrzeni.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1921.

B Hermann Minkowski (1864-1909), niemiecki matematyk i fizyk.

B (Jules) Henri Poincaré (1854-1912), francuski matematyk, fizyk i filozof.

• Szczególna zasada względności \Leftrightarrow zasada głosząca, że definicje wielkości fizycznych oraz prawa (równania) fizyki można tak sformułować, aby ich ogólne postacie były takie same we wszystkich inercjalnych układach odniesienia. Inaczej mówiąc, dane zjawisko fizyczne przebiega tak samo we wszystkich inercjalnych układach odniesienia. Obserwator znajdujący się w inercjalnym układzie odniesienia, odizolowanym od wszelkich informacji zewnętrznych, nie jest w stanie ustalić, czy układ ten spoczywa, czy porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym. Zasada ta nazywana jest również zasadą względności Einsteina.

H Szczególną zasadę względności sformułował Einstein w 1905.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1921.

- Wartość prędkości światła \Leftrightarrow wartość fazowej prędkości rozchodzenia się światła i innych fal elektromagnetycznych. Wartość prędkości światła nie przekracza w żadnym ośrodku wartości $c \approx 3 \cdot 10^8$ m/s, w próżni nie zależy od częstotliwości i jest taka sama względem każdego układu inercjalnego. W ośrodkach materialnych wartość prędkości światła maleje wraz ze zwiększaniem się częstotliwości fali.

H Pierwszy pomiar wartości prędkości światła w laboratorium wykonał Fizeau w 1849 metodą “koła zębatego”.

B (Armand) Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896), francuski fizyk.

- Podstawowe założenia szczególnej teorii względności \Leftrightarrow dwie zasady, z których wywodzona jest szczególna teoria względności:
- Postuluje się, że definicje wielkości fizycznych oraz prawa (równania) fizyki można tak sformułować, aby ich ogólne postacie były niezależne od wyboru inercjalnego układu odniesienia. Postulat ten nazywany jest szczególną zasadą względności.
- Zakłada się, że maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów w próżni jest taka sama we wszystkich inercjalnych układach odniesienia.

- Doświadczenie Fizeau (1851) 19
- Eter 20
- Doświadczenie Michelsona-Morley'a (1887) 21
- Doświadczenie Lodge'a (1893) 23
- Doświadczenie Rayleigha-Brace'a (1902 i 1904) 24
- Doświadczenie Troutona-Noble'a (1903) 25
- Doświadczenie Troutona-Rankine'a (1908) 26
- Doświadczenie Kennedy'ego-Thorndike'a (1932) 27

- Doświadczenie Fizeau \Leftrightarrow doświadczenie przeprowadzone przez Fizeau w 1851. Wykonane przez niego pomiary wartości prędkości światła w spoczywającej i poruszającej się wodzie wskazywały, że klasyczny wzór na składanie prędkości nie jest prawdziwy w przypadku światła.

B [Armand] Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896), francuski fizyk.

-
- Eter \Leftrightarrow hipotetyczny ośrodek wypełniający cały wszechświat, który miał być niezbędny do rozchodzenia się fal elektromagnetycznych. Doświadczenia Michelsona-Morleya (1887), Lodge'a (1893), Rayleigha-Brace'a (1902 i 1904), Troutona-Noble'a (1903) oraz Troutona-Rankine'a (1908) wykazały, że teoria eteru jest bezzasadna.
 - Eter traktowany był jako swoisty układ odniesienia. Względem eteru definiowano pojęcia bezwzględnego ruchu i spoczynku.
 - W szczególnej teorii względności Alberta Einsteina koncepcja eteru stała się zbędna. Atrybutem ruchu stała się jego względność.

- Doświadczenie Michelsona-Morley'a \Leftrightarrow doświadczenie, przeprowadzone w 1887, w którym Michelson i Morley wykazali, że wartość prędkości światła nie zależy od ruchu Ziemi względem Słońca.

B Albert Abraham Michelson (1852-1931), amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1907.

B Edward Williams Morley (1838-1923), amerykański chemik i fizyk.

K Doświadczenie było planowane jako rozstrzygające o istnieniu eteru. Z historycznego punktu widzenia eksperyment Michelsona był źródłem inspiracji dla wielu fizyków, znajdowali się wśród nich Brace, FitzGerald, Lodge, Lorentz, Noble, Poincaré, Rayleigh oraz Trouton. Należy wyraźnie podkreślić, że negatywne wyniki doświadczenia, które miało potwierdzić unoszenie hipotetycznego eteru przez poruszające się w nim ciała, nie miały wpływu na poglądy Alberta Einsteina, gdy tworzył on w 1905 podstawy szczególnej teorii względności. Powód był bardzo prosty, Einstein z zasady nie czytał prac kolegów.

- Doświadczenie Lodge'a \Leftrightarrow eksperyment przeprowadzony przez Lodge'a w 1893. Za pomocą interferometru wykazał on, że hipotetyczny eter znajdujący się między dwoma wirującymi dyskami nie jest przez nie unoszony. Dyski o średnicy jednego jarda (ok. 0,9144 m) wykonane były ze stali i wirowały wokół wspólnej osi z prędkością przekraczającą 20 obrotów na sekundę.

B Sir Oliver Joseph Lodge (1851-1940), brytyjski fizyk.

- Doświadczenie Rayleigha-Brace'a \Leftrightarrow doświadczenie przeprowadzone przez Rayleigha w 1902 i powtórzone z większą dokładnością przez Brace'a w 1904. Nie stwierdzili oni oczekiwanego podwójnego załamania, które miał spowodować ruch przezroczystego ciała przez eter. Gdyby istniał eter, to według Rayleigha zjawisko takie byłoby konsekwencją kontrakcji Lorentza-FitzGeralda.

B John William Strutt Rayleigh (1842-1919), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1904.

B DeWitt Bristol Brace (1859-1905), amerykański fizyk.

- Doświadczenie Troutona-Noble'a \Leftrightarrow eksperyment przeprowadzony przez Troutona i Noble'a w 1903. Celem eksperymentu był pomiar postulowanych sił torsyjnych (skręcających) działających na wiszący naładowany płaski kondensator w wyniku oddziaływania ładunków na okładkach z hipotetycznym eterem. Oczekiwanego oddziaływania nie stwierdzono.

B Frederick Thomas Trouton (1863-1922), irlandzki fizyk.

B Henry R. Noble, fizyk.

- Doświadczenie Troutona-Rankine'a \Leftrightarrow doświadczenie przeprowadzone w 1908 przez Troutona i Rankine'a. Wykonali oni pomiary oporu elektrycznego miedzianego drutu ustawionego równoległe i prostopadle do kierunku ruchu Ziemi wokół Słońca. Oczekiwanych zmian oporu, będących wynikiem skrócenia Lorentza-FitzGeralda, nie stwierdzono.

K Z doświadczenia Troutona-Rankine'a wynika, że hipoteza Lorentza-FitzGeralda jest błędna.

B Frederick Thomas Trouton (1863-1922), irlandzki fizyk.

B Alexander Oliver Rankine (1881-1956), brytyjski fizyk.

- Doświadczenie Kennedy'ego-Thorndike'a \Leftrightarrow doświadczenie przeprowadzone przez Kennedy'ego i Thorndike'a w 1932. Powtórzyli oni eksperyment Michelsona-Morleya, posługując się interferometrem o różnych długościach ramion.

B Roy James Kennedy (ur. 1897), amerykański fizyk.

B Edward Moulton Thorndike (ur. 1905), amerykański fizyk.

- Czasoprzestrzeń 29
- Zdarzenie 30
- Przedział czasoprzestrzenny 31
- Metryka 32
- Przestrzeń Minkowskiego 33
- Diagram czasoprzestrzenny 34
- Stożek świetlny 35
- Linia świata 36

- Czasoprzestrzeń \Leftrightarrow czterowymiarowa przestrzeń o trzech wymiarach przestrzennych i czwartym wymiarze czasowym. Punktami czasoprzestrzeni są zdarzenia.

P Jak wyobrazić sobie czwarty wymiar? – Wystarczy spojrzeć na zegarek.

H Pojęcie czasoprzestrzeni wprowadził Minkowski w 1908. Według niego “Przestrzeń sama w sobie i czas sam w sobie są fikcją i tylko pewien sposób połączenia ich obu jest samodzielnym bytem”.

B Hermann Minkowski (1864-1909), niemiecki matematyk i fizyk.

-
- Zdarzenie \Leftrightarrow punkt czasoprzestrzeni, zadany przez trzy współrzędne przestrzenne i jedną czasową.

- Przedział czasoprzestrzenny (ds) \Leftrightarrow różniczka odległości czasoprzestrzennej między dwoma blisko siebie położonymi zdarzeniami (punktami) (x_1, x_2, x_3, x_4) i $(x_1 + dx_1, x_2 + dx_2, x_3 + dx_3, x_4 + dx_4)$.
- Kwadrat przedziału czasoprzestrzennego określony jest poniższym wyrażeniem.

$$ds^2 = \sum_{\mu=1}^4 \sum_{\nu=1}^4 g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu}$$

- $g_{\mu\nu}$ – składowe tensora metrycznego
- $x_4 = ict$
- i – jednostka urojona
- $i^2 = -1$
- c – maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów
- t – czas

-
- Metryka \Leftrightarrow wyrażenie określające odległość między dwoma punktami danej przestrzeni.

