

# Teoria Względności



Zbigniew Osiak

**Kalendarium**

**14**

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>

**TEORIA WZGLĘDNOŚCI**  
Kalendarium

**Zbigniew Osiak**

© Copyright 2013 by  
Zbigniew Osiak

Wszelkie prawa zastrzeżone.

Rozpowszechnianie i kopiowanie całości lub części publikacji  
zabronione bez pisemnej zgody autora.

Portret autora zamieszczony na okładkach przedniej i tylnej  
Rafał Pudło

Wydawnictwo: Self Publishing

ISBN: 978-83-272-4006-4

e-mail: [zbigniew.osiak@gmail.com](mailto:zbigniew.osiak@gmail.com)

---

W 2011 i 2012 wygłosiłem dla słuchaczy Uniwersytetu Trzeciego Wieku w Uniwersytecie Wrocławskim cykl wykładów:

01. Teoria Względności – Podstawy
02. Teoria Względności – Wyniki/Rezultaty
03. Teoria Względności – Testy
04. Teoria Względności – Zastosowania
05. Teoria Względności – Problemy
06. Teoria Względności – Błędne Interpretacje
07. Teoria Względności – Prekursorzy
08. Teoria Względności – Twórcy
09. Teoria Względności – Kulisy
10. Teoria Względności – Kosmologia Relatywistyczna
11. Teoria Względności – Czarne Dziury
12. Teoria Względności – Fale Grawitacyjne
13. Teoria Względności – Antygravitacja
14. Teoria Względności – Kalendarium

---

Pomocnicze materiały do tych wykładów będą dostępne w internecie.

Szczegółowe informacje dotyczące sygnalizowanych tam zagadnień zainteresowani Czytelnicy znajdą w innych moich eBookach:

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

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

Z. Osiak: *Antygravitacja*. Self Publishing (2012).

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

Z. Osiak: *Energia w Szczególnej Teorii Względności*. SP (2012).

Z. Osiak: *Energy in Special Relativity*. Self Publishing (2012).

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

Z. Osiak: *Wykłady z Fizyki – Teoria Względności*. SP (2012).

# TEORIA WZGLĘDNOŚCI

## Kalendarium

**dr Zbigniew Osiak**

- 
- Od Kopernika do Newtona
  - Od Newtona do Maxwella i Riemanna
  - Od Maxwella i Riemanna do Einsteina
  - Era Einsteina: 1905-1955 \*
  - Ciekawe prace po 1955

\* Numeracja prac Einsteina pochodzi z:

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



**Od Kopernika do Newtona**

1543

Mikołaj Kopernik (1473-1543) zaproponował do opisu ruchu planet i Słońca układ heliocentryczny. Zwrócił jako pierwszy uwagę na względność ruchu i rolę układu odniesienia.

1600

Giordano Bruno (1548-1600) 17 lutego w Rzymie został spalony na stosie wyrokiem Inkwizycji za popieranie poglądów Kopernika.

1609, 1619

Johannes Kepler (1571-1630) odkrył trzy prawa rządzące ruchem planet.

1632, 1638

Galileo Galilei [Galileusz] (1564-1642) sformułował zasadę względności, zwrócił uwagę na rolę doświadczenia w fizyce.

1637, 1644

René Descartes [Kartezjusz] (1596-1650) przekonywał, że językiem nauki powinna być matematyka. Największym jego osiągnięciem było wprowadzenie (1637) pojęcia układu współrzędnych. Precyzyjnie sformułował (1644) zasadę bezwładności.

1675

Ole (lub Olaus) Christiansen Rømer (1644-1710) na podstawie obserwacji księżyców Jowisza doszedł do wniosku, że prędkość światła ma skończoną wartość.

1665, 1687

Sir Isaac Newton (1643-1727) sformułował (1665) prawo grawitacji, stworzył (1687) podstawy mechaniki.

## **Od Newtona do Maxwella i Riemanna**

1665

Sir Isaac Newton (1643-1727) sformułował prawo grawitacji.

1687

Sir Isaac Newton (1643-1727) stworzył podstawy mechaniki.

1728

James Bradley (1693-1762) odkrył zjawisko aberracji światła gwiazd. Obliczył wartość prędkości światła z pomiaru kąta aberracji jako 10210 razy większą niż wartość orbitalnej prędkości Ziemi.

1733

Giovanni Girolamo Saccheri (1667-1733), usiłując udowodnić nie wprost postulat o równoległych, otrzymał według niego bardzo dziwne wyniki. Był pierwszym matematykiem, który mógł sformułować geometrię nieeuklidesową.

1743

Jean Le Rond d'Alembert (1717-1783) sformułował zasadę pozwalającą opisywać ruchy ciał z więzami. Rola więzów ruchu w OTW nie została jeszcze przeanalizowana, choć wydaje się, że będzie istotna. Historycy nauki będą wtedy mogli dokładnie zbadać wkład tego matematyka w rozwój OTW.

1746

Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759), jako jeden z pierwszych (inspirowany zasadą Fermata), sformułował zasadę najmniejszego działania, według której cząstki poruszają się po trajektoriach, wzdłuż których działanie jest najmniejsze.

1772, 1785

Marquise Pierre Simon de Laplace (1749-1827) podał (1772) wzór na rozwinięcie wyznacznika według wierszy lub według kolumn, wprowadził (1785) operator (laplasjan) związany z pojęciem potencjału.

Gdyby nie on, to ktoś inny musiałby to zrobić.

1775

Leonhard Euler (1707-1783) przyczynił się do powstania hydrodynamiki (równanie Eulera).

Trzy równania Eulera bilansujące pęd cieczy doskonałej oraz równanie bilansu energii, po odpowiednim uogólnieniu, można zapisać w postaci znikającej dywergencji z tensora energii-pędu. Po znalezieniu tensora krzywizny o znikającej dywergencji, Einstein mógł nadać równaniom pola grawitacyjnego niezwykle elegancką postać.

1782

Adrien Marie Legendre (1752-1833) zaproponował wielomiany niezwykle przydatne przy rozwijaniu funkcji w szeregi potęgowe. Potencjał pola elektrycznego (grawitacyjnego), którego źródłem jest dowolny rozkład ładunków (mas), można przedstawić w postaci szeregu zawierającego człony: monopolowy, dipolowy, kwadrupolowy, oktu-polowy itd.

1788

Joseph Louis de Lagrange (1736-1813) stworzył (1788) mechanikę analityczną – równania Lagrange’a (funkcja Lagrange’a, lagranżjan). Rozwinął rachunek wariacyjny. Bez prac Lagrange’a, Hamiltona oraz Jacobiego nie pojawiłyby się eleganckie sformułowania STW i OTW startujące z zasady najmniejszego działania.



1802, 1817

Tomas Young (1773-1829), jeden z twórców (1802) optyki falowej, w szczególności wykazał (1817), że światło jest falą poprzeczną.

1811, 1813

Sinéon Denis Poisson (1781-1840) zastosował (1811) matematyczną teorię potencjału w elektrostatyce oraz rozszerzył ją (1813) w teorii grawitacji na przypadek wewnątrz źródłowych mas – równanie Poissona.

Wykorzystanie równania Poissona w newtonowskiej teorii stacjonarnego pola grawitacyjnego niewątpliwie ułatwiło Einsteinowi znalezienie równań pola w ramach OTW. Równania Einsteina – w przypadku słabego, stacjonarnego pola, w przybliżeniu nierelatywistycznym – redukują się do równania Poissona.

1813, 1827, 1839

Carl Friedrich Gauss (1777-1855) wprowadził (1827) współrzędne krzywoliniowe. Odkrył geometrię nieeuklidesową, ale nie opublikował wyników w obawie, że nie zostaną zaakceptowane. Z wielu dokonanych przez niego odkryć w dziedzinie matematyki i fizyki wymienimy choćby powszechnie znane i stosowane “twierdzenie Gaussa” (1813) oraz “prawo Gaussa” (1839).

1818, 1821

Augustyn Jean Fresnel (1788-1827) podał (1818) wzór na prędkość światła w poruszającym się ośrodku zawierający tzw. współczynnik unoszenia. Wykazał (1821), że światło jest falą poprzeczną.

1826

Nikołaj Iwanowicz Łobaczewski (1793-1856) odkrył geometrię nieeuklidesową.

1826

Heinrich Wilhelm Mathias Olbers (1758-1840) sformułował paradoks fotometryczny, zwany też paradoksem Olbersa: “Skoro wszechświat jest statyczny, jednorodny i nieskończony w czasie i przestrzeni, to dlaczego niebo w nocy jest ciemne?”

Paradoks ten został rozwiązany dopiero prawie sto lat później w ramach teorii rozszerzającego się wszechświata Friedmana. Olbers próbował wytłumaczyć go, przyjmując, że materia międzygwiazdna pochłania zdążające ku Ziemi światło.

1827

Baron Augustin Louis Cauchy (1789-1857) wprowadził pojęcie tensora. Sformułował matematyczne podstawy teorii elastyczności. Zdefiniował tensory napięć i naprężeń. Podał równania ruchu dla ciał deformowalnych. Nazwa tensor została zaproponowana w 1900 przez Woldemara Voigta (1850-1919).

1828

George Green (1793-1841) wprowadził pojęcie potencjału elektrycznego. Przedstawił twierdzenie, łączące całkę powierzchniową i objętościową, nazywane twierdzeniem Greena.

1829, 1835

Gaspard Gustave de Coriolis (1792-1843) podał (1829) definicję pracy i energii kinetycznej. Odkrył (1835) siłę bezwładności działającą na poruszający się punkt w obracającym się układzie odniesienia – siła Coriolisa.

1831, 1834, 1852

Michael Faraday (1791-1867) odkrył (1831) indukcję elektromagnetyczną. Wprowadził (1834) pojęcie linii sił. Zapoczątkował (1852) polowe podejście do opisu zjawisk elektrycznych i magnetycznych.

1832

Janos Bolyai (1802-1860) niezależnie od Łobaczewskiego, ale sześć lat później, również odkrył geometrię nieeuklidesową.

1834, 1843

Sir William Rowan Hamilton (1805-1865) precyzyjnie sformułował (1834) zasadę najmniejszego działania oraz zapisał równania ruchu w tzw. kanonicznej postaci – równania Hamiltona (funkcja Hamiltona, hamiltonian). Opracował (1843) algebrę kwaternionów.

1838

Dominique François Jean Arago (1786-1853) zaproponował, jak wykazać doświadczalnie, że światło jest falą poprzeczną.

1841, 1842-1843

Carl Gustav Jacob Jacobi (1804-1851) wprowadził (1841) wyznacznik funkcyjny – jakobian. Nadał (1842-1843) równaniom ruchu nową postać (Równania Hamiltona-Jacobiego).

1842

Christian Johann Doppler (1803-1853) teoretycznie uzasadnił wpływ ruchu źródła i obserwatora na częstotliwość fal. Bez znajomości optycznego zjawiska Dopplera niemożliwe byłoby odkrycie ucieczki galaktyk.

1845

Julius Robert von Mayer (1814-1878) sformułował zasadę zachowania energii.

