

# Teoria Względności



Zbigniew Osiak

Testy

03

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>

**Zbigniew Osiak** (Tekst)

**TEORIA WZGLĘDNOŚCI**  
Testy

**Małgorzata Osiak** (Ilustracje)

© Copyright 2014 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: 978-83-272-4262-4

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: *Szczególna 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).

# TEORIA WZGLĘDNOŚCI

## Testy

**dr Zbigniew Osiak**

Portrety wykonała

**Małgorzata Osiak**

### TESTY SZCZEGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI

- Zjawisko kreacji
- Zjawisko anihilacji
- Defekt masy
- Reakcja rozszczepienia
- Reakcja termojądrowa (fuzja)
- Cykl protonowo-protonowy
- Potrójny proces alfa
- Cykl węglowo-azotowo-tlenowy
- Doświadczenie Fizeau
- Doświadczenie Ivesa-Stilwella
- Wydłużenie czasu życia poruszających się cząstek elementarnych
- Eksperyment Hafelego-Keatinga



### TESTY OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI

- Ugięcie promieni świetlnych przelatujących w pobliżu Słońca
- Soczewkowanie grawitacyjne
- Anomalny obrót peryhelium Merkurego
- Precesja de Sittera
- Precesja Lensego-Thirringa
- Precesja Schiffa
- Satelita Gravity Probe B
- Grawitacyjne przesunięcie linii spektralnych ku czerwieni
- Doświadczenie Pounda-Rebki
- Test z maserem wodorowym
- Doświadczenie Shapiro
- Sonda Cassini
- Laserowe pomiary odległości Ziemia-Księżyc
- Fale grawitacyjne
- Pośredni (astronomiczny) dowód istnienia fal grawitacyjnych

- Bezpośredni dowód istnienia fal grawitacyjnych
- GPS

### KOSMOLOGICZNE TESTY OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI

- Stare i nowe problemy kosmologii
- Paradoks fotonowy
- Definicja poczerwienienia
- Nasz Wszechświat jako wnętrze czarnej dziury
- Propozycja nowego testu OTW

# TESTY SZCZEGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI

- Kreacja pary cząstka-antycząstka jest zjawiskiem polegającym na powstawaniu w odpowiednich warunkach pary cząstka-antycząstka z fotonu o energii równoważnej ich łącznej masie (spoczynkowej).
- Kreację pary elektron-pozytron z fotonu gamma po raz pierwszy zaobserwował Blackett w 1933 w udoskonalonej przez niego komorze Wilsona, współpracując z Occhialinim, podczas badania promieniowania kosmicznego.
- Zjawisko to potwierdza zasadę równoważności masy i energii.
- **Patrick Maynard Stuart Blackett (1897-1974)**  
brytyjski fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1948
- **Giuseppe Paolo Stanislao Occhialini (1907-1993)**  
włoski fizyk

• P. M. S. Blackett and G. P. S. Occhialini:

*Some Photographs of the Tracks of Penetrating Radiation.*

Proceedings of the Royal Society of London. Series A. **139**, 839 (March 3, 1933) 699-727.

- 
- Anihilacja jest zjawiskiem polegającym na tym, że cząstka i jej antycząstka po spotkaniu zamieniają się w co najmniej dwa fotony o energii równoważnej sumie ich mas (spoczynkowych).
  - Elektron i pozytron w wyniku anihilacji swobodnej zamieniają się w dwa fotony o energii 511 keV każdy.
  - Zjawisko to potwierdza zasadę równoważności masy i energii.

- Defekt masy ( $\Delta m$ ) jest różnicą sumy mas nukleonów swobodnych i masy utworzonego z nich jądra atomowego. Energia równoważna defektowi masy jest równa energii wiązania jądra.
- Energia wiązania ( $E$ ) jest energią potrzebną do rozdzielenia danego jądra atomowego na protony i neutrony, równoważną defektowi masy ( $\Delta m$ ) tego jądra.

$$E = \Delta m \cdot c^2$$

- Liczbowe wartości energii wiązania różnych jąder atomowych potwierdzają zasadę równoważności masy i energii.