- Przestrzeń Minkowskiego \Leftrightarrow czasoprzestrzeń, w której kwadrat przedziału czasoprzestrzennego $(ds)^2$ dany jest poniższym wyrażeniem.

$$(ds)^2 = (dx_1)^2 + (dx_2)^2 + (dx_3)^2 + (dx_4)^2$$
$$x_1 = x, \quad x_2 = y, \quad x_3 = z, \quad x_4 = ict$$

- i – jednostka urojona
- $i^2 = -1$
- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercyjnym
- t – czas

B Hermann Minkowski (1864-1909), niemiecki matematyk i fizyk.

- Diagram czasoprzestrzenny \Leftrightarrow trójwymiarowy obraz czterowymiarowej czasoprzestrzeni sporządzony w prostokątnym układzie współrzędnych z pionową osią zmiennej czasowej (ct) i dwoma osiami zmiennych przestrzennych.
- Diagram czasoprzestrzenny nazywany jest też diagramem Minkowskiego.

H Diagram czasoprzestrzenny zaproponował Minkowski w 1908.

B Hermann Minkowski (1864-1909), niemiecki matematyk i fizyk.

- Stożek świetlny \Leftrightarrow stożek przypisany zdarzeniu (A) na diagramie czasoprzestrzennym. Tworzą go wszystkie zdarzenia mogące pozostawać w związku przyczynowo skutkowym ze zdarzeniem (A).

H Pojęcie stożka świetlnego wprowadził Minkowski w 1908.

B Hermann Minkowski (1864-1909), niemiecki matematyk i fizyk.

• Linia świata \Leftrightarrow linia obrazująca na diagramie czasoprzestrzennym ruch cząstki lub fotonu. Linie świata cząstek znajdują się wewnątrz stożka świetlnego. Linie świata fotonów są prostymi leżącymi na powierzchni stożka. Jeżeli cząstka porusza się ruchem jednostajnym prostoliniowym lub pozostaje w spoczynku, to jej linia świata jest linią prostą. W przypadku innych ruchów linie świata są liniami krzywymi.

H Pojęcie linii świata wprowadził Minkowski w 1908.

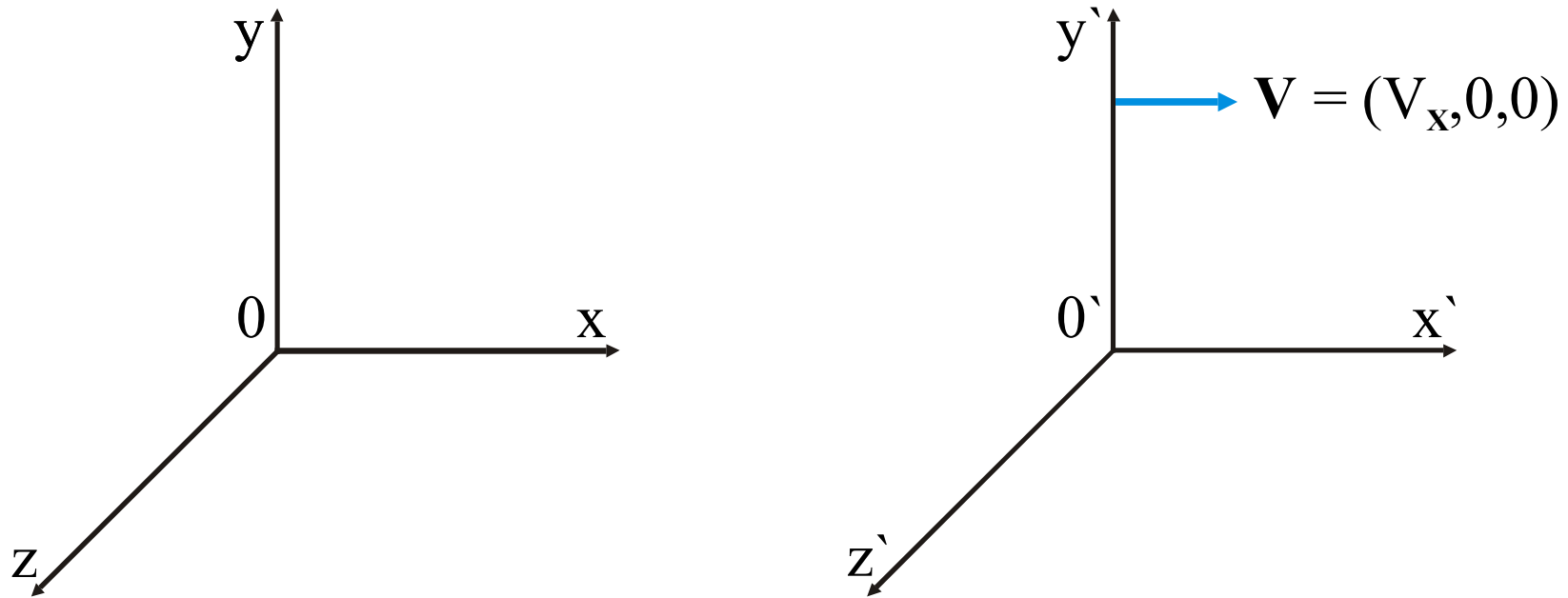
B Hermann Minkowski (1864-1909), niemiecki matematyk i fizyk.

- Transformacje Lorentza 38
- Współczynnik Lorentza 41
- Transformacje Lorentza a transformacje Galileusza 42

- Transformacje Lorentza \Leftrightarrow relacje między kartezjańskimi współrzędnymi (x, y, z, t) i (x', y', z', t') danego zdarzenia wyznaczonymi w dwóch różnych inercjalnych układach odniesienia.

$$x' = \frac{x - Vt}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = \frac{t - \frac{Vx}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}$$

- V – prędkość skierowana wzdłuż osi X , z jaką układ primowany porusza się względem układu nieprimowanego, w chwili początkowej osie obu układów pokrywały się
- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercjalnym
- Niezmiennikiem tych transformacji jest wartość prędkości światła w próżni.



- Dwa inercjalne układy odniesienia, nieprimowany i primowany, poruszające się względem siebie z prędkością chwilową $\mathbf{V} = (V_x, 0, 0)$ o stałej wartości; w chwili początkowej $t = t' = 0$ osie tych układów pokrywały się.

H Przekształcenia podobne do transformacji Lorentza znalazł Voigt w 1887.

H Transformacje podane przez Larmora w 1900 i Lorentza w 1904 zawierały ten sam błąd. Poincaré usunął ten błąd w 1905, a poprawione transformacje nazwał transformacjami Lorentza.

H Poprawną postać transformacji Lorentza przedstawił również Einstein w 1905.

B Woldemar Voigt (1850-1919), niemiecki fizyk teoretyk.

B Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), holenderski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1902.

B (Jules) Henri Poincaré (1854-1912), francuski matematyk, fizyk i filozof.

B Joseph Larmor (1857-1942), irlandzki fizyk teoretyk i matematyk.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1921.

- Współczynnik Lorentza (γ) \Leftrightarrow współczynnik pojawiający się w wielu równaniach szczególnej teorii względności.

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

- v – wartość prędkości ciała względem inercjalnego układu odniesienia
- c – wartość prędkości ciała w próżni w układzie inercjalnym

B Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), holenderski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1902.

- Transformacje Lorentza a transformacje Galileusza \Leftrightarrow kładąc $c = \infty$ w przekształceniach Lorentza, otrzymujemy przekształcenia Galileusza:

$$x' = x - Vt, \quad y' = y, \quad z' = z, \quad t' = t$$

- Synchronizacja zegarów 44
- Względność jednoczesności 45
- Czas własny 46
- Relatywistyczna dylatacja czasu 47
- Paradoks bliźniąt 49
- Relatywistyczna kontrakcja długości 50
- Skrócenie FitzGeralda-Lorentza 52
- Zasada równoważności masy i energii 54
- Relatywistyczny efekt Dopplera 56

- Synchronizacja zegarów \Leftrightarrow procedura opisana przez Einsteina w 1905, mająca na celu ujednoczenie wskazań zegarów w danym inercyjnym układzie odniesienia. Niech promień światła wysłany z punktu (A) w chwili (t_1), po dotarciu do punktu (B) w chwili (t_2), zostanie odbity od zwierciadła w kierunku (A) i dotrze do (A) w chwili (t_3). Na mocy definicji zegary w punktach (A) i (B) są zsynchronizowane, jeżeli

$$t_2 = \frac{t_1 + t_3}{2}$$

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

- Względność jednoczesności \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że zdarzenia jednoczesne w danym inercyjnym układzie odniesienia nie muszą być jednoczesne w innych układach. Dwa zdarzenia są równoczesne we wszystkich inercyjnym układach odniesienia wtedy i tylko wtedy, gdy w jednym z tych układów są równoczesne i zaszły w tym samym miejscu (punkcie).

-
- Czas własny \Leftrightarrow odstęp czasu między dwoma zdarzeniami zachodzącymi w tym samym miejscu inercjalnego układu odniesienia, zmierzony zegarem znajdującym się w tym miejscu.