1845, 1854

Sir George Gabriel Stokes (1819-1903) badał (1845) przepływ cieczy z uwzględnieniem tarcia wewnętrznego. Podobne wyniki niezależnie uzyskali Navier, Poisson, oraz Saint-Venant. Prace te okazały się przydatne przy konstrukcji tensora energii-pędu lepkiej cieczy. Sformułował (1854) twierdzenie umożliwiające zamianę całek powierzchniowych na krzywoliniowe (twierdzenie Stokesa).

1846, 1848

Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) zaproponował prawo oddziaływania poruszających się ładunków elektrycznych.

1847

Herman Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) odkrył niezależnie od Mayera zasadę zachowania energii.

1848, 1849, 1850, 1851

[Armand] Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896) jako pierwszy zmierzył (1849) wartość prędkości światła w laboratorium metodą “koła zębatego”. Wykazał (1850), że wartość prędkości światła w wodzie jest mniejsza niż w powietrzu. Potwierdzało to falową teorię światła. Pomiar wartości prędkości światła wykonane (1851) w spoczywającej i poruszającej się wodzie wskazywały, że klasyczny wzór na składowanie prędkości nie jest prawdziwy w przypadku światła. Badał (1848) efekt Dopplera dla fal świetlnych.

1850

Jean Bernard Léon Foucault (1819-1868) zmierzył metodą obracającego się zwierciadła, że wartość prędkości światła w wodzie jest mniejsza niż w powietrzu. Dowodziło to falową teorię światła.



1854

Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866) wprowadził pojęcie  $n$ -wymiarowej zakrzywionej przestrzeni z zadaną lokalnie metryką w postaci kwadratowej formy różniczkowej.

1856

Wilhelm Eduard Weber (1804-1891) i Rudolf Kohlrausch (1809-1858) zmierzili wartość prędkości światła metodą pomiarów elektrycznych.

1859

Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877) pierwszy zaobserwował anomalny obrót peryhelium Merkurego.

1859

Gabriel Lamé (1795-1870) rozwinął teorię współrzędnych krzywoliniowych.

1864, 1865, 1873

James Clerk Maxwell (1831-1879) odkrył (1861) prąd przesunięcia. Podał (1864) określenie pola elektromagnetycznego. Przedstawił (1865) zbiór dwudziestu równań opisujących pole elektromagnetyczne. Przewidział (1865) istnienie fal elektromagnetycznych. Sformułował (1865) koncepcję o elektromagnetycznej naturze światła. Opublikował (1873) *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Stworzył elektrodynamikę.

1862

Herman Günter Grassmann (1809-1877) wprowadził pojęcie iloczynu skalarnego i wektorowego. Stworzył podstawy współczesnej analizy wektorowej.

## **Od Maxwella i Riemanna do Einsteina**

1854

Georg Friedrich Bernhard Riemann (1826-1866) wprowadził pojęcie  $n$ -wymiarowej zakrzywionej przestrzeni z zadaną lokalnie metryką w postaci kwadratowej formy różniczkowej. Wykład habilitacyjny, wygłoszony 10 czerwca 1854 w Getyndze, opublikowany został dopiero dwa lata po śmierci Riemanna.

1861, 1864, 1865, 1873

James Clerk Maxwell (1831-1879) odkrył (1861) prąd przesunięcia. Podał (1864) określenie pola elektromagnetycznego. Przedstawił (1865) zbiór dwudziestu równań opisujących pole elektromagnetyczne. Przewidział (1865) istnienie fal elektromagnetycznych. Sformułował (1865) koncepcję o elektromagnetycznej naturze światła. Opublikował (1873) *A Treatise on Electricity and Magnetism*. Stworzył elektrodynamikę.

1866

Leopold Kronecker (1823-1891) zaproponował bardzo użyteczną funkcję, zwaną deltą Kroneckera.

1867, 1868, 1869

Herman Ludwig Ferdinand von Helmholtz (1821-1894) rozwinął geometrię nieeuklidesową.

1868, 1869

Elwin Bruno Christoffel (1829-1900) wprowadził trójskładnikowe symbole, zwane obecnie symbolami Christoffela pierwszego i drugiego rodzaju, zaproponował również czteroskładnikowe symbole, znane jako składowe kowariantnego tensora krzywizny Riemanna-Christoffela czwartego rzędu. Zdefiniował pojęcie tensora kowariantnego w ogólnym przypadku i operację różniczkowania kowariantnego. Christoffel nie używał nazwy tensor.

1868, 1872

Eugenio Beltrami (1835-1900) wykazał (1868), że geometria Łobaczewskiego jest geometrią geodezyjnych na powierzchniach o stałej ujemnej krzywiznie, w szczególności na pseudosferze, która powstaje przez obrót traktrisy wokół jej asymptoty. Zbadał (1872) własności pseudosfery.

????

Rudolf Otto Sigismund Lipschitz (1832-1903) badał własności podrozmaitości Riemanna oraz n-wymiarowe formy różniczkowe.

1872

Felix Christian Klein (1849-1925) sformułował tzw. program erlangencki traktujący każdą geometrię jako teorię niezmienników pewnej grupy przekształceń.

1873

William Kingdon Clifford (1845-1879) odkrył bkwaterniony, co zaowocowało powstaniem tzw. algebry Clifforda, będącej uogólnieniem zewnętrznej algebry Grassmanna.

1874

Nikołaj Aleksiejewicz Umow (1846-1915) pierwszy wprowadził pojęcie strumienia energii pola elektromagnetycznego. Pojęcie to pojawiło się dziesięć lat później również w pracach Poyntinga (wektor Umowa-Poyntinga).

1877

Władysław Gosiewski (1844-1911), w objaśnieniach do polskiego tłumaczenia wykładu habilitacyjnego Riemanna, podał eleganckie wyprowadzenie miary krzywizny w każdym punkcie różności [na podstawie sugestii zawartych w rozprawie Riemanna] i pokazał, że

srowadza się ona do krzywizny Gaussa. Udowodnił wzór [podany w rozprawie Riemanna] na długość elementu liniowego w rozmaitości o stałej krzywiznie.

1881, 1887

Albert Abraham Michelson (1852-1931) skonstruował interferometr, co pozwoliło mu doświadczalnie ustalić niezależność wartości prędkości światła od ruchu Ziemi względem Słońca, najpierw samemu w Berlinie (1881), a później wspólnie z Morley'em (1887). Należy podkreślić, że doświadczenia te były planowane jako rozstrzygające o istnieniu eteru.

1883

Ernst Mach (1838-1916) postulował, że bezwładność jest skutkiem wzajemnego oddziaływania ciał we wszechświecie. Twierdzenie to Einstein nazywał zasadą Macha.



1884, 1891, 1893

John Henry Poynting (1852-1914) wprowadził (1884) pojęcie strumienia energii pola elektromagnetycznego – wektor Poyntinga. Wyznaczył średnią gęstość Ziemi (1891) oraz stałą grawitacyjną metodą torsyjną (1893).

1887

Albert Abraham Michelson (1852-1931) i Edward Williams Morley (1838-1923) przeprowadzili (1887) eksperyment, z którego wynikało, że wartość prędkości światła nie zależy od ruchu Ziemi względem Słońca.

1887, 1900

Woldemar Voigt (1850-1919) znalazł (1887) transformacje, podobne do przekształceń Lorentza, nie zmieniające postaci równania falowego. Wprowadził (1900) nazwę tensor dla wielkości charakteryzujących elastyczne własności ciał.

1887, 1895, 1901

Samuel Dickstein (1851-1939) przetłumaczył na język polski podstawowe prace Riemanna (1887), Kleina (1895) oraz Ricci'ego i Levi-Civita (1901) dotyczące geometrii nieeuklidesowej i rachunku tensorowego.

1888, 1890

Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894) eksperymentalnie potwierdził (1888) istnienie fal elektromagnetycznych przewidzianych przez Maxwella. Nadał (1890) równaniom elektrodynamiki współczesną postać (równania Maxwella-Hertza).

1888-1893

Marius Sophus Lie (1842-1899) i Friedrich Engel (1861-1941) opublikowali *Teorię grup transformacji*.

### 1888-1908

Baron Roland von Eötvös (1848-1919) wykazał doświadczalnie (1888-1908) równość masy grawitacyjnej i inercyjnej z dokładnością do  $5 \cdot 10^{-9}$ .

Doświadczenia Eötvösa potwierdzają **słabą** zasadę równoważności, wg której ruch cząstki próbnej, pod wpływem jedynie pola grawitacyjnego, zależy tylko od jej początkowego położenia i początkowej prędkości, a nie zależy od jej masy i natury.

Doświadczenia Eötvösa stanowią również potwierdzenie dla sformułowanej przez Einsteina **silnej** zasady równoważności, która legła u podstaw OTW. Wg tej zasady 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.

1889

George Francis FitzGerald (1851-1901) sugerował, że wynik doświadczenia Michelsona-Morleya może być spowodowany skróceniem ciał materialnych w kierunku ruchu wskutek oddziaływania z eterem (skrócenie FitzGeralda-Lorentza).

1892

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928), niezależnie od FitzGeralda, wynik doświadczenia Michelsona-Morley'a tłumaczył skróceniem długości ramion interferometru wzdłuż kierunku ruchu Ziemi względem eteru. Według Lorentza obiekty materialne skracają się w kierunku ruchu w wyniku oddziaływania z eterem. Doświadczenia 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 ciała z eterem.

1892

Wilhelm Karl Joseph Killing (1847-1923) podał tzw. równania Killinga, które wykorzystywane są w Ogólnej Teorii Względności.

1892

Oliver Heaviside (1850-1925) nadał równaniom Maxwella-Hertza prostszą matematyczną postać, używając operatorów rotacji i dywergencji.

1892-1904

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) opisał (1892) siłę, działającą w polu elektromagnetycznym na naładowane cząstki, zwaną siłą Lorentza. Rozwinął (1892-1904) teorię elektronową.

1893

Marius Sophus Lie (1842-1899) stworzył teorię ciągłych grup przekształceń, zwanych grupami Liego.

Sir Oliver Joseph Lodge (1851-1940) przeprowadził eksperyment świadczący o tym, że wirująca materia nie unosi eteru, co czyniło teorię eteru bezzasadną. Przy pomocy interferometru wykazał, 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.

1895

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) podjął próbę znalezienia transformacji niezmieniających postaci równań Maxwella.

1895

Hugo Hans Ritter von Seeliger (1849-1924) sformułował paradoks grawitacyjny: zgodnie z teorią grawitacji Newtona, w nieskończonym wszechświecie jednorodnie wypełnionym materią, siła grawitacji działająca na cząstkę próbną powinna być nieskończenie wielka.

1897

Joseph Larmor (1857-1942) usiłował znaleźć transformacje niezmiennicze postaci równań Maxwella.

1898

Luigi Bianchi (1856-1928) w oparciu o prace R. Lipshitz (1870), Killinga (1892) oraz S. Liego (1888, 1893) podał kompletną klasyfikację klas izometrii trójwymiarowych rozmaitości Riemanna, dzieląc je na dziewięć typów oznaczonych rzymskimi cyframi I-IX.