- Reakcja rozszczepienia jest reakcją jądrową, 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 (spoczynkowych) substratów jest większa od sumy mas (spoczynkowych) produktów.
- Badania, które przeprowadzili Fermi i Segrè w 1934, Hahn i Strassmann w 1938 oraz Frish i Meitner w 1939, doprowadziły do odkrycia łańcuchowej reakcji rozszczepienia uranu.



- A, B – produkty rozpadu jądra uranu
- Bilans energii i masy w różnych reakcjach rozszczepienia

---

potwierdza zasadę równoważności masy i energii.

- **Enrico Fermi (1901-1954)**

włoski fizyk teoretyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1938

- **Emilio Gino Segrè (1905-1989)**

włosko-amerykański fizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1959

- **Otto Hahn (1879-1968)**

niemiecki fizykochemik, laureat Nagrody Nobla z chemii w 1944

- **Fritz Strassmann (1902-1980)**

niemiecki fizykochemik

- **Otto Robert Frish (1904-1979)**

austriacko-brytyjski fizyk

- **Lise Meitner (1878-1968)**

austriacko-szwedzka fizyczka

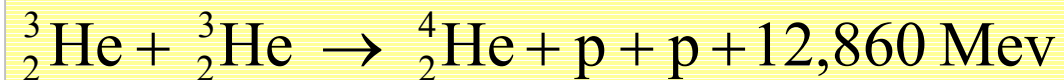
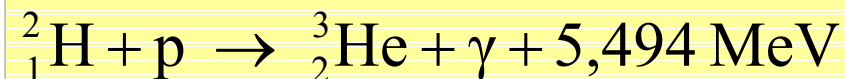
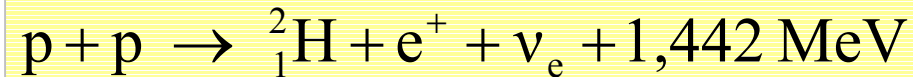


- Reakcja termojądrowa (fuzja) jest reakcją jądrową, w której z dwóch jąder lekkich powstaje nowe jądro.
- W reakcji termojądrowej wyzwala się duża ilość energii, ponieważ suma mas (spoczynkowych) substratów jest większa od sumy mas (spoczynkowych) produktów.
- Do zajścia reakcji termojądrowej wymagana jest temperatura rzędu  $10^8$  K, stąd przedrostek termo w nazwie tej reakcji.



- Bilans energii i masy w różnych reakcjach termojądrowych potwierdza zasadę równoważności masy i energii.

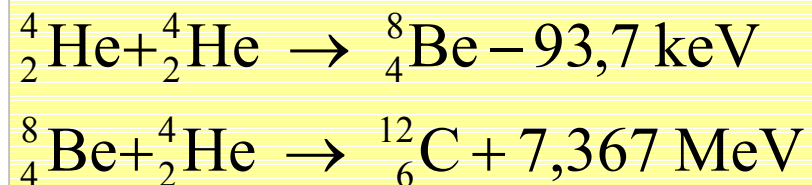
- Cykl protonowo-protonowy jest cyklem reakcji jądrowych stanowiących źródło energii gwiazd.



- Cykl protonowo-protonowy podali Bethe i Critchfield w 1938.
- **Hans Albrecht Bethe (1906-2005)**  
amerykański fizyk pochodzenia niemieckiego,  
laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1967
- **Charles Louis Critchfield (1910-1994)**  
amerykański fizyk teoretyk

- H. A. Bethe and C. L. Critchfield: *The Formation of Deuterons by Proton Combination*. Physical Review **54**, 4 (June 23, 1938) 248-254.
- H. A. Bethe and C. L. Critchfield: *On the Formation of Deuterons by Proton Combination*. Physical Review **54**, 10 (1938) 862-862.