- Relatywistyczna dylatacja czasu \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że odstęp czasu między dwoma zdarzeniami zależy od stanu ruchu obserwatora inercyjnego. W szczególnym przypadku, gdy zdarzenia zachodzą w danym miejscu poruszającego się układu, mamy:

$$\Delta t' = \Delta t \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}, \quad \Delta t' < \Delta t$$

- $\Delta t'$ – odstęp czasu między dwoma zdarzeniami zachodzącymi w tym samym miejscu primowanego układu odniesienia, zmierzony zegarem znajdującym się też w tym miejscu
- Δt – odstęp czasu między tymi zdarzeniami zmierzony zegarami znajdującym się w nieprimowanym układzie odniesienia w miejscach określonych przez współrzędne przestrzenne rozważanych zdarzeń

- V – prędkość skierowana wzdłuż osi X , z jaką układ primowany porusza się względem układu nieprimowanego, w chwili początkowej osie obu układów pokrywały się
- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercyjnym

K Należy podkreślić, że odległość czasoprzestrzenna między dwoma zdarzeniami nie zależy od stanu ruchu obserwatora inercyjnego.

-
- Paradoks bliźniąt \Leftrightarrow paradoks związany z dylatacją czasu. Jeden z braci bliźniaków wyruszył szybką rakieta w podróż kosmiczną. Następnie powrócił na Ziemię. Ponieważ podczas rozłąki poruszali się względem siebie, każdy z nich sądził, że będzie młodszy od brata.
 - Paradoks bliźniąt nazywany jest też paradoksem zegarów.

- Relatywistyczna kontrakcja długości \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że wynik pomiaru długości pręta zależy od stanu ruchu obserwatora inercyjnego. W szczególnym przypadku, gdy pręt znajduje się na osi X układu współrzędnych, mamy:

$$\Delta x = \Delta x' \cdot \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}, \quad \Delta x' > \Delta x$$

- Δx – wynik pomiaru długości pręta poruszającego się względem układu nieprimowanego, uzyskany przez obserwatora spoczywającego względem tego układu; pomiaru współrzędnych końców pręta obserwator dokonał w tym samym czasie
- $\Delta x'$ – wynik pomiaru długości pręta spoczywającego względem układu primowanego, uzyskany przez obserwatora spoczywającego względem tego układu

- V – prędkość skierowana wzdłuż osi X , z jaką układ primowany porusza się względem układu nieprimowanego, w chwili początkowej osie obu układów pokrywały się
- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercyjnym
- Wynik pomiaru długości pręta poruszającego się względem obserwatora jest mniejszy od wyniku pomiaru długości pręta spoczywającego względem obserwatora.

- Skrócenie FitzGeralda-Lorentza \Leftrightarrow hipoteza wysunięta niezależnie przez FitzGeralda (1889) i Lorentza (1892), tłumacząca negatywny wynik doświadczenia Michelsona-Morleya tym, że obiekty materialne poruszające się z prędkością o wartości (v) skracają się α -krotnie w kierunku ruchu w wyniku oddziaływania z eterem.

$$\alpha = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercyjnym

K Doświadczenia Lodge'a (1893), Rayleigha-Brace'a (1902 i 1904), Troutona-Noble'a (1903) oraz Troutona-Rankine'a (1908) wykazały, że hipoteza FitzGeralda-Lorentza jest błędna. Według Einsteina kontrakcja jest wynikiem własności czasoprzestrzeni, a nie oddziaływania pręta z hipotetycznym eterem.

B George Francis FitzGerald (1851-1901), irlandzki fizyk.

B Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), holenderski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1902.

- Zasada równoważności masy i energii \Leftrightarrow zasada głosząca, że masie (m) ciała spoczywającego względem inercyjnego układu odniesienia równoważna jest energia (E) będąca iloczynem masy (m) i kwadratu wartości prędkości światła w próżni.

$$E = mc^2$$

- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercyjnym
- Energia (E), równoważna masie (m) spoczywającego ciała, nazywana jest energią spoczynkową. Masa (m), równoważna energii (E), nazywana jest masą pozorną.

K Relacja ta posiada wiele spektakularnych zastosowań, wśród których należy wymienić bomby atomową i termojądrową, energetykę jądrową, zjawiska anihilacji i kreacji, zakrzywienie toru promieni świetlnych w polu grawitacyjnym oraz reakcje termojądrowe na Słońcu.

H Zasadę równoważności masy i energii podał Einstein 27 września 1905.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

- Relatywistyczny efekt Dopplera \Leftrightarrow zjawisko polegające na pozornej zmianie częstotliwości (ν) źródła światła spowodowanej względnym ruchem obserwatora i źródła.

$$\nu^{\text{ob}} = \nu \cdot \frac{\sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}}{1 + \frac{V}{c} \cdot \cos\varphi}$$

- ν^{ob} – częstotliwość światła mierzona przez obserwatora
- φ – kąt zawarty między promieniem wodzącym (\mathbf{r}) łączącym obserwatora ze źródłem światła a prędkością (\mathbf{V}) źródła względem obserwatora

P W przypadku ($\varphi = \pi/2$), gdy źródło światła porusza się prostopadle do kierunku obserwacji, mamy do czynienia z tzw. poprzecznym efektem Dopplera.

$$v^{\text{ob}} = v \sqrt{1 - \frac{V^2}{c^2}}$$

- Mechanika relatywistyczna 59
- Relatywistyczne prawo składania prędkości równoległych 60
- Relatywistyczny pęd 61
- Relatywistyczne równanie ruchu 63
- Masa spoczynkowa 66
- Masa podłużna 67
- Masa poprzeczna 68
- Masa relatywistyczna 69
- Masa pozorną 70
- Relatywistyczna energia całkowita 71
- Energia spoczynkowa 73
- Relatywistyczna energia kinetyczna 74

- Mechanika relatywistyczna \Leftrightarrow mechanika oparta na szczególnej teorii względności, badająca w układach inercjalnych ruchy ciał poruszających się z prędkościami, których graniczną wartością jest wartość prędkości światła w próżni w układzie inercjalnym.

- Relatywistyczne prawo składania prędkości równoległych \Leftrightarrow relacja między równoległymi prędkościami względem różnych inercjalnych układów odniesienia.

$$v = \frac{V + v'}{1 + \frac{Vv'}{c^2}}$$

- v – prędkość cząstki względem nieprimowanego układu
- V – prędkość skierowana wzdłuż osi X , z jaką układ primowany porusza się względem układu nieprimowanego, w chwili początkowej osie obu układów pokrywały się
- v' – prędkość cząstki względem primowanego układu
- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercjalnym
- prędkości v , V oraz v' z założenia są równoległe względem siebie

- Relatywistyczny pęd (\mathbf{p}_{rel}) \Leftrightarrow wielkość wektorowa będąca iloczynem masy (m) poruszającego się ciała, jego prędkości (\mathbf{v}) oraz współczynnika Lorentza (γ).

$$\mathbf{p}_{\text{rel}} = \gamma m \mathbf{v}, \quad [\mathbf{p}_{\text{rel}}] = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercyjnym

- Dla małych wartości prędkości (v) w stosunku do wartości prędkości (c) światła w próżni, wartość (p_{rel}) pędu relatywistycznego jest w przybliżeniu równa wartości klasycznego pędu (p).

$$\frac{v^2}{c^2} \ll 1 \quad \Rightarrow \quad p_{\text{rel}} \approx mv = p$$

- Relatywistyczne równanie ruchu \Leftrightarrow równanie stwierdzające, że w układzie inercyjnym siła (\mathbf{F}_{rel}) działająca na swobodną cząstkę jest równa pochodnej relatywistycznego pędu (\mathbf{p}_{rel}) tej cząstki względem czasu.

$$\mathbf{F}_{\text{rel}} = \frac{d\mathbf{p}_{\text{rel}}}{dt}$$

- Poprzednie równanie zapisywane jest też w innej równoważnej postaci.

$$\mathbf{F}_{\text{rel}} = m_{\parallel} \mathbf{a}_{\parallel} + m_{\perp} \mathbf{a}_{\perp}$$
$$m_{\parallel} = m\gamma^3$$
$$m_{\perp} = m\gamma$$
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- m_{\parallel} – masa podłużna
- m_{\perp} – masa poprzeczna
- \mathbf{a}_{\parallel} – składowa przyspieszenia równoległa do prędkości
- \mathbf{a}_{\perp} – składowa przyspieszenia prostopadła do prędkości

H Relatywistyczne równanie ruchu sformułował w ramach szczególnej teorii względności Planck w 1906.

B Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947), niemiecki fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1918.

- Masa spoczynkowa (m_0) \Leftrightarrow masa ciała spoczywającego względem obserwatora.

K Masa ciała nie zależy od stanu jego ruchu. Pojęcia takie jak masa spoczynkowa, masa relatywistyczna, masa podłużna oraz masa poprzeczna nie są obecnie używane przez fizyków, ponieważ prowadzą do zbędnych nieporozumień. Są one jedynie przedmiotem zainteresowania historyków fizyki.

- Masa podłużna \Leftrightarrow dawna nazwa wyrażenia podanego poniżej.

$$m_{\parallel} = m\gamma^3, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- γ – współczynnik Lorentza
- m – masa ciała
- v – wartość prędkości ciała
- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercyjnym

K Masa ciała nie zależy od stanu jego ruchu. Pojęcia takie jak masa spoczynkowa, masa relatywistyczna, masa podłużna oraz masa poprzeczna nie są obecnie używane przez fizyków, ponieważ prowadzą do zbędnych nieporozumień. Są one jedynie przedmiotem zainteresowania historyków fizyki.