1899

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) ponownie podjął próbę znalezienia transformacji niezmieniających postaci równań Maxwella.

1900

Joseph Larmor (1857-1942) zaproponował, cztery lata wcześniej niż Lorentz, relatywistyczne przekształcenia współrzędnych przestrzennych i czasu niezmieniające postaci równań Maxwella.

1901

Walter Kaufmann (1871-1947) badał odchylenie promieni  $\beta$  radu w polu elektrycznym i magnetycznym. Pierwszy doświadczalnie wykazał [odkrył] zależność relatywistycznej masy elektronu od wartości jego prędkości.



1901

Gregorio Ricci-Curbastro (1853-1925) i Tulio Levi-Civita (1873-1941) opracowali absolutny rachunek różniczkowy, zwany obecnie rachunkiem tensorowym. Główna idea tego rachunku polega na tym, aby wszystkie wzory analizy matematycznej były niezależne od przyjętego układu współrzędnych. Innymi słowy, aby wzory rachunku różniczkowego były współzmiennicze względem określonej grupy transformacji układu współrzędnych w przestrzeni o zadanej metryce. W Teorii Względności żąda się, aby wszystkie podstawowe prawa były współzmiennicze względem transformacji, których niezmiennikiem jest maksymalna wartość prędkości rozchodzenia się sygnałów. Na przykład wszystkie prawa Szczególnej Teorii Względności są współzmiennicze względem transformacji Lorentza w czasoprzestrzeni Minkowskiego.

1902

Luigi Bianchi (1856-1928) udowodnił tożsamości, bardzo użyteczne w rachunku tensorowym, zwane tożsamościami Bianchi.

John William Strutt Rayleigh (1842-1919) w przeprowadzonym eksperymencie nie stwierdził oczekiwanego podwójnego załamania światła, które miał spowodować ruch przezroczystego ciała przez eter. Gdyby istniał eter, to zjawisko takie wg Rayleigha byłoby konsekwencją kontrakcji Lorentza-FitzGeralda. Doświadczenie to powtórzył de Witt Bristol Brace (1904). Nazywane jest ono doświadczeniem Rayleigha-Brace'a.

1902-1904

Edward Williams Morley (1838-1923) i Dayton Clarence Miller (1866-1941) powtórzyli eksperyment Michelsona-Morley'a z 1887.

1903

John Henry Poynting (1852-1914) sugerował, że małe cząstki powinny obiegać Słońce po orbitach o zmniejszającym się promieniu. Zjawisko to, nazwane efektem Poyntinga, jest wynikiem wywierania ciśnienia przez promieniowanie Słońca na orbitujące małe cząstki.

1903, 1908

Frederick Thomas Trouton (1863-1922) wspólnie z H. R. Noble przeprowadzili (1903) eksperyment mający na celu zmierzenie postulowanych sił torsyjnych (skręcających) działających na wiszący naładowany płaski kondensator w wyniku oddziaływania ładunków na okładkach z hipotetycznym eterem – doświadczenie Troutona-Noble'a. Oczekiwanego oddziaływania nie stwierdzono. Razem z Alexandrem O. Rankinem mierzyli (1908) opór miedzianego drutu ustawionego równoległe i prostopadle do kierunku ruchu Ziemi wokół Słońca.

Oczekiwanych zmian oporu, będących wynikiem skrócenia FitzGeralda-Lorentza, nie zaobserwowano. Z obu doświadczeń wynika, że hipoteza FitzGeralda-Lorentza jest błędna.

1904

D. B (de Witt Bristol) Brace (1859-1905) powtórzył doświadczenie Rayleigha (doświadczenie Rayleigha-Brace'a), zwiększając dokładność pomiarów. Nie stwierdził oczekiwanego podwójnego załamania, które miał spowodować ruch przezroczystego ciała przez eter. Gdyby istniał eter, to zjawisko takie wg Rayleigha byłoby konsekwencją kontrakcji FitzGeralda-Lorentza.

1904

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) zaproponował transformacje współrzędnych przestrzennych i czasu niezmienną postaci równań Maxwella.

## Era Einsteina: 1905-1955 \*

\*Numeracja prac Einsteina pochodzi z:  
Z. Osiak: *Giganci Teorii Względności*. Self Publishing (2012).

### 1905

Albert Einstein (1879-1955) sformułował 30 czerwca 1905 podstawy Szczególnej Teorii Względności. Poddał szczegółowej analizie pojęcie równoczesności. Podał przekształcenia współrzędnych przestrzennych i czasu, względem których wartość prędkości 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 częstości (efekt 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.

[Praca 1]

**30 czerwca 1905 uważany jest za datę powstania Szczególnej Teorii Względności.**

### 1905

Henri Poincaré (1854-1912) niezależnie od Einsteina sformułował 23 lipca 1905 Szczególną Teorię Względności. Wprowadził urojoną współrzędną czasową  $ict$ . Zmodyfikował podane w 1904 przez Lorentza transformacje współrzędnych przestrzennych i czasu niezmienniczości postaci równań Maxwella. zaproponował nazwy transformacje Lorentza i skrót Lorentza. Pokazał, że transformacje Lorentza tworzą grupę, przedstawiając obrót w przestrzeni  $x, y, z, ict$  wokół środka nieruchomego układu współrzędnych. Przy okazji otrzymał relatywistyczną regułę składania prędkości. Badał niezmienniki tych transformacji.

Einstein i Poincaré niemal równocześnie sformułowali Szczególną Teorię Względności. Podstawowa różnica między ich pracami polegała na interpretacji wniosków wynikających z transformacji Lorentza.

Einstein uważał, że wskutek ruchu układu odniesienia deformacji ulegają czas i przestrzeń. Poincaré twierdził, że deformacje dotyczą ciał materialnych.

1905

Albert Einstein uzasadnił 27 września 1905 wzór  $E = mc^2$ . [Praca 2]

1905-1934

Dayton Clarence Miller (1866-1941) wielokrotnie powtarzał eksperyment Michelsona-Morleya z 1887 dotyczący unoszenia eteru.

1906, 1907

Max Karl Ernst Ludwig Planck (1858-1947) zaproponował (1906) nazwę [zasada względności] **teoria względności**. Podał (1906) trójwymiarowe relatywistyczne równania ruchu, wyrażenia dla funkcji Lagrange'a i Hamiltona oraz pędu cząstki. Stworzył (1907) podstawy relatywistycznej termodynamiki.



### 1907

Albert Einstein sformułował 4 grudnia 1907 zasadę równoważności, i wywnioskował z niej istnienie grawitacyjnego przesunięcia ku czerwieni oraz odchylenia promieni świetlnych w polu grawitacyjnym. Zaproponował rozszerzenie zasady względności na układy nieinercjalne. [Praca 8]

### 1907 i 1911

Max von Laue (1879-1960) wyprowadził 30 lipca 1907, w ramach STW w związku z doświadczeniem Fizeau, wzór Fresnela. Podał 30 kwietnia 1911 wzory na elektromagnetyczną energię i pęd elektronu, posługując się językiem STW.

### 1908

Hermann Minkowski (1864-1909) nadał STW elegancką czterowymiarową formę matematyczną.

1908

Minkowski wprowadził pojęcia takie, jak czterowymiarowa czasoprzestrzeń, linia świata, stożek świetlny, wektor przestrzenny oraz wektor czasowy. Przedstawił równania Maxwella oraz równania mechaniki punktu materialnego w czterowymiarowej postaci tensorowej. (Minkowski nie używał słowa tensor.) Prace Minkowskiego ułatwiły przejście od STW do OTW.

Albert Einstein i Jakob Johann Laub (1872-1962) badali równania Maxwella-Hertza oraz równania materiałowe w poruszającym się ośrodku. Podali wzory transformacyjne dla wielkości charakteryzujących pole elektromagnetyczne i jego źródła. [Prace: 9, 9A, 10, 11]

Alfred Heinrich Bucherer (1863-1927) wykonał dokładne pomiary dotyczące zależności relatywistycznej masy elektronu od wartości jego prędkości.

1908

Frederick Thomas Trouton (1863-1922) i Alexander Oliver Rankine (1881-1956) mierzyli opór miedzianego drutu ustawionego równoległe i prostopadle do kierunku ruchu Ziemi wokół Słońca. Oczekiwanych zmian oporu, będących wynikiem skrócenia FitzGerald-Lorentza, nie stwierdzono.

1909

Paul Ehrenfest (1880-1933) pierwszy zastosował przekształcenia Lorentza w przypadku sztywnej bryły.

Philipp Frank (1884-1966) zaproponował nazwę **przekształcenia Galileusza** dla transformacji  $x' = x - Vt$ ,  $y' = y$ ,  $z' = z$ ,  $t' = t$ .

Gustav Herglotz (1881-1953) badał (1909,1911) ruch sztywnej bryły w ramach STW.

1909, 1910

Max Born (1882-1970) rozwinął relatywistyczną teorię bryły sztywnej.

1910

Wladimir Varićak (1865-1942) zbadał związek geometrii Łobaczewskiego ze Szczególną Teorią Względności.

Wladimir Sergius von Ignatowsky (1875-1942) przedstawił aksjomatyczne podejście do STW. Badał relatywistyczną teorię bryły sztywnej.

1911

Albert Einstein ponownie sformułował zasadę równoważności (dla ruchów jednostajnie przyspieszonych prostoliniowych) oraz rozszerzył zasadę względności na układy nieinercjalne. [[Praca 14](#)]

Wyprowadził (korzystając z zasady zachowania energii) wzór łączący częstotliwość  $\nu_2$  światła emitowanego przez źródło znajdujące się na wysokości  $h$  nad powierzchnią Ziemi z częstotliwością  $\nu_1$  światła docierającego do powierzchni Ziemi (gdzie przyjął energię potencjalną równą zero).

$$\nu_1 = \nu_2 \left( 1 + \frac{\gamma h}{c^2} \right), \gamma \text{ oznacza przyspieszenie grawitacyjne.}$$

Z relacji tej wywnioskował, że **czas upływa wolniej w silniejszym polu grawitacyjnym**.

Obliczając kąt ugięcia promieni świetlnych przelatujących w pobliżu Słońca, otrzymał wartość dwukrotnie mniejszą od poprawnej.

Poprawną wartość tego kąta wyznaczył w 1915. [Praca 36]

1911

Ferencz Jüttner (1878-1958) badał relatywistyczną dynamikę gazów. Podał relatywistyczną modyfikację rozkładu Maxwella dla cząstek gazu doskonałego.

Philipp Frank (1884-1966) i Hermann Rothe (1882-1923) wyprowadzili transformacje Lorentza z faktu, że tworzą one grupę, nie zakładając stałości wartości prędkości światła.

1911, 1913

Paul Langevin (1872-1946) zwrócił uwagę (1911) na paradoks zegarów. Jako pierwszy wprowadził (1913) pojęcie defektu masy.

1912

Gustav Adolf Mie (1868-1957) opracował teorię grawitacji niespełniającą zasady równoważności.