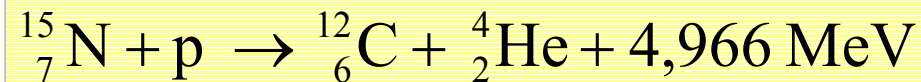
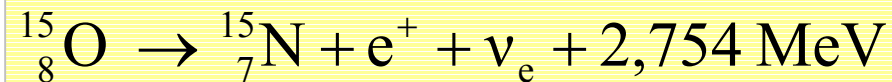
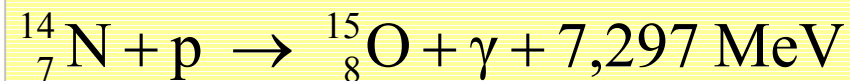
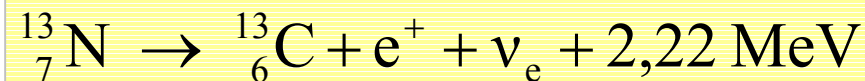
- Potrójny proces alfa jest cyklem reakcji jądrowych stanowiących źródło energii gwiazd, w którym trzy jądra helu-4 (cząstki alfa) przekształcają się w jądro węgla-12.



- Potrójny proces alfa zaproponował Salpeter w 1952.
- **Edwin Ernest Salpeter (1924-2008)**  
australijsko-amerykański astrofizyk pochodzenia austriackiego



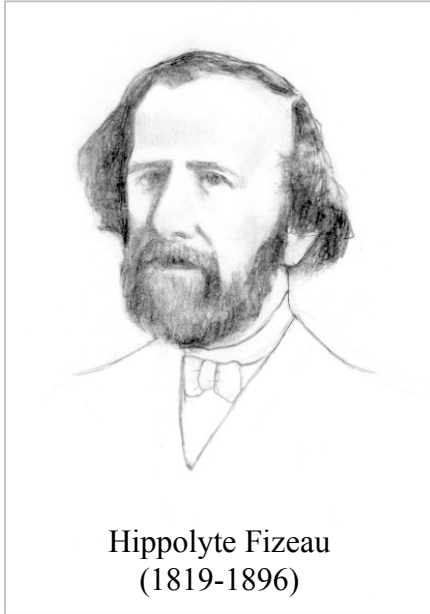
- Cykl węglowo-azotowo-tlenowy jest cyklem reakcji jądrowych zachodzących w centrum gwiazdy, stanowiącym źródło jej energii.



- Cykl węglowo-azotowo-tlenowy opisał Weizsäcker w 1937 i 1938 oraz niezależnie Bethe w 1939.

- **Hans Albrecht Bethe (1906-2005)**  
amerykański fizyk pochodzenia niemieckiego,  
laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1967
- **Carl Friedrich von Weizsäcker (1912-2007)**  
niemiecki fizyk

- C. F. von Weizsäcker:  
*Über Elementumwandlungen im Innern der Sterne.*  
Physikalische Zeitschrift **38** (1937) 176-191.  
Physikalische Zeitschrift **39** (1938) 633-646.
- H. A. Bethe:  
*Energy Production in Stars.*  
Physical Review **55**, 5 (1 March 1939) 434-456.



Hippolyte Fizeau  
(1819-1896)

- Doświadczenie Fizeau dotyczy pomiarów wartości prędkości światła wykonanych w 1851 przez Fizeau w spoczywającej i poruszającej się wodzie, które wskazywały, że klasyczny wzór na składanie prędkości nie jest prawdziwy w przypadku światła.
- Wynik ten został wyjaśniony w ramach szczególnej teorii względności.\*

- **Armaund Hippolyte Louis Fizeau (1819-1896)**  
francuski fizyk

• H. Fizeau: *Sur les hypotheses relatives a l'éther lumineux, et sur une expérience qui paraît démontrer que le mouvement des corps change la vitesse avec laquelle la lumière se propage dans leur intérieur.*

Comptes Rendus des séances de l'Académie des Sciences, Paris **33** (1851) 349-355. [Séance du lundi 29 septembre 1851]

\* Z. Osiak: *Szczególna Teoria Względności*. Self Publishing (2012). [Strona 38]

- Doświadczenie Ivesa-Stilwella to 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 prędkością o wartości  $2,0 \cdot 10^6$  m/s.
- **Herbert Eugene Ives (1882-1953)**  
amerykański fizyk i wynalazca
- **George R. Stilwell**  
amerykański fizyk