- Masa poprzeczna \Leftrightarrow dawna nazwa wyrażenia podanego poniżej.

$$m_{\perp} = m\gamma, \quad \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- γ – współczynnik Lorentza
- m – masa ciała
- v – wartość prędkości ciała
- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercyjnym

K Masa ciała nie zależy od stanu jego ruchu. Pojęcia takie jak masa spoczynkowa, masa relatywistyczna, masa podłużna oraz masa poprzeczna nie są obecnie używane przez fizyków, ponieważ prowadzą do zbędnych nieporozumień. Są one jedynie przedmiotem zainteresowania historyków fizyki.

- Masa relatywistyczna (m_v) \Leftrightarrow dawna nazwa wyrażenia podanego poniżej.

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

- m – masa ciała
- v – wartość prędkości ciała
- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercyjnym

K Masa ciała nie zależy od stanu jego ruchu. Pojęcia takie jak masa spoczynkowa, masa relatywistyczna, masa podłużna oraz masa poprzeczna nie są obecnie używane przez fizyków, ponieważ prowadzą do zbędnych nieporozumień. Są one jedynie przedmiotem zainteresowania historyków fizyki.

- Masa pozorną \Leftrightarrow masa (m) równoważna energii (E).

$$m = \frac{E}{c^2}$$

- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercyjnym

- Relatywistyczna energia całkowita (E^{rel}) \Leftrightarrow suma relatywistycznej energii kinetycznej ciała o masie (m) poruszającego się z prędkością o wartości (v) względem inercjalnego układu odniesienia i energii spoczynkowej (E_0) tego ciała.

$$E^{\text{rel}} = E_k^{\text{rel}} + E_0 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots \right)$$

- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercjalnym

- Dla małych wartości prędkości (v) w stosunku do wartości prędkości (c) światła w próżni relatywistyczna energia całkowita (E^{rel}) jest w przybliżeniu równa sumie energii spoczynkowej (E_0) i klasycznej energii kinetycznej (E_k).

$$\frac{v^2}{c^2} \ll 1 \quad \Rightarrow \quad E^{\text{rel}} \approx mc^2 + \frac{1}{2}mv^2 = E_0 + E_k$$

- Energia spoczynkowa (E_0) \Leftrightarrow energia równoważna masie (m) ciała spoczywającego względem inercjalnego układu odniesienia.

$$E_0 = mc^2$$

- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercjalnym

- Relatywistyczna energia kinetyczna \Leftrightarrow różnica relatywistycznej energii całkowitej ciała o masie (m) poruszającego się z prędkością o wartości (v) względem inercjalnego układu odniesienia i energii spoczynkowej tego ciała.

$$E_k^{\text{rel}} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - mc^2 = mc^2 \left(\frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2} + \frac{3}{8} \frac{v^4}{c^4} + \dots \right)$$

- c – wartość prędkości światła w próżni w układzie inercjalnym

- Dla małych wartości prędkości (v) w stosunku do wartości prędkości (c) światła w próżni relatywistyczna energia kinetyczna jest w przybliżeniu równa klasycznej energii kinetycznej (E_k).

$$\frac{v^2}{c^2} \ll 1 \quad \Rightarrow \quad E_k^{\text{rel}} \approx \frac{1}{2}mv^2 = E_k$$

- Testy szczególnej teorii względności 77
- Doświadczenie Ivesa-Stilwella 78
- Wydłużenie czasu życia poruszających się cząstek elementarnych 79
- Anihilacja pary cząstka-antycząstka 80
- Kreacja pary cząstka antycząstka 81
- Defekt masy 82
- Reakcja rozszczepienia 83
- Reakcja termojądrowa (fuzja) 84

- Testy szczególnej teorii względności \Leftrightarrow zjawiska i doświadczenia potwierdzające wnioski wynikające ze szczególnej teorii względności. Są nimi m.in.:
 - doświadczenie Ivesa-Stilwella,
 - zjawisko wydłużenia czasu życia poruszających się cząstek elementarnych,
 - zjawisko anihilacji,
 - zjawisko kreacji pary cząstka-antycząstka,
 - defekt masy,
 - reakcja rozszczepienia,
 - reakcja termojądrowa (fuzja).

- Doświadczenie Ivesa-Stilwella \Leftrightarrow doświadczenie przeprowadzone w 1938 i 1941 przez Ivesa i Stilwella, w którym potwierdzili istnienie relatywistycznego efektu Dopplera. Źródłem światła były atomy wodoru poruszające się w próżniowej rurze z szybkością $2,0 \cdot 10^6$ m/s.

B Herbert Eugene Ives (1882-1953), amerykański fizyk i wynalazca.

B George R. Stilwell, amerykański fizyk.

Wydłużenie czasu życia poruszających się cząstek elementarnych

- Wydłużenie czasu życia poruszających się cząstek elementarnych
⇔ Durbin, Loar oraz Havens potwierdzili (1952) doświadczalnie dylatację czasu, wyznaczając średni czas życia mezonów π^+ i π^- .
- R. P. Durbin, H. H. Loar, W. W. Havens: [The Lifetimes of the \$\pi^+\$ and \$\pi^-\$ Mesons](#). *Physical Review* **88**, 2 (10/1952) 179-183.

B Richard P. Durbin, amerykański fizyk.

B Howard Hunt Loar, amerykański fizyk.

B William Westerfield Havens (1920-2004), amerykański fizyk.

- Anihilacja pary cząstka-antycząstka \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że cząstka i jej antycząstka po spotkaniu zamieniają się w co najmniej dwa fotony o energii równoważnej sumie ich mas.
- Elektron i pozytron w wyniku anihilacji zamieniają się w dwa fotony o energii 511 keV każdy.

- Kreacja pary cząstka antycząstka \Leftrightarrow zjawisko polegające na powstawaniu w odpowiednich warunkach pary cząstka-antycząstka z fotonu o energii równoważnej ich łącznej masie.
- Kreację pary elektron-pozytron z fotonu gamma po raz pierwszy zaobserwował Blackett w 1933 w udoskonalonej przez niego komorze Wilsona podczas badania promieniowania kosmicznego.

B Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974), brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1948

-
- Defekt masy (Δm) \Leftrightarrow różnica sumy mas nukleonów swobodnych i masy utworzonego z nich jądra atomowego. Energia równoważna defektowi masy jest równa energii wiązania jądra.

- Reakcja rozszczepienia \Leftrightarrow reakcja jądrowa, w której jądro samorzutnie lub wskutek bombardowania go cząstkami elementarnymi rozpada się na mniejsze fragmenty.
- W reakcji rozszczepienia jądra atomowego wyzwala się duża ilość energii, ponieważ suma mas substratów jest większa od sumy mas produktów.



- Reakcja termojądrowa (fuzja) \Leftrightarrow reakcja jądrowa, w której z dwóch jąder lekkich powstaje nowe jądro.
- W reakcji termojądrowej wyzwala się duża ilość energii, ponieważ suma mas substratów jest większa od sumy mas produktów.
- Do zajścia reakcji termojądrowej wymagana jest temperatura rzędu stu milionów K, stąd przedrostek termo w nazwie tej reakcji.



Ogólna teoria względności i kosmologia relatywistyczna

dr Zbigniew Osiak

Rysunki wykonała

Małgorzata Osiak

-
- Ogólna teoria względności 87
 - Doświadczalne podstawy ogólnej teorii względności 92
 - Matematyczne podstawy ogólnej teorii względności 95
 - Podstawowe równania ogólnej teorii względności 104
 - Podstawowe wyniki ogólnej teorii względności 109
 - Wybrane testy ogólnej teorii względności 125
 - Elementy kosmologii relatywistycznej 134

- Ogólna teoria względności 87
- Ogólna zasada względności 89
- Zasada równoważności 90
- Podstawowe założenia ogólnej teorii względności 91

•Ogólna teoria względności \Leftrightarrow teoria zajmująca się badaniem zjawisk przebiegających w dowolnych układach odniesienia w czterowymiarowej czasoprzestrzeni, której deformacja (krzywizna) zależy od rozkładu gęstości energii wszelakiej postaci. OTW jest przede wszystkim teorią tłumaczącą grawitację jako wynik deformacji (zakrzywienia) czasoprzestrzeni. Swobodne cząstki próbne poruszają się po torach, którym w czasoprzestrzeni odpowiadają linie geodezyjne. OTW zmusza do rewizji między innymi takich pojęć jak siły grawitacyjne i układy inercjalne.

H 25 listopada 1915 uważany jest za datę powstania Ogólnej Teorii Względności. Tego dnia na posiedzeniu Królewskiej Pruskiej Akademii Nauk w Berlinie Einstein przedstawił pracę kończącą ośmioletni etap formułowania OTW.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

- Ogólna zasada względności \Leftrightarrow zasada głosząca, że definicje wielkości fizycznych oraz prawa (równania) fizyki można tak sformułować, aby ich ogólne postacie były niezależne od wyboru układu odniesienia.

H Ogólną zasadę względności sformułował Einstein w 1907.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

- Zasada równoważności \Leftrightarrow zasada głosząca, że siły działające na cząstkę próbną w polu grawitacyjnym są lokalnie równoważne siłom bezwładności pojawiającym się w przyspieszonym układzie odniesienia. Pole grawitacyjne (jednorodne w nieskończenie małej objętości) można w pełni zamienić przyspieszonym układem odniesienia.

H Zasadę równoważności sformułował w 1907 Einstein i wywnioskował z niej istnienie grawitacyjnego przesunięcia ku czerwieni oraz odchylenia promieni świetlnych w polu grawitacyjnym.