1912

Friedrich Kottler (1886-1965) zapisał równania Maxwella w postaci ogólnie kowariantnej.

Ernst Lampa (1888-1986) sformułował hydrodynamikę relatywistyczną.

1912-1914, 1914, 1918

Gunnar Nordström (1881-1923) przedstawił (1912-1914) skalarną teorię pola grawitacyjnego, spełniającą zasadę równoważności. Zaproponował (1914) wykorzystanie pięciowymiarowej przestrzeni do unifikacji wektorowego pola elektromagnetycznego i skalarnego pola grawitacyjnego. Idea ta została ponownie niezależnie sformułowana (1921) przez Theodora Kaluzę (1885-1954). Nordström niezależnie od Reissnera podał, dwa lata później (1918), w ramach OTW rozwiązanie równań pola dla naładowanego elektrycznie źródła (metryka Reissnera-Nordströma).

1913

Albert Einstein [Praca 21] nakreślił program poszukiwań ogólnie kowariantnej teorii względności i teorii grawitacji. Po raz kolejny sformułował zasadę równoważności, wskazując na jej fundamentalne znaczenie w fizyce. Równoważność masy grawitacyjnej i inercyjnej, doświadczalnie potwierdzona przez Eötvösa, pozwala na postawienie hipotezy, że pole grawitacyjne (jednorodne w nieskończenie małej objętości) fizycznie można w pełni zamienić przyspieszonym układem odniesienia. Przypomniawszy, co wykazał w poprzednich pracach, że hipoteza równoważności prowadzi do wniosku, że **w stacjonarnym (statycznym) polu grawitacyjnym szybkość  $c$  zależy od współrzędnych przestrzennych**, przedstawiając miarę potencjału grawitacyjnego. Według Einsteina, w ogólnym przypadku pole grawitacyjne można scharakteryzować dziesięcioma czasoprzestrzennymi funkcjami będącymi składowymi kowariantnego tensora drugiego rzędu.



Składowe te są współczynnikami kwadratowej formy różniczkowej, interpretowanej jako kwadrat czterowymiarowej odległości między dwoma nieskończenie bliskimi punktami. Ogólna postać równań fizyki nie powinna zależeć od wyboru układu odniesienia. Przy próbie realizacji tego zadania Einstein (jak sam twierdził) napotkał pryncypialne trudności. **Nie znamy, względem jakiej grupy przekształceń powinny być kowariantne poszukiwane równania.** Jako przykład zapisał w postaci ogólnie kowariantnej równania Maxwella [wzory (23) i (24)]. Poszukiwania równań pola grawitacyjnego, których rozwiązaniem byłyby wielkości, zaczął od próby uogólnienia równania Poissona. Zaproponował, aby po obu stronach równań pola znajdowały się kowariantne tensory drugiego rzędu. Jednym z nich powinien być tensor energii-pędu. Podał jego postać dla przypadku równomiernie rozmieszczonych nieoddziałujących mas. Drugi z tych tensorów powinien zawierać pochodne drugiego rzędu ze składowych tensora metrycznego.

Wykazał [wzór (19)], że równania przedstawiające prawa zachowania powinny dotyczyć materii i pola grawitacyjnego razem wziętych. Współautor [Pracy 21] Marcell Grossmann (1878-1936) w znacznym stopniu przyczynił się do powstania OTW, rozwijając metody absolutnego rachunku różniczkowego i absolutnej geometrii różniczkowej. Metody te zapoczątkowali E. Christoffel (1869) oraz G. Ricci i T. Levi-Civita (1901). Wprowadził pojęcie tensora mieszanego. Skonstruował mieszany tensor krzywizny czwartego rzędu. Utworzył kowariantny tensor krzywizny drugiego rzędu.

### 1913

Erwin Finlay Freundlich (1885-1964), na prośbę Einsteina, dokonał dokładnych pomiarów szybkości zmian kąta precesji peryhelium Merkurego. Wyniki opublikował w 1913.

1913

Felix Joachim de Wisniewski (1890-1963) rozwinął mechanikę relatywistyczną w ujęciu Minkowskiego.

Czesław Białobrzeski (1878-1953) zwrócił uwagę na rolę ciśnienia promieniowania w procesie równowagi termodynamicznej gazowych gwiazd.

1913, 1922, 1923, 1924, 1925, 1928

Elie Joseph Cartan (1869-1951) rozwinął analizę na rozmaitościach różniczkowalnych. Badał globalne własności grup Liego. Opracował teorię zewnętrznych form różniczkowych. Odkrył (1913) spinory. Wprowadził (1922) tensor skręcenia. Zaproponował (1923-1925) modyfikację OTW, zwaną teorią Einsteina-Cartana. Przedstawił (1923/24) równania Maxwella w postaci ogólnie kowariantnej. Opracował (1928) metodę ruchomego repera.

1914

Johannes Droste (1886-1963), wychodząc z koncepcji Einsteina, że pole grawitacyjne ma charakter tensorowy, zaproponował w układzie współrzędnych kartezjańskich postać tensora metrycznego czasoprzestrzeni w przypadku punktowej masy źródłowej.

Albert Einstein i Adriaan Daniël Fokker (1887-1972) wykazali, że teoria Nordströma jest szczególnym przypadkiem teorii Einsteina-Grossmanna przy założeniu stałości wartości prędkości światła.

[Praca 25]

1914, 1915

Pieter Zeeman (1865-1943) badał (1914-1915) wartość prędkości światła w szybko poruszającym się ośrodku, potwierdzając istnienie członu Lorentza we współczynniku unoszenia Fresnela. Wykazał doświadczalnie, że wartość prędkości światła w gęstych ośrodkach zależy od długości fali.

### 1915

Albert Einstein podał 18 listopada 1915 przybliżone rozwiązanie równań pola w przypadku statycznego (a tym samym stacjonarnego) sferycznie symetrycznego pola grawitacyjnego w pustej przestrzeni, którego źródłem jest punktowa masa. Jakościowo i ilościowo wyjaśnił odchylenie promieni świetlnych w polu grawitacyjnym oraz anomalny obrót peryhelium Merkurego (i pozostałych planet). Obliczony dodatkowy kąt obrotu peryhelium Merkurego w ciągu stu lat wynosi  $43''$ , co pozostaje w idealnej zgodności z pomiarami. [Praca 36]

David Hilbert (1862-1943) podał 20 listopada 1915 ogólnie kowariantne równania pola grawitacyjnego, wyprowadzając je z zasady wariacyjnej.

1915

Albert Einstein zaproponował 25 listopada 1915 poprawne ogólnie kowariantne równania pola grawitacyjnego oraz prawo zachowania pędu i energii dla materii i pola grawitacyjnego. [Praca 37]

**25 listopada 1915 uważany jest za datę powstania Ogólnej Teorii Względności.**

1916

Albert Einstein po raz pierwszy zastosował umowę sumacyjną oraz zaproponował nazwę Szczególna Teoria Względności 20 marca 1916. [Praca 38]

Albert Einstein zapisał równania Maxwella w postaci ogólnie kowariantnej. [Praca 40]

Albert Einstein sformułował 22 czerwca 1916 teorię fal grawitacyjnych. [Praca 41]

1916

Carl Schwarzschild (1873-1916) podał 13 stycznia pierwsze dokładne rozwiązanie równań Einsteina w przypadku statycznego (a tym samym stacjonarnego) sferycznie symetrycznego pola grawitacyjnego w pustej przestrzeni, którego źródłem jest punktowa masa. Znalazł rozwiązanie równań polowych Einsteina w przypadku kuli z nieściśliwej cieczy o stałej gęstości.

Johannes Droste (1886-1963) przedstawił 27 maja 1916 zewnętrzne rozwiązanie próżniowych równań polowych Einsteina dla punktowej masy źródłowej.

Hans Jacob Reissner (1874-1967) znalazł rozwiązanie próżniowych równań polowych dla naładowanego źródła. Analogiczne rozwiązanie niezależnie od Reissnera podał dwa lata później (1918) Gunnar Nordström (1881-1923) – metryka Reissnera-Nordströma.

1916

Théophile de Donder (1872-1957), w związku z przybliżonym rozwiązaniem równań polowych, podał interpretację dla przyjętych założeń – warunek de Dondera.

1916

Willem de Sitter (1872-1934) zapisał równania pola grawitacyjnego Einsteina w innej postaci. Uogólnił równanie Drosteego z 1914 opisujące pole grawitacyjne masy rozmieszczonej symetrycznie wokół środka układu współrzędnych.

Odkrył efekt geodezyjny (geodetyczny), nazywany też precesją geodezyjną, precesją de Sittera oraz efektem de Sittera.

Efekt geodezyjny został następnie dokładniej zbadany w 1919 i 1922 przez Jana Arnoldusa Schoutena (1883-1971) oraz w 1921 przez Adriaana Daniëla Fokkera (1887-1972).



1916, 1917

Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928) badał związek równań polowych Einsteina z równaniami ruchu.

1917

Albert Einstein zaproponował (8 lutego 1917) równanie pola grawitacyjnego z członem kosmologicznym i w oparciu o nie przedstawił w ramach OTW pierwszy model wszechświata. Praca ta dała początek kosmologii relatywistycznej. [Praca 44]

Willem de Sitter (1872-1934) znalazł (31 marca 1917) rozwiązanie równań pola z członem kosmologicznym opisujące wszechświat bez materii traktowany jako czasoprzestrzeń o stałej krzywiznie.

Moritz Schlick (1882-1936 ) jako pierwszy poddał Ogólną Teorię Względności analizie filozoficznej.

1917

Pieter Zeeman (1865-1943) potwierdził doświadczalnie z dużą dokładnością ( $10^{-7}$ ) równość masy inercjalnej i grawitacyjnej.

1917, 1918

Felix Christian Klein (1849-1925) uprościł (1917) metodę wyprowadzania równań pola grawitacyjnego z zasady wariacyjnej. Badał (1918) prawo zachowania pędu i energii w OTW.

Hermann Claus Hugo Weyl (1885-1955) wykazał (1917), że znikanie dywergencji tensora energii-pędu wynika z zasady wariacyjnej. Podał (1917) rozwiązanie próżniowych równań pola statycznego o symetrii osiowej. Sformułował (1918) pierwszą jednolitą teorię pola bazującą na uogólnieniu geometrii Riemanna. Zdefiniował (1918) bardzo przydatny w OTW nowy kowariantny tensor czwartego rzędu, nazywany tensorem krzywizny konforemnej lub tensorem Weyla.

1917, 1918, 1937, 1950

Tullio Levi-Civita (1873-1941) – współtwórca absolutnego rachunku różniczkowego – wprowadził (1917) pojęcie przesunięcia równoległego. Znalazł (1918) statyczne rozwiązanie równań pola posiadającego symetrię osiową. Zajmował się (1937, 1950) relatywistycznym problemem wielu ciał.

1918

Albert Einstein opublikował drugą pracę o falach grawitacyjnych.