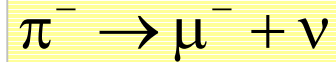
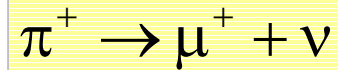
• H. E. Ives and G. R. Stilwell: *An experimental study of the rate of a moving clock.*  
Journal of the Optical Society of America **28**, 7 (1938) 215-226.  
*Eksperymentalne badanie tempa poruszającego się zegara.*

• H. E. Ives and G. R. Stilwell: *An experimental study of the rate of a moving clock. II.*  
Journal of the Optical Society of America **31**, 5 (1941) 369-374.  
*Eksperymentalne badanie tempa poruszającego się zegara. II.*

## Wydłużenie czasu życia poruszających się cząstek elementarnych

---

- R. P. Durbin, H. H. Loar oraz W. W. Havens potwierdzili w 1952 doświadczalnie relatywistyczną dylatację czasu, wyznaczając średni czas życia poruszających się mezonów  $\pi^+$  i  $\pi^-$ .



- **Richard P. Durbin**  
amerykański fizyk
- **Howard Hunt Loar**  
amerykański fizyk
- **William Westerfield Havens (1920-2004)**  
amerykański fizyk



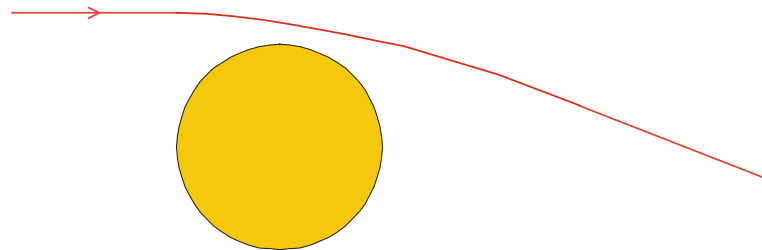
- Eksperyment Hafelego-Keatinga to eksperyment potwierdzający istnienie relatywistycznej i grawitacyjnej dylatacji czasu. Eksperyment ten został przeprowadzony przez Hafelego i Keatinga w październiku 1971.
- Okrążyli dwukrotnie w kierunkach wschodnim i zachodnim Ziemię rejsowym samolotem, na pokładzie 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 – Stambuł – 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.
- **Joseph Carl Hafele (1933-2014)**  
amerykański fizyk
- **Richard E. Keating (1941-2006)**  
amerykański astronom

- 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.

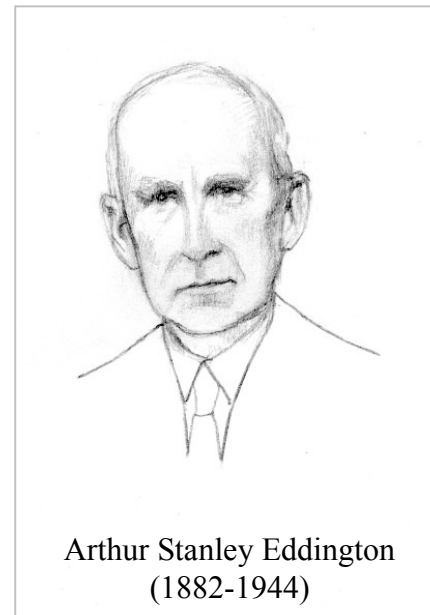
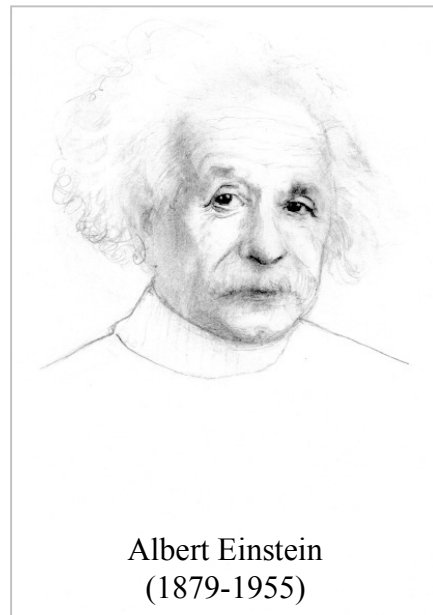
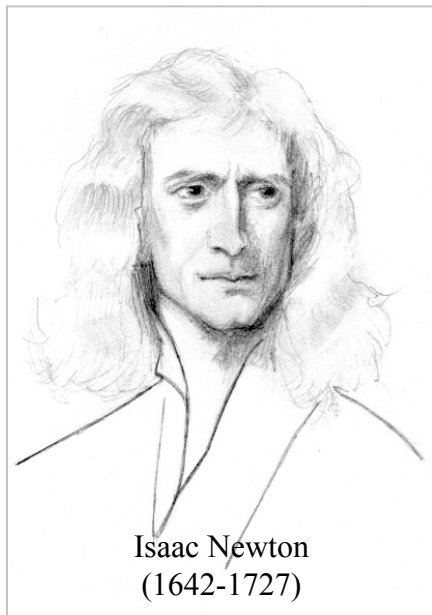
# TESTY OGÓLNEJ TEORII WZGLĘDNOŚCI