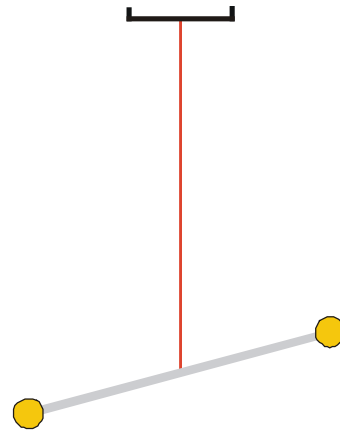
B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1921.

- Podstawowe założenia ogólnej teorii względności \Leftrightarrow cztery zasady, z których wywodzona jest ogólna teoria względności:
- Postuluje się, że definicje wielkości fizycznych oraz prawa (równania) fizyki można tak sformułować, aby ich ogólne postacie były niezależne od wyboru układu odniesienia. Postulat ten nazywany jest ogólną zasadą względności.
- Zakłada się, że maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów jest taka sama we wszystkich układach odniesienia.
- Na podstawie równości masy bezwładnej i grawitacyjnej formułuje się zasadę równoważności, stwierdzającą, że natężenie jednorodnego pola grawitacyjnego jest równoważne stałemu przyspieszeniu (ze znakiem minus) odpowiedniego układu odniesienia.
- Przyjmuje się, że deformacja (krzywizna) czasoprzestrzeni zależy od rozkładu gęstości energii wszelakiej postaci.

- Doświadczenie Eötvösa 93

• Doświadczenie Eötvösa (1888-1908) \Leftrightarrow pomiary przeprowadzane przez Eötvösa w latach 1888-1908. Wykazał on doświadczalnie równość masy grawitacyjnej i inercyjnej z dokładnością do $5 \cdot 10^{-9}$. Na cienkim drucie ze stopu platyny i irydu podwiesił poprzecznie lekki pręt. Na jego końcach znajdowały się ciężarki o identycznym kształcie i jednakowych masach grawitacyjnych, wykonane z różnych materiałów. Gdyby masa grawitacyjna nie była proporcjonalna do masy inercyjnej, to na ciężarki działałyby różne siły bezwładności, będące skutkiem ruchu wirowego Ziemi. Wynik doświadczenia był negatywny, Eötvös nie stwierdził skręcenia drutu. Doświadczenie Eötvösa stanowi potwierdzenie dla sformułowanej przez Einsteina zasady równoważności, która jest jednym z podstawowych założeń ogólnej teorii względności.

B Baron Roland von Eötvös (1848-1919), węgierski geofizyk.



• Doświadczenie Eötvösa

- Tensor n-tego rzędu 96
- Czasoprzestrzeń 97
- Przedział czasoprzestrzenny 98
- Metryka 99
- Tensor metryczny 100
- Tensor krzywizny Ricciiego 101
- Tensor energii-pędu 102
- Linia geodezyjna 103

- Tensor n-tego rzędu \Leftrightarrow wielkość, dla określenia której należy podać w czterowymiarowej czasoprzestrzeni 4^n liczb ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$), nazywanych składowymi (współrzednymi) tensora n-tego rzędu. Przy zmianie układu współrzędnych składowe tensora transformują się według ściśle określonych wzorów.
- Tensor zerowego rzędu, nazywany skalar, posiada jedną składową (T).
- Tensor pierwszego rzędu, nazywany czterowektorem, ma cztery składowe (T_1, T_2, T_3, T_4).
- Tensor drugiego rzędu ma szesnaście składowych:

$$(T_{11}, T_{12}, T_{13}, T_{14}, T_{21}, T_{22}, T_{23}, T_{24}, T_{31}, T_{32}, T_{33}, T_{34}, T_{41}, T_{42}, T_{43}, T_{44})$$

W przypadku tensorów symetrycznych:

$$T_{12} = T_{21}, \quad T_{13} = T_{31}, \quad T_{14} = T_{41}, \quad T_{23} = T_{32}, \quad T_{24} = T_{42}, \quad T_{34} = T_{43}$$

- Czasoprzestrzeń \Leftrightarrow czterowymiarowa przestrzeń o trzech wymiarach przestrzennych i czwartym wymiarze czasowym. Punktami czasoprzestrzeni są zdarzenia.

P Jak wyobrazić sobie czwarty wymiar? – Wystarczy spojrzeć na zegarek.

H Pojęcie czasoprzestrzeni wprowadził Minkowski w 1908. Według niego “Przestrzeń sama w sobie i czas sam w sobie są fikcją i tylko pewien sposób połączenia ich obu jest samodzielnym bytem”.

B Hermann Minkowski (1864-1909), niemiecki matematyk i fizyk.

- Przedział czasoprzestrzenny (ds) \Leftrightarrow różniczka odległości czasoprzestrzennej między dwoma blisko siebie położonymi zdarzeniami (punktami) (x^1, x^2, x^3, x^4) i $(x^1 + dx^1, x^2 + dx^2, x^3 + dx^3, x^4 + dx^4)$.
- Kwadrat przedziału czasoprzestrzennego określony jest poniższym wyrażeniem.

$$(ds)^2 = \sum_{\mu=1}^4 \sum_{\nu=1}^4 g_{\mu\nu} dx^{\mu} dx^{\nu}$$

- $g_{\mu\nu}$ – składowe tensora metrycznego
- $x^4 = ict$
- $i^2 = -1$
- i – jednostka urojona
- c – maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów
- t – czas

-
- Metryka \Leftrightarrow wyrażenie określające odległość między dwoma punktami danej przestrzeni.

- Tensor metryczny ($g_{\mu\nu}$) \Leftrightarrow symetryczny tensor drugiego rzędu, którego składowe ($g_{\mu\nu}$) są współczynnikami kwadratu różniczki odległości $(ds)^2$ między dwoma blisko siebie położonymi punktami (x^1, x^2, x^3, x^4) i $(x^1 + dx^1, x^2 + dx^2, x^3 + dx^3, x^4 + dx^4)$, wyrażonej przez różniczki współrzędnych (dx^α).

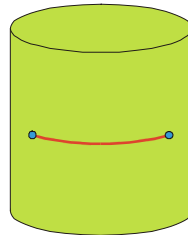
$$(ds)^2 = \sum_{\mu=1}^4 \sum_{\nu=1}^4 g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$$

- $g_{\mu\nu}$ – składowe tensora metrycznego
- $x^4 = ict$
- $i^2 = -1$
- i – jednostka urojona
- c – maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów
- t – czas

-
- Tensor krzywizny Ricciego ($R_{\mu\nu}$) \Leftrightarrow symetryczny tensor drugiego rzędu, którego składowe są utworzone ze składowych tensora metrycznego oraz ich pochodnych.

- Tensor energii-pędu ($T_{\mu\nu}$) \Leftrightarrow symetryczny tensor drugiego rzędu zawierający informacje o źródłach pola grawitacyjnego.
W przypadku gdy źródłem pola grawitacyjnego jest ciecz doskonała, tensor energii-pędu opisuje rozkład jej prędkości i ciśnienia.

- Linia geodezyjna \Leftrightarrow najkrótsza linia łącząca dwa punkty w danej przestrzeni. Według ogólnej teorii względności swobodne cząstki próbne poruszają się w trójwymiarowej przestrzeni po torach, którym w czterowymiarowej czasoprzestrzeni, zdeformowanej przez źródłowe masy i energie, odpowiadają linie geodezyjne.



- Linia geodezyjna łącząca dwa punkty na powierzchni trójwymiarowego walca

- Równania pola grawitacyjnego 105
- Równania ruchu 108

- Równania pola grawitacyjnego \Leftrightarrow podstawowe równania ogólnej teorii względności opisujące pole grawitacyjne.

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

- $R_{\mu\nu}$ – składowe tensora krzywizny Ricciego
- $g_{\mu\nu}$ – składowe tensora metrycznego
- R – skalar krzywizny utworzony z tensora krzywizny Ricciego
- G – stała grawitacyjna
- c – maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów
- $T_{\mu\nu}$ – składowe tensora energii-pędu

- Równania pola zapisywane są także w innej równoważnej postaci.

$$R_{\alpha\beta} = -\frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} T \right), \quad T = \frac{8\pi G}{c^4} R$$

- T – skalar utworzony z tensora energii-pędu
- Rozwiązanie dziesięciu równań pola grawitacyjnego, przy zadanych dziesięciu składowych tensora energii-pędu, polega na znalezieniu dziesięciu składowych tensora metrycznego spełniających te równania.

H Równania pola grawitacyjnego przedstawili: Einstein na posiedzeniu Królewskiej Pruskiej Akademii Nauk w Berlinie 25 listopada 1915 oraz niezależnie Hilbert na posiedzeniu Królewskiego Towarzystwa Naukowego w Getyndze 20 listopada 1915.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

B David Hilbert (1862-1943), niemiecki matematyk.