[Praca 49]

Amalie Emmy Noether (1882-1935) udowodniła twierdzenie o związku praw zachowania ze współzmienniczością równań ruchu względem ciągłych transformacji (twierdzenie Noether).

1918

Friedrich Kottler (1886-1965) otrzymał rozwiązanie Schwarzschilda bez próżniowych równań polowych Einsteina.

Ludwig Silberstein (1872-1948) uzasadnił, że teoria Einsteina prowadzi do absurdalnej konkluzji, którą Eddington nazwał paradoksem Silbersteina: *Jednorodne ciało może mieć tylko kształt kuli.*

Joseph Lense i Hans Thirring wykazali (1918), na podstawie równań Einsteina, że w polu wirującego źródła przyspieszenie Coriolisa zawiera dodatkowy człon powodujący wkład do precesji **orbitalnego** momentu pędu swobodnie orbitującej cząstki **zależny** od prędkości kątowej wirującego ciała źródłowego (precesja Lensego-Thirringa, efekt Lensego-Thirringa, efekt rotacyjny, wleczenie układów inercjalnych).

1918

Hans Adolf Bauer analizował składniki energii pola grawitacyjnego w OTW.

1919

Albert Einstein po raz pierwszy wykorzystał (10 kwietnia 1919) równania pola grawitacyjnego w postaci zaproponowanej przez de Sittera w 1916. Wykazał, że znikanie tożsamościowe dywergencji lewej strony gwarantuje znikanie tożsamościowe dywergencji prawej strony równań pola, co można zapisać w postaci wyrażenia, które w granicznym przypadku szczególnej teorii względności przechodzi w równanie bilansu pędu i energii materii. [\[Praca 53\]](#)

Albert Einstein przedstawił uwagi o okresowych zmianach długości miesiąca księżycowego, dotychczas niewyjaśnionych w ramach mechaniki Newtona. [\[Praca 54\]](#)

1919

Sir Oliver Joseph Lodge (1851-1940) jako pierwszy zaproponował termin soczewka grawitacyjna. Zauważył, że pole grawitacyjne działa na wiązkę fal elektromagnetycznych jak soczewka o wielu ogniskach. Dla promieni, biegnących dalej od źródła pola grawitacyjnego, ogniskowa jest większa.

1919, 1930, 1946

Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) kierował grupą przeprowadzającą 29 maja 1919 obserwacje zaćmienia Słońca, które potwierdziły przewidziane przez OTW odchylenie promieni świetlnych w polu grawitacyjnym. Udowodnił (1930), że kosmologiczne rozwiązanie Einsteina jest niestabilne. Stworzył (1946) rachunek falowo-tensorowy, próbując połączyć OTW z mechaniką kwantową.

1921

Theodor Franz Eduard Kaluza (1885-1954) sformułował pięciowymiarową jednolitą teorię pola grawitacyjnego i elektromagnetycznego. Teoria Kaluzy została rozwinięta w 1926 przez Oskara Kleina.

Erich Bessel-Hagen (1898-1946) rozszerzył metodę konstrukcji praw zachowania zaproponowaną przez Emmy Noether w 1918.

Wolfgang Pauli (1900-1958) opublikował 246 stronicową monografię na temat teorii względności, zamieszczając ją w Encyklopedii Nauk Matematycznych.

August Adalbert Kopff (1882-1960) badał problem obrotu w teorii względności.

1922

Paul Gruner (1869-1957) podał graficzny opis Szczególnej Teorii Względności w czterowymiarowej czasoprzestrzeni.

Rudolf Bach przedstawił statyczne rozwiązanie posiadające symetrię osiową.

1922, 1923

Marcel Louis Brillouin (1854-1948) badał osobliwości w próżniowym rozwiązaniu Schwarzschilda.

1922, 1924

Aleksandr Aleksandrowicz Friedman (1888-1925) znalazł (1922 oraz 1924) niestacjonarne rozwiązanie równań polowych Einsteina dla izotropowego i jednorodnego rozkładu masy, opisujące rozszerzający się wszechświat o zmiennej w czasie krzywiznie przestrzennej.



---

W 1929 roku teoria Friedmana została potwierdzona odkryciem ucieczki galaktyk przez Edwina Powella Hubble'a (1889-1953).

### 1923

George David Birkhoff (1884-1944) udowodnił, że rozwiązanie Schwarzschilda próżniowych równań polowych jest jedynym rozwiązaniem odpowiadającym centralnie symetrycznemu rozkładowi źródłowych mas.

### 1923-1925

Heinrich Wilhelm Brinkmann badał (1923-1925) przestrzenie Riemanna konforemne z przestrzeniami Einsteina.

### 1924

Constantin Carathéodory (1873-1950) sformułował aksjomatykę Szczególnej Teorii Względności.

1924

Maurice Lecat (1884-1951) podał bibliografię Teorii Względności zawierającą około 4000 pozycji.

1925

George Eugene Uhlenbeck (1900-1988) i Samuel Abraham Goudsmit (1902-1978) zaproponowali, że elektron posiada moment pędu (spin).

1925, 1927

Georges Lemaître (1894-1966) wykazał (1925), że w modelu de Sittera przestrzeń ulega ekspansji. Niezależnie od A. Friedmana podał pięć lat później (1927) rozwiązanie równań polowych Einsteina opisujące rozszerzający się wszechświat.

1926

Oscar Benjamin Klein (1894-1977) rozwinął pięciowymiarową teorię Kaluzy, unifikującą pola grawitacyjne i elektromagnetyczne, zapisując (28 kwietnia 1926) równanie Schrödingera w kowariantnej postaci w pięciowymiarowej przestrzeni Kaluzy (równanie Kleina).

Władimir Aleksandrowicz Fock (1898-1974), niezależnie od Oskara Kleina, zapisał (30 czerwca 1926) równanie Schrödingera w kowariantnej postaci w pięciowymiarowej przestrzeni Kaluzy dla cząstek o spinie równym zeru (bez spinu) – (równanie Kleina-Focka).

Harlow Shapley (1885-1972) i Adelaide Ames (????-1932) zaproponowali nazwę **gromada** dla skupiska jasnych spiralnych mgławic. Gromady składają się z mgławic, mgławice – z galaktyk, galaktyki – z gwiazd.

1926

Llewellyn Hilleth Thomas (1903-1992) wykazał, że podczas obiegu elektronu po orbicie wokół jądra, oś obrotu elektronu ulega precesji (precesja Thomasa).

1926, 1927

Carl T. Chase powtórzył (1926, 1927) doświadczenie Troutona-Noble'a, zwiększając dokładność pomiarów.

1926, 1927, 1929, 1930

Heinrich Mandel (ur. 1898) badał (1926, 1927, 1929) pięciowymiarową teorię Kaluzy unifikującą grawitację i elektromagnetyzm. Podał (1929, 1930) równanie Diraca w pięciowymiarowej przestrzeni Kaluzy.

1927

Albert Einstein analizował teorię Kaluzy. [Praca 83] [Praca 84]

Albert Einstein i Jakob Grommer (1881-1933) zainicjowali badania nad problemem równań ruchu w ogólnej teorii względności.

[Praca 85]

1928

Richard Chase Tolman (1881-1948) stworzył termodynamikę relatywistyczną.

Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984) podał relatywistyczne równanie falowe. Przewidział istnienie antyelektronu.

1928, 1929, 1933

Howard Percy Robertson (1903-1961) wykazał (1928) niezależnie od Lemaître, że w modelu de Sittera przestrzeń ulega ekspansji. Zapisał (1929) oba kosmologiczne rozwiązania Friedmana w postaci jednego wyrażenia, bywa ono nazywane metryką F-L-R-W (Friedmana-Lemaître'a-Robertsona-Walkera). Dokonał (1933) twórczego przeglądu osiągnięć kosmologii relatywistycznej w latach 1917-1932.

1929

Edwin Powell Hubble (1889-1953) odkrył oddalanie się (ucieczkę) galaktyk z radialną prędkością o wartości wprost proporcjonalnej do ich odległości od nas, porównując dopplerowskie przesunięcia ku czerwieni linii spektralnych światła pochodzącego z galaktyk i ich odległości. Obserwacje Hubble'a stały się podstawą teorii Wielkiego Wybuchu oraz potwierdzały poprawność rozwiązań Friedmana równań polowych Einsteina opisujących rozszerzający się wszechświat.

1929

Władimir Aleksandrowicz Fock (1898-1974) i Dymitr Dymitrowicz Iwanienko (1904-1994) uogólnili równanie Diraca na przypadek pola grawitacyjnego, opracowali teorię równoległego przeniesienia spinorów.

Erwin Freundlich (1885-1964), Harald von Klüber (1901-1978) i Albert von Brunn (1880-1940) dokonali na Sumatrze obserwacji zaćmienia Słońca 9 maja 1929. Zmierzona wartość kąta ugięcia była większa niż wynikająca z OTW Einsteina.

1930

Dymitr Dymitrowicz Iwanienko (1904-1994) i W. A. Ambarcumian rozwinęli teorię dyskretnej czasoprzestrzeni.

1930

Léon Rosenfeld (1904-1974) usiłował dokonać skwantowania grawitacji.

Banesh Hoffmann (1906-1986) badał rzutową teorię względności, poczynając od 1930.

1930-1932

Albert Einstein i Walter Mayer (1887-1948) podjęli (1930-1932) próbę stworzenia pięciowymiarowych teorii unifikujących grawitację i elektromagnetyzm.

1931

Edmund Taylor Whittaker (1873-1956) podał definicję odległości przestrzennej w zakrzywionej czasoprzestrzeni.



1931

Subrahmayan Chandrasekhar (1910-1995) wykazał, że białe karły są stabilne tylko wtedy, gdy ich masa jest mniejsza niż  $1,822 \cdot 10^{30}$  kg, czyli 0,91 masy Słońca.

1931, 1932

Otto Hermann Leopold Heckmann (1901-1983) uogólnił (1931) kosmologiczne równania Friedmana i Lemaître. A następnie poddał (1932) je dokładnej analizie. Friedman przyjął tensor energii-pędu dla pyłu bezciśnieniowego, a Heckmann podobnie jak Lemaître – dla cieczy doskonałej.

1932

Lew Dawidowicz Landau (1908-1968) wyznaczył w przypadku relatywistycznym graniczną [nieprzekraczalną] masę gwiazdy, będącej kulą gazu Fermiego, gwarantującą jej stabilność. Masa graniczna wynosi  $2,8 \cdot 10^{30}$  kg, czyli 1,5 masy Słońca.

1932

Roy J. Kennedy and Edward M. Thorndike powtórzyli doświadczenie Michelsona-Morleya, posługując się interferometrem o różnych długościach ramion.

Harlow Shapley (1885-1972) i Adelaide Ames (????-1932) opublikowali katalog jasności galaktyk.

Thomas Lewis (1856-1927) znalazł rozwiązanie równań polowych Einsteina dla osiowo symetrycznego pola grawitacyjnego.

Richard Chase Tolman (1881-1948) i Morgan Ward (1901-1963) zbadali oscylacyjny model wszechświata, w którym zachodzą procesy nieodwracalne.