- Ugięcie promieni świetlnych przelatujących w w pobliżu Słońca przewidział Einstein w 1907 i 1911 a dokładnie obliczył kąt ugięcia w 1915.
- Przeprowadzone 29 maja 1919 pod kierunkiem Eddingtona obserwacje zaćmienia Słońca potwierdziły przewidziane przez ogólną teorię względności odchylenie promieni świetlnych w polu grawitacyjnym tej gwiazdy. Tym samym teoria grawitacji Einsteina wygrała z teorią grawitacji Newtona.



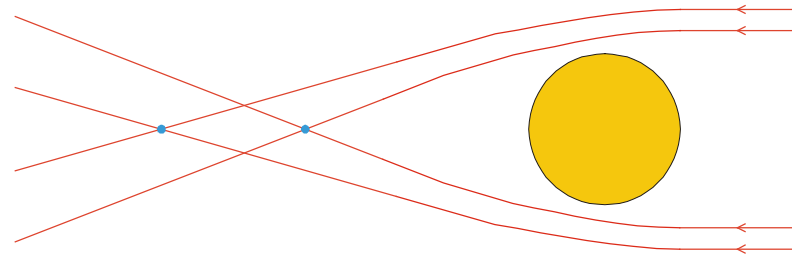
- **Grawitacyjna dyfrakcja**

- A. Einstein: *Erklärung der Perihelbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften **2**, 47 (1915) 831-839. *Wyjaśnienie ruchu peryhelium Merkurego w ogólnej teorii względności.*



- **Sir Isaac Newton (1643-1727)**  
angielski fizyk, matematyk, astronom i filozof
- **Albert Einstein (1879-1955)**  
genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921
- **Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944)**  
brytyjski astronom, astrofizyk, fizyk i matematyk

- Soczewkowanie grawitacyjne to działanie pola grawitacyjnego na wiązkę fal elektromagnetycznych tak, jak soczewka o wielu ogniskach. Dla promieni biegnących dalej od źródła pola grawitacyjnego ogniskowa jest większa.
- Soczewkowanie grawitacyjne opisał Einstein w 1936.



- Soczewka grawitacyjna
- **Albert Einstein (1879-1955)**  
genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921

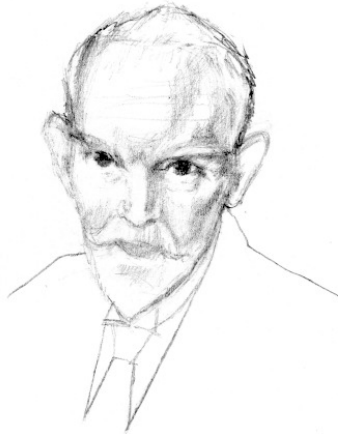
- Pierwszą soczewkę grawitacyjną odkryli w 1979 Walsh, Carswell oraz Weymann. Jest nią podwójny kwazar QSO 0957+561 A/B.
- **Dennis Walsh (1933-2005)**  
angielski astronom
- **Robert F. Carswell**  
amerykański astronom
- **Ray J. Weymann**  
amerykański astronom i astrofizyk