- Równania ruchu \Leftrightarrow równania dla składowych czteroprzyspieszenia $\tilde{a}_{\text{force}}^\alpha$ cząstki o masie (m)

$$\frac{\tilde{F}^\alpha}{m} = \tilde{a}_{\text{force}}^\alpha = -c^2 \left(\frac{d^2 x^\alpha}{ds^2} + \Gamma_{\mu\nu}^\alpha \frac{dx^\mu}{ds} \frac{dx^\nu}{ds} \right)$$

\tilde{F}^α – składowe siły wypadkowej, z pominięciem sił “grawitacyjnych” i “bezwładnościowych”

$\Gamma_{\alpha\beta}^\mu$ – symbole Christoffela drugiego rodzaju

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu < 0$$

$$g_{\mu\nu} \geq 0$$

$g_{\mu\nu}$ – składowe tensora metrycznego czasoprzestrzeni

- Grawitacyjna dyfrakcja światła 110
- Grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni 112
- Obrót orbity planety 113
- Kołysanie się orbity planety 114
- Grawitacyjna dylatacja czasu 115
- Grawitacyjna kontrakcja odległości 116
- Rozwiązanie Schwarzschilda 117
- Czarna dziura 119
- Promień Schwarzschilda 120
- Horyzont zdarzeń 121
- Fale grawitacyjne 122
- Uogólnione równania Maxwella 123
- Teoria Kaluzy 124

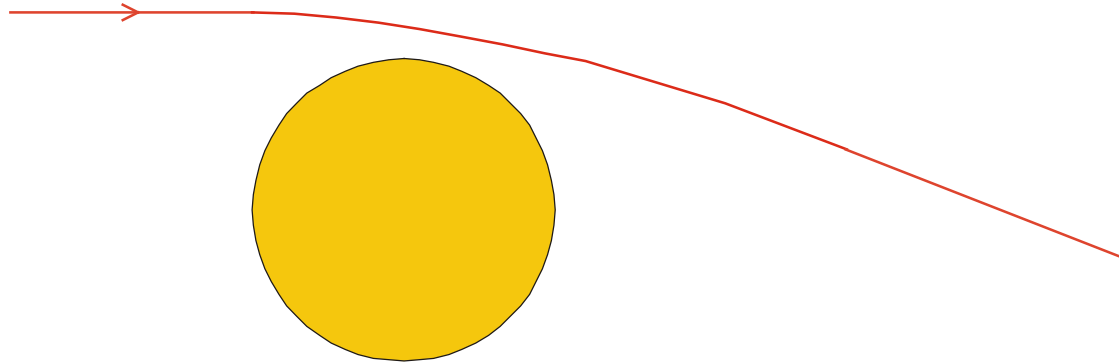
- Grawitacyjna dyfrakcja światła \Leftrightarrow zjawisko polegające na ugięciu promieni świetlnych przelatujących w pobliżu Słońca lub innej gwiazdy.

H Ugięcie promieni świetlnych w polu grawitacyjnym przewidział Einstein w 1907 i 1911, a dokładnie obliczył w 1915.

H Przeprowadzone 29 maja 1919 pod kierunkiem Eddingtona obserwacje zaćmienia Słońca potwierdziły przewidziane przez ogólną teorię względności odchylenie promieni świetlnych w polu grawitacyjnym tej gwiazdy.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

B Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944), brytyjski astronom, astrofizyk, fizyk i matematyk.



- Grawitacyjna dyfrakcja światła

- Grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że widmo światła docierającego do Ziemi ze źródła znajdującego się na masywnym obiekcie nieruchomym względem Ziemi jest przesunięte ku czerwieni w stosunku do widma światła emitowanego z identycznego źródła znajdującego się na Ziemi. Światło oddalające się od emitera zmniejsza swoją częstotliwość, wchodząc w obszar słabszego pola grawitacyjnego.
- Grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni nazywane jest też grawitacyjnym poczerwienieniem.

H Grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni przewidział Einstein w 1907.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

- Obrót orbity planety \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że orbita planety obraca się w swojej płaszczyźnie. Planety poruszają się po rozetach eliptycznych.
- Równanie orbity w stacjonarnym centralnie symetrycznym polu grawitacyjnym otrzymane w ramach ogólnej teorii względności różni się od analogicznego równania w teorii Newtona poprawką opisującą obrót orbity. Drugą przyczyną obrotu orbity jest oddziaływanie grawitacyjne innych planet.

- Kołysanie się orbity planety \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że orbitalny moment pędu planety (prostopadły do płaszczyzny orbity) ulega precesji.
- Efekt ten opisali Lense i Thirring w 1918 w ramach ogólnej teorii względności.

B Joseph Lense (1890-1985), austriacki fizyk i matematyk.

B Hans Thirring (1888-1976), austriacki fizyk teoretyk.

- Grawitacyjna dylatacja czasu \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że przeskalowana odległość czasowa między dwoma blisko siebie położonymi punktami czasoprzestrzeni jest tym większa, im słabsze jest pole grawitacyjne.

- Grawitacyjna kontrakcja odległości \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że przeskalowana odległość przestrzenna między dwoma blisko siebie położonymi punktami czasoprzestrzeni jest tym mniejsza, im słabsze jest pole grawitacyjne.

- Rozwiązanie Schwarzschilda \Leftrightarrow rozwiązanie równań pola grawitacyjnego poza obszarem źródłowej masy rozmieszczonej jednorodnie w kuli.

P Wartość przyspieszenia (a) swobodnej cząstki próbnej, spadającej radialnie w polu grawitacyjnym, dana jest poniższym równaniem.

$$a = \frac{GM}{r^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{r_s}{r}}}, \quad r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad r > r_s$$

- G – stała grawitacyjna
- r – odległości od centrum źródłowej masy (M)
- r_s – promień Schwarzschilda
- c – maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów

- Rozwiązanie Schwarzschilda nazywane jest też rozwiązaniem próżniowym lub zewnętrznym.

H Rozwiązanie próżniowe podał Schwarzschild w 1916.

B Carl Schwarzschild (1873-1916), niemiecki astronom i fizyk.

- Czarna dziura \Leftrightarrow ciało w kształcie kuli, dla którego stosunek masy (M) do promienia (R) spełnia nierówność

$$\frac{M}{R} > \frac{c^2}{2G} = 0,6733055 \cdot 10^{27} \frac{\text{kg}}{\text{m}}$$

- c – maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów
- G – stała grawitacyjna

C Nazwę czarna dziura zaproponował Wheeler (1967 – wykład, 1968 – artykuł).

B John Archibald Wheeler (1911-2008), amerykański fizyk teoretyk.

- Promień Schwarzschilda (r_s) \Leftrightarrow promień sfery, otaczającej czarną dziurę, z której wartość prędkości ucieczki jest równa maksymalnej wartości prędkości rozchodzenia się sygnałów.

$$r_s = \frac{2GM}{c^2}, \quad \frac{2G}{c^2} = 1,5 \cdot 10^{-27} \cdot \frac{\text{m}}{\text{kg}}$$

- Promień Schwarzschilda nazywany jest też promieniem grawitacyjnym.
- G – stała grawitacyjna
- c – maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów

B Carl Schwarzschild (1873-1916), niemiecki astronom i fizyk.

- Horyzont zdarzeń \Leftrightarrow sfera o promieniu równym promieniowi Schwarzschilda, otaczająca czarną dziurę. Prędkość ucieczki z horyzontu zdarzeń jest równa maksymalnej wartości prędkości rozchodzenia się sygnałów.

• Fale grawitacyjne \Leftrightarrow rozchodzące się w przestrzeni zaburzenia pola grawitacyjnego w postaci zmian składowych tensora metrycznego. Fale grawitacyjne są falami poprzecznymi, ich prędkość w próżni jest równa prędkości światła.

H Teorię fal grawitacyjnych sformułował Einstein w 1916.

H W 1979 Taylor wykazał, że podwójny pulsar (PSR B1913+16) emituje fale grawitacyjne. Po czterech latach obserwacji zarejestrował, że okres obiegu orbity pulsara zmniejsza się o 75 milionowych części sekundy na rok. Jest to spowodowane emisją fal grawitacyjnych. Pulsar i towarzysząca mu gwiazda neutronowa tracą energię i zbliżają się do siebie. Zgodnie z trzecim prawem Keplera okres obiegu orbity staje się krótszy.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

B Joseph Hooton Taylor (ur. 1941), amerykański astrofizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1993.

-
- Uogólnione równania Maxwella \Leftrightarrow równania Maxwella w postaci ogólnie kowariantnej, opisujące wpływ pola grawitacyjnego na przebieg zjawisk elektromagnetycznych.

- Teoria Kaluzy \Leftrightarrow pięciowymiarowa jednolita teoria pola grawitacyjnego i elektromagnetycznego sformułowana w ramach ogólnej teorii względności przez Kaluzę w 1921.

H Einstein początkowo odniósł się sceptycznie do koncepcji Kaluzy unifikacji grawitacji i elektromagnetyzmu. Później poświęcił temu pomysłowi wiele prac.

B Theodor Franz Eduard Kaluza (1885-1954), niemiecki fizyk teoretyk.

- Testy ogólnej teorii względności 126
- Ugięcie promieni świetlnych przelatujących w pobliżu Słońca 127
- Soczewka grawitacyjna 128
- Anomalny obrót peryhelium Merkurego 129
- Doświadczenie Pounda-Rebki 130
- Doświadczenie Shapiro 131
- Pośredni (astronomiczny) dowód istnienia fal grawitacyjnych 132
- GPS (Global Positioning System) 133

-
- Testy ogólnej teorii względności \Leftrightarrow zjawiska, obserwacje i doświadczenia potwierdzające wnioski wynikające z ogólnej teorii względności. Są nimi m.in.:
 - ugięcie promieni świetlnych przelatujących w pobliżu Słońca,
 - obrót peryhelium Merkurego,
 - doświadczenie Pounda-Rebki,
 - doświadczenie Shapiro,
 - pośredni dowód istnienia fal grawitacyjnych.