1933

Fritz Zwicky (1898-1974), jako jeden z pierwszych, podał “dowody” obserwacyjne na istnienie ciemnej materii.

Leopold Infeld (1898-1968) i Bartel L. van der Waerden wykorzystali rachunek spinorowy do opisu oddziaływania pola grawitacyjnego na wirujące cząstki.

Arthur Geoffrey Walker (1909-2001) dokonał analizy pojęcia odległości przestrzennej w OTW.

Edward Arthur Milne (1896-1950) sformułował zasadę kosmologiczną: “Wszechświat jest taki sam, gdziekolwiek go obserwujemy”. Stworzył kinematyczną teorię względności.

1934

Wilhelm Heinrich Walter Baade (1893-1960) i Fritz Zwicky (1898-1974) wysunęli hipotezę, że supernowe mogą wytwarzać promieniowanie kosmiczne i gwiazdy neutronowe.

Sir William Hunter Mc Crea (1904-1998) i Edward Arthur Milne (1896-1950) wyprowadzili w ramach teorii Newtona równania Friedmana opisujące rozszerzający się wszechświat. Stworzyli podstawy kosmologii neonewtonowskiej.

Paweł Aleksiejewicz Czerenkow (1904-1990) odkrył promieniowanie, zwane promieniowaniem Czerenkowa, emitowane przez elektrony poruszające się w danym ośrodku z prędkością o wartości większej od wartości fazowej prędkości światła.

1934

David van Dantzig (1900-1959) przedstawił równania Maxwella w postaci ogólnie kowariantnej (metric-free electrodynamics).

Alexander Oliver Rankine (1881-1956) przeprowadził analizę błędów pomiarowych w doświadczeniu Eötvösa.

R(athindra) N(ath) Sen badał stabilność modeli kosmologicznych.

1934, 1935, 1937

Arthur Geoffrey Walker (1909-2001) przyczynił się do rozwoju Kinematycznej Teorii Względności Milne'a.

1935

Albert Einstein i Nathan Rosen (1909-1995) analizowali problem cząstki w Ogólnej Teorii Względności. [\[Praca 113\]](#)

1935

Otto Halpern (1899-1982) udowodnił twierdzenie, że każda fala, opisywana symetrycznym tensorem energii-pędu drugiego rzędu, rozchodzi się z prędkością światła, pod warunkiem, że czterowymiarowa dywergencja oraz suma składowych diagonalnych tego tensora są równe zero. Twierdzenie to zilustrował na przykładzie dwóch różnych wyrażen dla tensora energii-pędu pola elektromagnetycznego w ośrodku danych przez Minkowskiego i Abrahama.

1936

Albert Einstein i Nathan Rosen (1909-1995) dyskutowali problem dwóch ciał w Ogólnej Teorii Względności. [[Praca 114](#)]

Albert Einstein zwrócił uwagę na soczewko-podobne działanie gwiazdy przy odchyłaniu światła w polu grawitacyjnym. [[Praca 115](#)]

1936

Arthur Geoffrey Walker (1909-2001) niezależnie od H. P. Robertsona, ale siedem lat później, uogólnił wzory dotyczące metryki czasoprzestrzeni zawarte w obu kosmologicznych pracach Friedmana, zapisując je w postaci jednego wyrażenia, zwanego metryką Robertson-Walkera.

1937

Albert Einstein i Nathan Rosen (1909-1995) podali rozwiązanie równań pola dla cylindrycznych fal grawitacyjnych. [[Praca 116](#)]

Ilja Michajłowicz Frank (1908-1990) i Igor Jewgeniewicz Tamm (1895-1971) przedstawili teorię promieniowania Czerenkowa.

1937

Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984) sformułował hipotezę, że uniwersalne stałe fizyczne są funkcjami czasu. W szczególności stała grawitacji wg Diraca maleje odwrotnie proporcjonalnie do wieku wszechświata.

Myron Mathisson (1897-1940) analizował w ramach OTW równania ruchu cząstki posiadającej moment pędu (spin).

John Lighton Synge (1897-1995) rozwinął mechanikę relatywistyczną ośrodków ciągłych (relatywistyczną hydrodynamikę).

Fritz Zwicky (1898-1974) rozważał możliwość spełniania przez mgławice roli soczewek grawitacyjnych.



1937

Gawrił Adrianowicz Tichow (1875-1960) badał soczewkowanie grawitacyjne.

Howard Percy Robertson (1903-1961) podał relatywistyczny opis efektu Poyntinga (efekt Poyntinga-Robertsona).

1938

Albert Einstein, Leopold Infeld (1898-1968) i Banesh Hoffmann (1906-1986) opracowali aproksymacyjną metodę badania ruchu ciężkich ciał w ramach ogólnej teorii względności, nazywaną metodą EIH (Einsteina-Infelda-Hoffmanna). [\[Praca 117\]](#)

Albert Einstein i Peter Gabriel Bergmann (1915-2002) uogólnili pięciowymiarową teorię Kaluzy. [\[Praca 118\]](#)

1938

Fritz Zwicky (1898-1974) sugerował wykorzystanie wewnętrznego rozwiązania Schwarzschilda jako modelu kolapsującej gwiazdy neutronowej.

Herbert Eugene Ives (1882-1953) i George R. Stilwell potwierdzili doświadczalnie relatywistyczny efekt Dopplera (eksperyment Ivesa-Stilwella).

1939

J. Robert Oppenheimer (1904-1967) i George Michael Volkoff (1914-2000) podali model sferycznie symetrycznej, statycznej gwiazdy neutronowej.

1939

J. Robert Oppenheimer (1904-1967) i Hartland Snyder (1913-1962) wykazali, wykorzystując równania polowe Einsteina, że po wyczerpaniu się wszystkich termojądrowych źródeł energii, dostatecznie masywna gwiazda powinna ciągle się kurczyć. Zjawisko to nazywane jest grawitacyjnym zapadaniem.

Richard Chase Tolman (1881-1948) podał pięć nowych statycznych rozwiązań równań polowych Einsteina dla kuli z cieczy.

Hans Albrecht Bethe (1906-2005) w maksymalnym stopniu wykorzystał prawo równoważności masy i energii do wyjaśnienia procesów energetycznych zachodzących w gwiazdach.

Gerald Maurice Clemence (1908-1974) dyskutował, poczynając od 1939, problemy związane z pomiarem czasu.

1939, 1941

Władimir Aleksandrowicz Fock (1898-1974), niezależnie od Einsteina i współpracowników, wyprowadził (1939) z równań pola przybliżone równania ruchu dla ciał rozciągniętych o symetrii sferycznej. Wyznaczył (1941) 10 całek ruchu środka masy dwóch ciał w OTW.

1940

Carl Henry Eckart (1902-1973) przedstawił relatywistyczną teorię prostych cieczy.

Philip Russell Wallace (1915-2006) badał relatywistyczne równania ruchu w elektrodynamice.

1946

Evgenij Michajłowicz Lifszic (1915-1985) sformułował (1946) teorię niestabilności w rozszerzającym się wszechświecie. Znalazł (1970-1972) wspólnie z Bielińskim i Chałatnikowem ogólne kosmologiczne rozwiązanie równań Einsteina z osobliwością w czasie.

1946, 1948

George Gamow (1904-1968) sformułował (1946) hipotezę, że wszechświat wiruje wokół środka jego masy. Był jednym z twórców teorii Wielkiego Wybuchu. Badał (1946) wczesne stadium ewolucji wszechświata. Przedstawił (1946, 1948) hipotezę o pochodzeniu pierwiastków oraz ich ilościowym rozkładzie. Postulował, że przed wielkim wybuchem wszechświat wypełniony był wysoko energetycznymi fotonami, a materia składała się z neutronów oraz z produktów ich rozpadu, czyli protonów, elektronów i antyneutrin.

1948

George Gamow (1904-1968) przewidział istnienie mikrofalowego promieniowania tła, szacując jego temperaturę na ok. 25 K.

1947

Hartland Snyder (1913-1962) przedstawił schemat relatywistycznego kwantowania czasoprzestrzeni.

Chen-Ning Yang (ur. 1922) podjął próbę skwantowania czasoprzestrzeni.

Jan Weyssenhoff (1889-1972) i Antoni Raabe (????-1942) opracowali teorię relatywistycznych cząstek i cieczy spinowych (Weyssenhoff fluid).

1947

[Ernst] Pascual Jordan (1902-1980) sformułował rzutową teorię względności.

Bronisław Edward Średniawa (ur. 1917) podał relatywistyczne równania ruchu swobodnej cząstki dipolowej i kwadrupolowej.

1947, 1949

Gerald Maurice Clemence (1908-1974) badał efekty relatywistyczne w ruchu planet.

1948

Georges Lemaître (1894-1966) zaproponował hipotezę dotyczącą kreacji wszechświata. Postulował istnienie korpuskularnego “promieniowania resztkowego”. Zwrócił uwagę na rolę niestabilności grawitacyjnej w powstaniu galaktyk i gromad galaktyk.

1948

Ralph Asher Alpher (1921-2007), jako pierwszy, sformułował w swojej dysertacji doktorskiej hipotezę dotyczącą powstania wszechświata w wyniku eksplozji. Hoyle nazwał żartobliwie ten pomysł teorią **Wielkiego Wybuchu**.

Ralph Asher Alpher (1921-2007) i Robert C. Herman (1914-1997) oszacowali obecną temperaturę mikrofalowego promieniowania tła na około 5 K.

Herman Bondi (1919-2005) i Thomas Gold (1920-2004) przedstawili model stanu stacjonarnego wszechświata oparty o idealną zasadę kosmologiczną, głoszącą, że własności wszechświata nie zależą od położenia obserwatora i od czasu dokonywania obserwacji, oraz założenie o ciągłym tworzeniu się materii (teoria Bondiego-Golda).



1948

Fred Hoyle (1915-2001) opracował wersję teorii stanu stacjonarnego wszechświata bazującą na modyfikacji równań polowych OTW. Modyfikacja ta polegała na dodaniu do lewej strony równań pola C-członu opisującego kreację materii, aby wytłumaczyć ekspansję. Zaproponował, w jednej z prowadzonych przez niego pogadank radioowych, żartobliwą nazwę **Wielki Wybuch** dla konkurencyjnej teorii.

Hendrik Brugt Gerhard Casimir (1909-2000) przewidział zjawisko polegające na przyciąganiu się dwóch nienaładowanych zwierciadeł metalowych znajdujących się bardzo blisko siebie w próżni (efekt Casimira, siła Casimira). Siła ta została wyznaczona doświadczalnie 10 lat później. W ramach kwantowej grawitacji została sformułowana hipoteza, że grawitacja jest długo zasięgową siłą Casimira.

1948, 1952, 1955, 1958, 1959

Madge Gertrude Adam (1912-2001), poczynając od 1948, badała Einsteińskie przesunięcie grawitacyjne słonecznych linii widmowych, publikując wyniki w latach 1948, 1952, 1955, 1958 oraz 1959.

1949

Conrad Lee Longmire (1921-2010) badał wpływ efektów relatywistycznych na spektrum promieniowania beta.