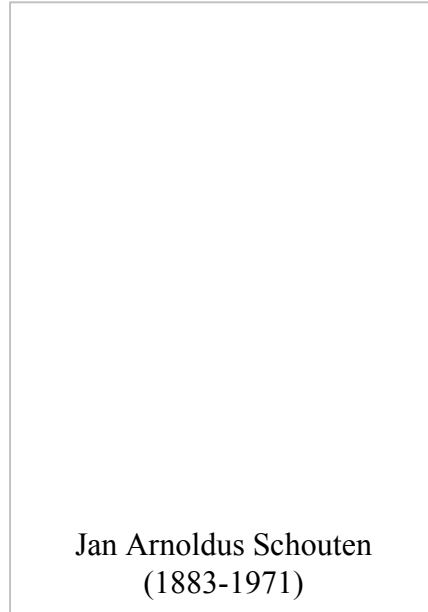
- Anomalny obrót peryhelium Merkurego to zjawisko polegające na tym, że peryhelium Merkurego przesuwają się o 574 sekundy kątowne na stulecie wskutek ruchu tej planety po rożecie eliptycznej, z czego 43 sekundy kątowne nie dają się wyjaśnić przez teorię Newtona.
- Zjawisko to zaobserwował w 1859 Le Verrier, który przypuszczał, że 43 sekundowa nadwyżka może być spowodowana przez hipotetyczną planetę Wulkan lub planetoidy krążące bliżej Słońca niż Merkury.
- Einstein wyjaśnił 18 listopada 1915 jakościowo i ilościowo anomalny obrót peryhelium Merkurego (i pozostałych planet) w ramach OTW.
- **Urbain Jean Joseph Le Verrier (1811-1877)**  
francuski astronom.
- **Albert Einstein (1879-1955)**  
genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921

- Równanie orbity cząstki w stacjonarnym centralnie symetrycznym polu grawitacyjnym otrzymane w ramach ogólnej teorii względności różni się od analogicznego równania w teorii Newtona członem odpowiedzialnym za obrót orbity.
  - Na podstawie rozwiązania tego równania można wyznaczyć (obliczyć) relatywistyczną poprawkę do kąta obrotu peryhelium planety w płaszczyźnie orbity podczas jednego pełnego obiegu planety po tej orbicie. Poprawka ta w przypadku Merkurego wynosi 43” na stulecie.
- 
- Urbain Jean Joseph Le Verrier: *Sur la théorie de Mercure et sur le mouvement du périhélie de cette planète*. Comptes Rendus des séances de l'Académie des Sciences, Paris **49** (1859) 379-383.  
[Lettre de M. Le Verrier a M. Faye]  
[Séance du lundi 12 septembre 1859]
  - U. J. Le Verrier: *Theorie du mouvement de Mercure*. Annales de l'Observatoire Imperial de Paris. T. 5. Mallet-Bachelier, Paris 1859.  
[195 stron]
  - A. Einstein: *Erklärung der Perihelbewegung der Merkur aus der allgemeinen Relativitätstheorie*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften **2**, 47 (1915) 831-839.  
[Gesamtsitzung vom 18. November 1915]  
*Wyjaśnienie ruchu peryhelium Merkurego w ogólnej teorii względności.*