Ugięcie promieni świetlnych przelatujących w pobliżu Słońca 127

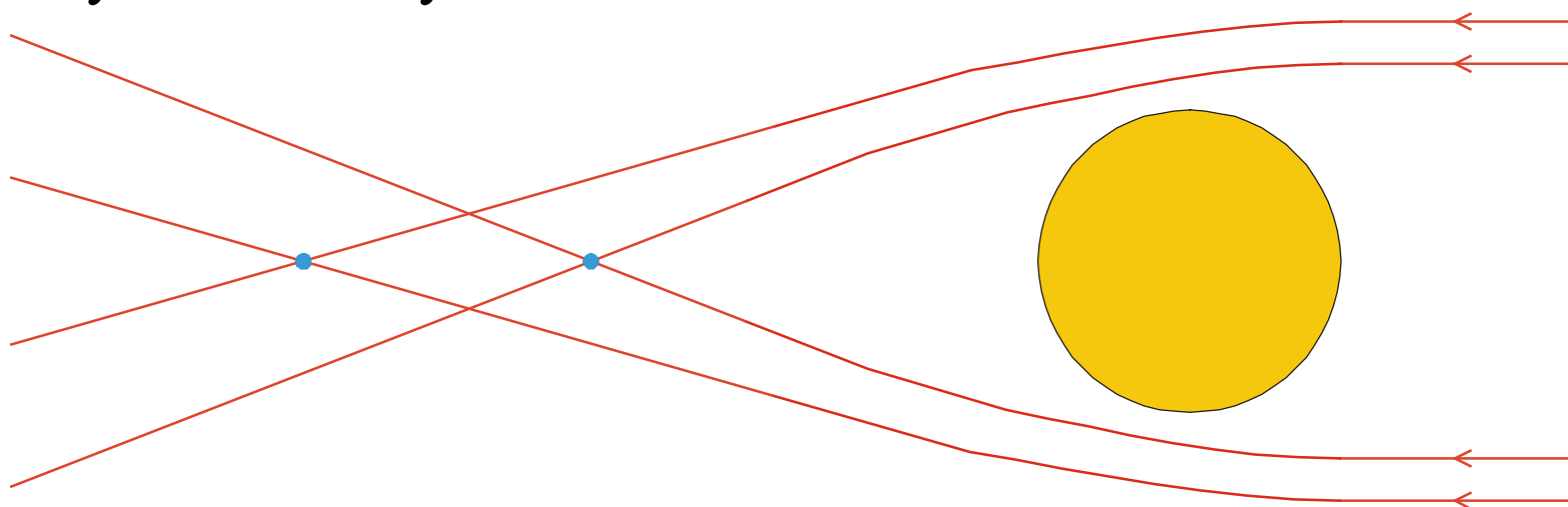
- Ugięcie promieni świetlnych przelatujących w pobliżu Słońca \Leftrightarrow przeprowadzone 29 maja 1919 pod kierunkiem Eddingtona obserwacje zaćmienia Słońca potwierdziły przewidziane przez ogólną teorię względności odchylenie promieni świetlnych w polu grawitacyjnym tej gwiazdy.

B Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944), brytyjski astronom, astrofizyk, fizyk i matematyk.

• Soczewka grawitacyjna \Leftrightarrow pole grawitacyjne działające na wiązkę fal elektromagnetycznych jak soczewka o wielu ogniskach. Dla promieni biegnących dalej od źródła pola grawitacyjnego ogniskowa jest większa.

H Soczewkowanie grawitacyjne opisał Einstein w 1936.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.



• Soczewka grawitacyjna

• Anomalny obrót peryhelium Merkurego \Leftrightarrow zjawisko polegające na tym, że peryhelium Merkurego przesuwają się o 574 sekundy kątowne na stulecie wskutek ruchu tej planety po rożecie eliptycznej, z czego 43 sekundy kątowne nie dają się wyjaśnić przez teorię Newtona.

H Zjawisko to zaobserwował w 1859 Le Verrier.

H Einstein wyjaśnił jakościowo i ilościowo 18 listopada 1915 anomalny obrót peryhelium Merkurego (i pozostałych planet).

B Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877), francuski astronom.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

• Doświadczenie Pounda-Rebki \Leftrightarrow doświadczenie przeprowadzone przez Pounda i Rebkę w 1960, polegające na zmierzeniu w warunkach laboratoryjnych przesunięcia linii widmowych spowodowanego polem grawitacyjnym Ziemi. Eksperyment z większą dokładnością powtórzyli Pound i Snider w 1964.

B Robert Vivian Pound (1919-2010), kanadyjsko-amerykański fizyk.

B Glen Anderson Rebka (ur. 1931), amerykański fizyk.

B Joseph L. Snider, amerykański fizyk.

- Doświadczenie Shapiro \Leftrightarrow doświadczenie wykonane przez Shapiro w 1968, które wykazało, że czas przelotu sygnału radarowego na trasie Ziemia-Wenus (Merkury)-Ziemia w pobliżu Słońca jest dłuższy niż czas przelotu z dala od Słońca. Retardacja (opóźnienie) sygnału jest jednym z testów ogólnej teorii względności.

B Irwin I. Shapiro (ur. 1929), amerykański fizyk i astrofizyk.

Pośredni (astronomiczny) dowód istnienia fal grawitacyjnych 132

• Pośredni (astronomiczny) dowód istnienia fal grawitacyjnych \Leftrightarrow w 1979 Taylor wykazał, że podwójny pulsar (PSR B1913+16) emituje fale grawitacyjne. Po czterech latach obserwacji zarejestrował, że okres obiegu orbity pulsara zmniejsza się o 75 milionowych części sekundy na rok. Jest to spowodowane emisją fal grawitacyjnych. Pulsar i towarzysząca mu gwiazda neutronowa tracą energię i zbliżają się do siebie. Zgodnie z trzecim prawem Keplera okres obiegu orbity staje się krótszy.

B Joseph Hooton Taylor (ur. 1941), amerykański astrofizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1993.

-
- GPS (Global Positioning System) \Leftrightarrow globalny system nawigacyjny.
 - Aby określić pozycję w przestrzeni i czas, konieczny jest jednoczesny odbiór sygnałów z przynajmniej czterech satelitów.
 - Nie uwzględnienie poprawek wynikających z teorii względności spowodowałoby błąd w pomiarze czasu wynoszący 38580 ns na dobę, a w pomiarze odległości 11578 m na dobę.

- Kosmologia relatywistyczna 135
- Człon kosmologiczny 136
- Stała kosmologiczna 137
- Prawo Hubble'a 138
- Stała Hubble'a 140
- Gęstość krytyczna wszechświata 141
- Rozwiązania Friedmana 142
- Teoria wielkiego wybuchu 143
- Paradoks Olbersa 145
- Promieniowanie tła 146
- Problem horyzontu 148
- Problem płaskości 149
- Inflacja 150
- Zasada kosmologiczna 151
- Teoria stanu stacjonarnego rozszerzającego się wszechświata 152
- Przyspieszający wszechświat 154

- Kosmologia relatywistyczna \Leftrightarrow nauka zajmująca się badaniem własności wszechświata w ramach ogólnej teorii względności.

H 8 lutego 1917 uważany jest za datę powstania kosmologii relatywistycznej. W tym dniu na posiedzeniu Królewskiej Pruskiej Akademii Nauk Einstein przedstawił pierwszy model wszechświata, zgodny z ówczesnymi obserwacjami astronomicznymi. Model ten opisywał wszechświat statyczny, jednorodny, skończony (ale nieograniczony), o stałej niezależnej od czasu krzywiznie przestrzeni.

B Albert Einstein (1879-1955), genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921.

- Człon kosmologiczny \Leftrightarrow człon $(\Lambda g_{\mu\nu})$ dodany przez Einsteina w 1917 do równań pola grawitacyjnego. Zmodyfikowane równania pola zapisywane są w dwóch równoważnych postaciach.

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

$$R_{\alpha\beta} + \Lambda g_{\alpha\beta} = -\frac{8\pi G}{c^4} \left(T_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g_{\alpha\beta} T \right)$$

- Λ – stała kosmologiczna
- Opierając się na równaniach pola grawitacyjnego z członem kosmologicznym Einstein przedstawił w 1917 pierwszy model wszechświata w ramach ogólnej teorii względności.

-
- Stała kosmologiczna (Λ) \Leftrightarrow stała występująca w równaniach pola grawitacyjnego z członem kosmologicznym.

- Prawo Hubble'a \Leftrightarrow prawo stwierdzające, że galaktyki oddalają się od nas z prędkością radialną (v) wprost proporcjonalną do ich odległości (r).

$$v = Hr, \quad [H] = s^{-1}$$

- H – stała Hubble'a

H Prawo to odkrył Hubble w 1929, porównując dopplerowskie przesunięcia ku czerwieni linii spektralnych światła pochodzącego z galaktyk i ich odległości.

B Edwin Powell Hubble (1889-1953), amerykański astronom i kosmolog.

K Obserwacje Hubble'a stały się podstawą teorii wielkiego wybuchu oraz potwierdzały poprawność rozwiązań Friedmana równań pola Einsteina, opisujących rozszerzający się wszechświat.

K Ucieczkę galaktyk można interpretować jako rozszerzanie się przestrzeni dla wszystkich obserwatorów spoczywających względem otaczającej ich materii jednorodnie rozmieszczonej w skali wszechświata. Ekspansji ulega przestrzeń, wskutek czego obserwujemy pozorną ucieczkę galaktyk.