Matthew Fontaine Maury Osborne (1917-2003) podał ograniczenia, jakie nakłada fizyka kwantowa na Ogólną Teorię Względności.

1949, 1952

Kurt Gödel (1906-1978) znalazł rozwiązania równań pola (z członem kosmologicznym różnym od zera) opisujące modele wszechświata o stałym promieniu przestrzennym, w którym materia wiruje wokół osi przechodzącej przez środek masy.

1950

Chushiro Hayashi (ur. 1920) wskazał na błędy w teorii  $\alpha$   $\beta$   $\gamma$ .

1950, 1951

Hidekazu Nariai (ur. 1924) podał nowe rozwiązania równań polowych Einsteina.

1951

Abraham Haskel Taub (1911-1999) wykorzystał typy Bianchiego do klasyfikacji przestrzennie jednorodnych kosmologicznych rozwiązań równań pola grawitacyjnego Einsteina.

1952

Richard Paul Durbin, Howard Hunt Loar oraz William Westerfield Havens (1920-2004) potwierdzili doświadczalnie dylatację czasu, wyznaczając średni czas życia mezonów  $\pi^+$  i  $\pi^-$ .

1953

Ralph Asher Alpher (1921-2007), James W. Follin i Robert C. Herman (1914-1997) opisali warunki fizyczne panujące we wczesnych etapach rozszerzającego się wszechświata.

Dennis William Sciama (1926-1999) sformułował teorię grawitacji bazującą na zasadzie Macha (Postać lokalnych praw fizyki jest następstwem stanu całego wszechświata.).

1954

Wilhelm Heinrich Walter Baade (1893-1960) i Rudolph Leo Bernhard Minkowski (1895-1976) dokonali optycznej identyfikacji radioźródeł, takich jak Cygnus A, Virgo A (M87), Perseus A (NGC 1275) oraz Centaurus A (NGC 5128).

David Marion Chase wyprowadził równania ruchu Lorentza dla naładowanej cząstki próbnej z równań pola Ogólnej Teorii Względności.

John Forbes Nash (ur. 1928) wykazał, że można izomerycznie zanurzyć  $n$ -wymiarową rozmaitość Riemanna w euklidesowej przestrzeni  $(2n+1)$  wymiarowej.

1954

Aleksiej Zinowiewicz Pietrow (1910-1972) pokazał, że istnieją trzy i tylko trzy rodzaje pól grawitacyjnych w próżni (trzy typy Pietrowa). Podział ten wynika z własności tensora krzywizny konforemnej Weyla. Sklasyfikował również pola grawitacyjne według grup ciągłych przekształceń Liego (grup ruchów, grup przekształceń konforemnych, grup przekształceń rzutowych).

Chen Ning Yang (ur. 1922) i Robert L. Mills (1927-1999) zainicjowali rozwój teorii z cechowaniem.

**Ciekawe prace po 1955**

1948, 1952, 1955, 1958, 1959

Madge Gertrude Adam (1912-2001), poczynając od 1948, badała Einsteińskie przesunięcie grawitacyjne słonecznych linii widmowych, publikując wyniki w latach 1948, 1952, 1955, 1958 oraz 1959.

1956

Władimir Aleksandrowicz Fock (1898-1974) otrzymał z równań pola Einsteina równania ruchu dla rotujących ciał z uwzględnieniem ich wewnętrznej struktury.

1958

Wilhelm Heinrich Walter Baade (1893-1960) badał problemy związane z wyznaczaniem odległości galaktyk.

David Joseph Bohm (1917-1992) i Jean-Pierre Vigier (1920-2004) opracowali relatywistyczną hydrodynamikę wirujących cieczy.



### 1958

Christian Møller (1904-1980) wprowadził nowy pseudotensor energii-pędu w teorii grawitacji (pseudotensor energii-pędu Møllera).

Charles Hard Townes (ur. 1915) powtórzył ze współpracownikami doświadczenie Michelsona-Morley'a, zwiększając dokładność pomiarów dzięki wykorzystaniu masera amoniakalnego.

### 1960

Martin Ryle (1918-1984) i Antony Hewish (ur. 1924) opracowali metodę syntezy apertury, dzięki czemu można zastąpić obserwacje dużym radioteleskopem wieloma małymi.

1960

George Szekeres (1911-2005) i Martin David Kruskal (ur. 1925), niezależnie od siebie, zaproponowali układ współrzędnych pozwalający pozbyć się pozornych osobliwości związanych z metryką Schwarzschilda.

Leonard Isaac Schiff (1915-1971) opisał złożenie precesji de Sittera oraz precesji Lensego-Thirringa osi obrotu swobodnie orbitującego żyroskopu w polu grawitacyjnym wirującego ciała źródłowego.

Roger Penrose (ur. 1931) sformułował spinorowe podejście do OTW.

Robert Vivian Pound (1919-2010) i Glen Anderson Rebka (ur. 1931) zmierzili w warunkach laboratoryjnych przesunięcie linii widmowych spowodowane polem grawitacyjnym Ziemi, wykorzystując efekt Mössbauera.

1960

Joseph Weber (1919-2000) zaprojektował i zbudował pierwszy detektor promieniowania grawitacyjnego.

1961

Otto Hermann Leopold Heckmann (1901-1983) sformułował hipotezę o możliwości wpływu rotacji wszechświata na jego ekspansję.

Martin Ryle (1918-1984) i R. W. Clarke dokonali obserwacji rozmieszczenia radioźródeł, które nie potwierdzały przewidywań teorii Stanu Stacjonarnego.

Robert Henry Dicke (1916-1997) i Carl Brans (ur. 1935) wspólnie opracowali (1961) skalarno-tensorową teorię grawitacji zakładającą, że “stała” grawitacji zmniejsza się z szybkością jednej części na  $10^{11}$  w ciągu roku (teoria Bransa-Dicke).

1962

Dennis William Sciama rozwinął (1926-1999) teorię czasoprzestrzeni ze skręceniem (teoria Einsteina-Cartana-Sciama-Kibble'a).

Gerald Maurice Clemence (1908-1974) analizował w ramach OTW odległości między planetami a Słońcem.

1962, 1977

Hans Jürgen Treder (1928-2006) badał grawitacyjne fale uderzeniowe.

1963

Roy Patrick Kerr (ur. 1934) podał rozwiązanie próżniowych równań pola Einsteina dla przypadku wirującego źródła (metryka Kerr).

1964

Robert Henry Dicke (1916-1997) potwierdził równoważność masy grawitacyjnej i inercyjnej z dokładnością do  $10^{-11}$ .

Josif Samojłowicz Szkłowski (1916-1985) i Nikołaj Siemionowicz Kardaszew (ur. 1932) obliczyli, że podczas zapadania się super ciężkich gwiazd wysyłane są fale grawitacyjne o dużej mocy. Jako przykłady podali wirującą gwiazdę niemającą symetrii osiowej, dwie gwiazdy, o jednakowych masach, orbitujące jedna wokół drugiej oraz gwiazdę kolapsującą anizotropowo.

1964, 1968

Irwin I. Shapiro (ur. 1929) przewidział (1964) i wykazał (1968), że czas przelotu sygnału radarowego na trasie Ziemia-Wenus (Merkury)-Ziemia w pobliżu Słońca jest dłuższy niż czas przelotu z dala od Słońca.

1965

Robert Henry Dicke (1916-1997) i współpracownicy wysunęli hipotezę, że wszechświat jest wypełniony mikrofalowym promieniowaniem tła (promieniowaniem reliktowym) odpowiadającym temperaturze kilku stopni Kelwina, będącym pozostałością po Wielkim Wybuchu. Stanowiło to wyjaśnienie odkrycia dokonanego w 1965 przez A. A. Penziasa i R. W. Wilsona.

Arno Allan Penzias (ur. 1933) i Robert Woodrow Wilson (ur. 1936) odkryli mikrofalowe izotropowe promieniowanie tła odpowiadające temperaturze 3,5 stopni Kelvina. Promieniowanie tła zwane jest również promieniowaniem reliktowym lub szczątkowym. Odkrycie to potwierdziło hipotezę o istnieniu promieniowania szczątkowego jako pozostałości po Wielkim Wybuchu. Promieniowanie powstałe podczas kreacji wszechświata traciło energię wskutek jego ekspansji.

Hipotezę tę sformułował po raz pierwszy George Gamow w 1948. W tym samym roku jego współpracownicy A. Alpher i R. Herman oszacowali obecną temperaturę mikrofalowego promieniowania tła na około 5 K. Podobne obliczenia przedstawili R. H. Dicke, P. J. E. Peebles, P. G. Roll i D. T. Wilkinson w artykule poprzedzającym doniesienie A. A. Penziasa i R. W. Wilsona.

Penzias i Wilson dokonali swego odkrycia, gdy byli pracownikami w Laboratoriach Bella, zajmując się łącznością radiową z satelitami. Używali do tego celu 6-metrowej anteny kierunkowej, pojawiający się w niej szum okazał się mikrofalowym promieniowaniem tła docierającym równomiernie ze wszystkich kierunków.

### 1966

Hans Jürgen Treder (1928-2006) opracował tetradową teorię grawitacji.

1967

John Archibald Wheeler (1911-2008) zaproponował nazwę **czarna dziura** (1967-wykład, 1968-artykuł) oraz frazę **czarne dziury nie mają włosów** (black holes have no hair).

Susan Jocelyn Bell-Burnell (ur. 1943) odkryła pulsara.

Andriej Dymitriewicz Sacharow (1921-1989) postulował w pracy “Naruszenie CP niezmienniczości, C asymetria i barionowa asymetria wszechświata”, że podczas Wielkiego Wybuchu wystąpiła nadwyżka materii nad antymaterią. Ta tzw. asymetria barionowa [na każdy miliard antybarionów utworzyło się miliard i jeden barionów] umożliwiła powstanie wszechświata. Inaczej mówiąc, w promieniowaniu reliktowym powinniśmy obserwować miliard fotonów na każdy barion we wszechświecie. W przypadku braku asymetrii barionowej materia i antymateria uległyby anihilacji.



1968

Kenneth Leon Nordtvedt, Jr. (ur. 1939) sformułował hipotezę, że gdyby Ziemia i Księżyc orbitowały wokół Słońca z różnymi przyspieszeniami, to spowodowałyby to perturbacje odległości Ziemia-Księżyc w stosunku do obliczonych w ramach OTW.

Laserowe pomiary odległości Ziemia-Księżyc nie wykazały istnienia efektu Nordvedta, stanowiąc tym samym pozytywny test silnej zasady równoważności.

Laser Lunar Ranging Experiment to angielska nazwa tego testu.

- Kenneth Nordtvedt: *Equivalence principle for massive bodies. I. Phenomenology.* Physical Review **169**, 5 (1968) 1014-1016.
- Kenneth Nordtvedt: *Equivalence Principle for Massive Bodies. II. Theory.* Physical Review **169**, 5 (1968) 1017-1025.
- Kenneth Nordtvedt: *Testing Relativity with Laser Ranging to the Moon.* Physical Review **170**, 5 (1968) 1186-1187.

1968

Thomas Gold (1920-2004) pierwszy sugerował, że pulsary są wirującymi gwiazdami neutronowymi.

1969

Martin John Rees (ur. 1942) i Dennis William Sciama (1926-1999) przewidzieli, że fluktuacje mikrofalowego promieniowania tła zostały spowodowane nierównomiernym rozkładem materii we wszechświecie.

Charles William Misner (ur. 1932) sformułował “paradoks horyzontu”. 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? Zadawające rozwiązanie tego paradoksu zostało podane w ramach inflacyjnego modelu wielkiego wybuchu (Guth, 1981).

### 1970

Jan Hendrik Oort (1900-1992) oszacował gęstość materii we wszechświecie na  $0,5 \cdot 10^{-29} \text{ gcm}^{-3}$ .

Stephen William Hawking (ur. 1942) i Roger Penrose (ur. 1931) przedstawili hipotezę, że wszechświat powstał z osobliwości.

Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984) rozwinął teorię spinorów, wprowadzonych po raz pierwszy przez Cartana.

1971

Joseph C. Hafele (ur. 1933) oraz Richard E. Keating przeprowadzili w październiku 1971 eksperyment potwierdzający istnienie relatywistycznej i grawitacyjnej dylatacji czasu.

Okружили dwukrotnie w kierunkach wschodnim i zachodnim Ziemię rejsowym samolotem, na pokładzie którego umieścili cztery cezowe zegary atomowe. Następnie porównali wskazania podróżujących zegarów ze wskazaniem zegarów pozostawionych na Ziemi.

Przelot w kierunku wschodnim na trasie Waszyngton – Londyn – Frankfurt – Sztambuł – Bejrut – Teheran – Nowe Dehli – Bangkok – Hongkong – Tokio – Honolulu – Los Angeles – Dallas – Waszyngton trwał 65,42 godzin. Średnia prędkość względem Ziemi wynosiła 243 m/s, średnia wysokość nad poziomem morza – 8,90 km, średnia szerokość geograficzna marszruty – 34 stopnie.

Przelot w kierunku zachodnim na trasie Waszyngton – Los Angeles – Honolulu – Guam – Okinawa – Tajpej – Hongkong – Bangkok – Bombaj – Tel Awiw – Ateny – Rzym – Paryż – Shannon – Boston – Waszyngton trwał 80,33 godzin. Średnia prędkość względem Ziemi wynosiła 218 m/s, średnia wysokość nad poziomem morza – 8,36 km, średnia szerokość geograficzna marszruty – 31 stopni.

Wyniki eksperymentu były zgodne z przewidywaniami teorii względności dotyczącymi relatywistycznej i grawitacyjnej dylatacji czasu.

- J. C. Hafele: *Performance and results of portable clocks in aircraft*. PTTI, 3rd Annual Meeting. (November 16-18, 1971) 261-288.
- J. C. Hafele, R. E. Keating: *Around-the-World Atomic Clocks: Predicted Relativistic Time Gains*. Science **177**, 4044 (July 14, 1972) 166-168.
- J. C. Hafele, R. E. Keating: *Around-the-World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains*. Science **177**, 4044 (July 14, 1972) 168-170.

1971

Roger Penrose (ur. 1931) opisał mechanizm umożliwiający pozyskiwanie energii rotacyjnej z czarnej dziury Kerr'a.

Władimir Borysowicz Bragiński (ur. 1931) doświadczalnie potwierdził równość masy grawitacyjnej i inercyjnej z dokładnością do  $10^{-12}$ .

Robert Lull Forward (1932-2002) zaproponował sferyczny detektor rezonansowy fal grawitacyjnych.

1974

Russell Hulse (ur. 1950) odkrył podwójnego pulsara.

Brandon Carter (ur. 1942) sformułował zasadę antropiczną (anthropic principle): “Wszechświat powinien mieć takie własności, by mogło w nim powstać, trwać i rozwijać się życie”.

1975

Stephen William Hawking (ur. 1942) wykazał, że czarne dziury mogą emitować promieniowanie korpuskularne (promieniowanie Hawkinga).

1976

Robert Henry Dicke (1916-1997) przeprowadził wraz z zespołem nowy test zasady równoważności bazujący na laserowym pomiarze odległości Ziemia-Księżyc.

Stephen William Hawking (ur. 1942) sformułował drugą zasadę termodynamiki dla czarnych dziur.

1976

Robert F. C. Vessot i Martin W. Levine ze współpracownikami przeprowadzili w czerwcu 1976 test OTW z maserem wodorowym potwierdzający z bardzo dużą dokładnością (0,007%) grawitacyjną dylatację czasu (grawitacyjne poczerwienienie). Test ten nazywany jest też doświadczeniem Vessota-Levine.

Porównano częstotliwości mikrofalowych sygnałów generowanych przez wodorowy maser umieszczony w rakiecie wystrzelonej na wysokość 10000 km z częstotliwością masera pozostawionego na powierzchni Ziemi.

- R. F. C. Vessot, M. W. Levine, et al.: *Test of Relativistic Gravitation with a Space-Borne Hydrogen Maser*. Physical Review Letters **45**, 26 (29 December 1980) 2081-2084.



1978

Christian Møller (1904-1980) zmodyfikował Ogólną Teorię Względności, konstruując nową teorię pola w przestrzeni Weintzenböcka (teoria grawitacji Møllera).

1979

Joseph Hooton Taylor (ur. 1941) wykazał, że podwójny pulsar 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.

Istnienie fal grawitacyjnych po raz pierwszy postulował Einstein już w 1916.

1979

Robert Henry Dicke (1916-1997) i Phillip James Edwin Peebles (ur. 1935) sformułowali tzw. “problem płaskości”. Tuż po Wielkim Wybuchu gęstość materii we Wszechświecie powinna być zbliżona do krytycznej, czyli takiej przy której staje się on płaski, a szybkość ekspansji ulega spowolnieniu. W przeciwnym przypadku dawno temu nastąpiłby już Wielki Kolaps lub stan prawie próżni.

Podali kryteria pozwalające ustalić typ wszechświata na podstawie wartości parametru gęstości  $\Omega$ . ( $\Omega$  z definicji jest stosunkiem średniej gęstości masy we wszechświecie do krytycznej gęstości masy.)

Jeżeli  $\Omega < 1$ , to Wszechświat jest otwarty, czyli będzie rozszerzać się wiecznie.

Jeżeli  $\Omega > 1$ , to Wszechświat jest zamknięty, czyli będzie rozszerzać się tylko do pewnego momentu, a następnie zacznie się kurczyć.

Jeżeli  $\Omega = 1$ , to Wszechświat jest płaski, rozszerza się coraz wolniej.

1979

Dennis Walsh (1933-2005), Robert F. Carswell i Ray J. Weymann odkryli kwazara będącego soczewką grawitacyjną.

1980

Bronisław Edward Średniawa (1917-2014) badał relatywistyczne równania ruchu cząstki spinowej.

1981

Alan Harvey Guth (ur. 1947) zaproponował model bardzo wczesnego wszechświata, nazwanego przez niego wszechświatem inflacyjnym.

1982

Andriej Dymitrowicz Linde (ur. 1948) przedstawił teorię “nowej inflacji”.

1983

Stephen William Hawking (ur. 1942) wprowadził pojęcie funkcji falowej wszechświata.

Dymitr Dymitrowicz Iwanienko (1904-1994) badał teorię grawitacji z cechowaniem, uwzględniającą krzywiznę i skręcenie.

Andriej Dymitrowicz Linde (ur. 1948) zaproponował teorię “chaotycznej inflacji”.

1986

Andriej Dymitrowicz Linde (ur. 1948) opracował teorię “permanentnie samo-reprodukującej się inflacji”.

1990

Grupa COBE: John C. Mather (ur. 1946) i współpracownicy opublikowali doniesienie: *Wstępne pomiary spektrum kosmicznego mikrofalowego tła uzyskane przez satelitę COBE.*

1991

Grupa COBE: George F. Smoot (ur. 1945) i współpracownicy opublikowali doniesienie: *Pierwsze wyniki pomiaru anizotropii kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła uzyskane przez satelitę COBE.*

1994

Andriej Dymitrowicz Linde (ur. 1948) ogłosił teorię “hybrydowej inflacji”.

1998

Saul Perlmutter (ur. 1959) oraz **niezależnie** Brian P. Schmidt (ur. 1967) i Adam G. Ries (ur. 1969) odkryli (1998) gwałtowny wzrost poczerwienienia światła docierającego do Ziemi z bardzo odległych źródeł.

2001

Paweł O. Mazur i Emil Motolla podali warstwowy model czarnej dziury, otrzymał on nazwę grawastar.

2002

Sergei M. Kopeikin (ur. 1956) i Edward B. Fomalont wykazali, że wartość prędkości fal grawitacyjnych jest taka sama jak wartość prędkości światła w próżni.

### 2003

Bruno Bertotti, L. Iess i Paolo Tortora przeprowadzili test ogólnej teorii względności, w którym wykorzystali połączenie radiowe Ziemi ze statkiem kosmicznym Cassini. Pomiarów dokonano, gdy między Ziemią i Cassini znajdowało się Słońce. Odchylenie fal radiowych i zmianę ich częstości przez Słońce na trasie Ziemia-Cassini-Ziemia zmierzono z dużą dokładnością. Wyniki potwierdziły przewidywania wynikające z OTW.

### 2006

Raymond Y. Chiao (ur. 1940) zaproponował nową metodę generowania i detekcji fal grawitacyjnych, konstruuując mikrofalowy generator i detektor helowy.

- Raymond Y. Chiao: *New directions for gravity-wave physics via "Millikan oil drops"*.  
arXiv:gr-qc/0610146

2011

20 marca 2004 satelita Gravity Probe B został umieszczony na orbicie biegunowej (polarnej) o promieniu 642 km.

Na pokładzie satelity znajdowały się cztery kriogeniczne żyroskopy, chociaż tylko jeden z nich był niezbędny. Rotory żyroskopów były kulami o średnicy 38 mm wykonanymi z kwarcu i pokrytymi warstwą niobu, zawieszane były elektrostatycznie.

Uzyskane w 2011 wyniki potwierdziły z dużą dokładnością istnienie precesji Schiffa.

Misja była prowadzona przez NASA i Uniwersytet w Stanford pod kierunkiem C. W. Francisa Everita (ur. 1934).

- C. W. F. Everitt et al.: *Gravity Probe B: Final Results of a Space Experiment to Test General Relativity*. Physical Review Letters **106** (3 June 2011) 221101 (5 pages) [27 authors].



2015

14 września 2015 oba detektory LIGO zarejestrowały równocześnie fale grawitacyjne pochodzące od zlewających się dwóch czarnych dziur.

- B. P. Abbott et al. (LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration):  
*Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger.*  
Physical Review Letters **116** (11 February 2016) 061102 (16 pages) [1010 authors].

# Teoria Względności



Zbigniew Osiak

**Kalendarium**

**14**