- Stała Hubble'a (H) \Leftrightarrow współczynnik proporcjonalności w prawie Hubble'a.

$$H \approx 2,27 \cdot 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

- W ramach teorii wielkiego wybuchu stałą Hubble'a można interpretować jako odwrotność wieku (t) naszego wszechświata.

$$t = \frac{1}{H} \approx 44 \cdot 10^{16} \text{ s} \approx 13,94 \cdot 10^9 \text{ lat}$$

B Edwin Powell Hubble (1889-1953), amerykański astronom i kosmolog.

- Gęstość krytyczna wszechświata (ρ_{kryt}) \Leftrightarrow gęstość wszechświata, przy której staje się on przestrzennie płaski, a szybkość ekspansji ulega spowolnieniu.

$$\rho_{\text{kryt}} = \frac{3H^2}{8\pi G} \approx 9,22 \cdot 10^{-27} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

- H – stała Hubble’a
- G – stała grawitacyjna

- Rozwiązania Friedmana \Leftrightarrow kosmologiczne rozwiązania równań pola grawitacyjnego podane przez Friedmana w 1922 oraz 1924. Z analizy tych rozwiązań wynika m.in., że jeżeli gęstość materii we wszechświecie:
 - jest większa od gęstości krytycznej, to początkowo rozszerzający się wszechświat po pewnym czasie zacznie się kurczyć;
 - jest równa gęstości krytycznej, to wszechświat jest przestrzennie płaski i rozszerza się coraz wolniej;
 - jest mniejsza od gęstości krytycznej, to wszechświat nieustannie będzie się rozszerzać.

B Aleksander Aleksandrowicz Friedman (1888-1925), rosyjski matematyk i fizyk.

- Teoria wielkiego wybuchu \Leftrightarrow teoria głosząca, że wszechświat powstał około 14 miliardów lat temu. W rozwiązaniach Friedmana, opisujących ekspansję wszechświata, pojawia się początkowa osobliwość, w której objętość wszechświata jest równa zero, a jego gęstość – nieskończoności. Osobliwość tę teoria wielkiego wybuchu utożsamia ze stanem początkowym wszechświata. W 1948 Lemaître postulował, że wszechświat mógł się zacząć od rozpadu “pierwotnego atomu”. Tę dość mglistą hipotezę skonkretyzowali później inni uczeni, m.in. George Gamow.

C Nazwę wielki wybuch zaproponował Hoyle w 1950 podczas jednej z prowadzonych przez niego pogadarek radiowych.

B Aleksander Aleksandrowicz Friedman (1888-1925), rosyjski matematyk i fizyk.

B Georges Henri Joseph Édouard Lemaître (1894-1966), belgijski astrofizyk i kosmolog.

B George (Gieorgij Antonowicz) Gamow (1904-1968), amerykański fizyk teoretyk pochodzenia ukraińskiego.

B Sir Fred Hoyle (1915-2001), brytyjski astronom.

•Paradoks Olbersa \Leftrightarrow paradoks sformułowany w 1826 przez Olbersa: “Skoro wszechświat jest statyczny, jednorodny i nieskończony w czasie i przestrzeni, to dlaczego niebo w nocy jest ciemne?”. Olbers próbował wytłumaczyć ten paradoks, przyjmując, że materia międzygwiazdna pochłania zdążające ku Ziemi światło. Paradoks Olbersa rozwiązano dopiero prawie sto lat później w ramach teorii rozszerzającego się wszechświata Friedmana i bazującej na niej hipotezie wielkiego wybuchu. Niebo w nocy jest ciemne, ponieważ wiek wszechświata jest skończony i światło z odległych gwiazd jeszcze nie zdążyło dotrzeć do nas, a ponadto jego widmo jest przesunięte ku czerwieni.

C Paradoks Olbersa nazywany jest też paradoksem fotometrycznym.

B Heinrich Wilhelm Matthias Olbers (1758-1840), niemiecki astronom i lekarz.

- Promieniowanie tła \Leftrightarrow mikrofalowe promieniowanie, odpowiadające temperaturze 2,7 stopni Kelvina, docierające do Ziemi równomiernie ze wszystkich kierunków. Nazywane jest również promieniowaniem reliktowym lub szczątkowym.

H Promieniowanie tła odkryli Penzias i Wilson w 1965. Byli oni wtedy pracownikami w Laboratoriach Bella, zajmowali się łącznością radiową z satelitami. Używali do tego celu sześciometrowej anteny kierunkowej, pojawiający się w niej szum okazał się mikrofalowym izotropowym promieniowaniem tła. Odkrycie to potwierdziło hipotezę o istnieniu promieniowania szczątkowego jako pozostałości po wielkim wybuchu. Hipotezę taką sformułował po raz pierwszy Gamow w 1948.

B George (Gieorgij Antonowicz) Gamow (1904-1968), amerykański fizyk teoretyk pochodzenia ukraińskiego.

B Arno Allan Penzias (ur. 1933), amerykański astrofizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1978.

B Robert Woodrow Wilson (ur. 1936), amerykański radioastronom, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1978.

• Problem horyzontu \Leftrightarrow paradoks związany z teorią wielkiego wybuchu. Termiczne promieniowanie tła jest izotropowe, jego długość nie zależy od kierunku obserwacji. Aby to było możliwe, różne obszary przestrzeni powinny znajdować się w równowadze termicznej. Ale jak mogą oddziaływać ze sobą dwa źródła położone symetrycznie względem nas po przeciwnych stronach na horyzoncie obserwowalnego wszechświata, skoro w chwili dotarcia do Ziemi światło zdążyło pokonać dopiero połowę odległości między nimi? Paradoks ten stawiało wielu kosmologów, w tym Misner w 1969.

B Charles William Misner (ur. 1932), amerykański astronom i fizyk.

• Problem płaskości \Leftrightarrow paradoks związany z teorią wielkiego wybuchu. W sekundę po wielkim wybuchu gęstość materii we wszechświecie powinna być zbliżona z dokładnością do piętnastego miejsca po przecinku do wartości krytycznej, czyli takiej, przy której wszechświat staje się przestrzennie płaski, a szybkość ekspansji ulega spowolnieniu. W przeciwnym przypadku nastąpiłby wielki kolaps lub stan rozrzedzenia uniemożliwiający powstanie galaktyk.

H Problem płaskości sformułowali Dicke i Peebles w 1979.

B Robert Henry Dicke (1916-1997), amerykański fizyk.

B Phillip James Edwin Peebles (ur. 1935), amerykański kosmolog pochodzenia kanadyjskiego.

• Inflacja \Leftrightarrow wydarzenia, jakie miały miejsce w 10^{-35} sekundy po wielkim wybuchu i które trwały 10^{-32} sekundy. Nastąpił wtedy gwałtowny (inflacyjny) wzrost promienia obserwowalnego wszechświata. Podczas inflacji gęstość zmalała do wartości krytycznej. Ponieważ przed inflacją wszechświat był niezwykle mały, zdążyła ustalić się w nim równowaga termiczna. Dzięki temu obecnie obserwowalny wszechświat jest prawie płaski przestrzennie, a promieniowanie tła izotropowe.

H Hipotezę o inflacyjnej fazie kreacji wszechświata zaproponował Guth w 1981 w pracy “Wszechświat inflacyjny: Możliwe rozwiązania problemów horyzontu i płaskości”.

B Alan Harvey Guth (ur. 1947), amerykański fizyk teoretyk i kosmolog.

-
- Zasada kosmologiczna \Leftrightarrow zasada głosząca, że własności wszechświata nie zależą od położenia obserwatora i od czasu dokonywania obserwacji.

Teoria stanu stacjonarnego rozszerzającego się wszechświata 152

- Teoria stanu stacjonarnego rozszerzającego się wszechświata \Leftrightarrow teoria, którą zaproponowali Bondi i Gold w 1948, oparta na zasadzie kosmologicznej oraz na założeniu o ciągłym tworzeniu się materii. Inną wersję tej teorii, bazującą na modyfikacji równań pola grawitacyjnego, przedstawił Hoyle również w 1948. Modyfikacja ta polegała na dodaniu C-członu opisującego kreację materii, aby wytłumaczyć ekspansję.

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

K Podstawowa różnica między teoriami stanu stacjonarnego i wielkiego wybuchu polega na tym, że pierwsza z nich zakłada ciągłą kreację materii, a druga tylko jednorazową kreację w przeszłości.

Teoria stanu stacjonarnego rozszerzającego się wszechświata 153

B Sir Hermann Bondi (1919-2005), brytyjski kosmolog i matematyk urodzony w Austrii.

B Thomas Gold (1920-2004), amerykański astronom.

B Sir Fred Hoyle (1915-2001), brytyjski astronom.

- W 1998 Saul Perlmutter oraz **niezależnie** Brian P. Schmidt i Adam G. Riess odkryli gwałtowny wzrost poczerwienienia światła docierającego do Ziemi z bardzo odległych źródeł.
- Ponieważ uczeni ci są zwolennikami teorii wielkiego wybuchu opartej o kosmologiczne rozwiązanie Friedmana, zinterpretowali swoje obserwacje jako gwałtowny wzrost szybkości ekspansji wszechświata, który nastąpił około 5 mld lat temu.
- Perlmutter, Schmidt i Riess otrzymali w 2011 Nagrodę Nobla z fizyki “za odkrycie przyspieszającej ekspansji wszechświata na podstawie obserwacji odległych supernowych”.

Wykłady z Fizyki 14



Zbigniew Osiak

**Teoria
Względności**