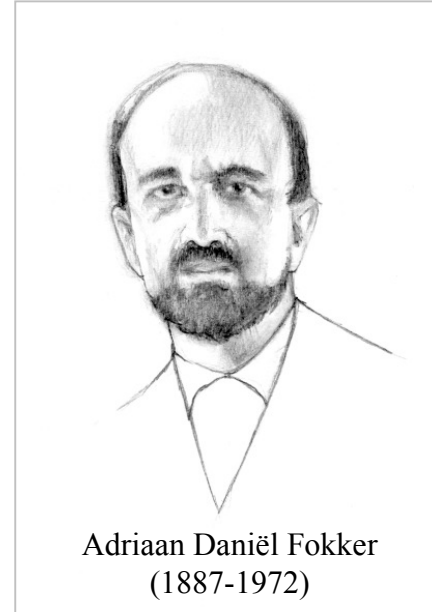
- Precesja de Sittera to wkład do precesji **orbitalnego** momentu pędu swobodnie orbitującej cząstki **niezależny** od prędkości kątowej wirującego ciała źródłowego. Precesja ta nazywana jest precesją geodezyjną, efektem geodezyjnym (geodetycznym) oraz efektem de Sittera.
  - Efekt geodezyjny został opisany w 1916 przez de Sittera a następnie dokładniej zbadany w 1919 oraz 1922 przez Schoutena a także w 1921 przez Fokkera.
- W. de Sitter: *On Einstein's Theory of Gravitation, and its Astronomical Consequences. II.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **77** (12/1916) 155-184.  
*O teorii grawitacji Einsteina i jej astronomicznych konsekwencjach. II.*
  - J. A. Schouten: *On the arising of a precession-motion owing to the non-euclidean linear element of the space in the vicinity of the Sun.* Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen **21**, 4 (1919) 533-539.  
[Communicated by Prof. Lorentz in the meeting of June 29, 1918.]  
*O istnieniu ruchu precesyjnego z powodu nieeuklidesowego elementu liniowego przestrzeni w pobliżu Słońca.*
  - J. A. Schouten: *On geodesic precession.* Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen **23**, 8 (1922) 1108-1112.  
[Communicated by Prof. H. A. Lorentz in the meeting of February 26, 1921.]  
*O precesji geodezyjnej.*
  - A. D. Fokker: *The geodesic precession: a consequence of Einsteins's theory of gravitation.* Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen **23**, I (1921) 729-738.  
[Communicated by Prof. H. A. Lorentz in the meeting of October 30, 1920.]  
*Precesja geodezyjna: konsekwencja teorii grawitacji Einsteina.*



Willem de Sitter  
(1872-1934)



Jan Arnoldus Schouten  
(1883-1971)



Adriaan Daniël Fokker  
(1887-1972)

- **Willem de Sitter (1872-1934)**  
holenderski matematyk, astronom i kosmolog
- **Jan Arnoldus Schouten (1883-1971)**  
holenderski matematyk
- **Adriaan Daniël Fokker (1887-1972)**  
holenderski fizyk teoretyk

---

### Angielskie nazwy precesji de Sittera

- Geodetic effect
- Geodetic precession
- De Sitter precession
- De Sitter effect

- Precesja Lensego-Thirringa to wkład do precesji **orbitalnego** momentu pędu swobodnie orbitującej cząstki **zależny** od prędkości kątowej wirującego ciała źródłowego.
- Precesja ta nazywana jest precesją Lensego-Thirringa, efektem Lensego-Thirringa, efektem rotacyjnym, precesją żyroskopową, wleczeniem układów inercjalnych).
- **Hans Thirring (1888-1976)**  
austriacki fizyk teoretyk
- **Lense (1890-1985)**  
austriacki fizyk i matematyk

• J. Lense und H. Thirring: *Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie*. Physikalische Zeitschrift **19**, 8 (15. April 1918) 156-163.

Istnieje angielski przekład:

• Josef Lense and Hans Thirring: *On the Influence of the Proper Rotation of Central Bodies on the Motions of Planets and Moons According to Einstein's Theory of Gravitation*. General Relativity and Gravitation **16**, 8 (1984) 727-741.

### Angielskie nazwy i określenia precesji Lensego-Thirringa

- Lense-Thirring effect
- Precession of the orbital plane of an orbiting body around a rotating mass
- Spin-orbital angular momentum coupling of the gravitational interaction
- Dragging of inertial frames – nazwa zaproponowana przez Einsteina

- Precesją (efektem) Schiffa nazywane jest złożenie precesji de Sittera i precesji Lensego-Thirringa osi obrotu swobodnie orbitującego żyroskopu w polu grawitacyjnym wirującego ciała źródłowego.

- **Leonard Isaac Schiff (1915-1971)**

amerykański fizyk teoretyk

- L. I. Schiff: *Possible New Experimental Test of General Relativity Theory*.  
Physical Review Letters **4**, 5 (1960) 215-217.

- L. I. Schiff: *Motion of a Gyroscope According to Einstein's Theory of Gravitation*.  
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **46**, 6 (1960) 871-882.

## Przykład

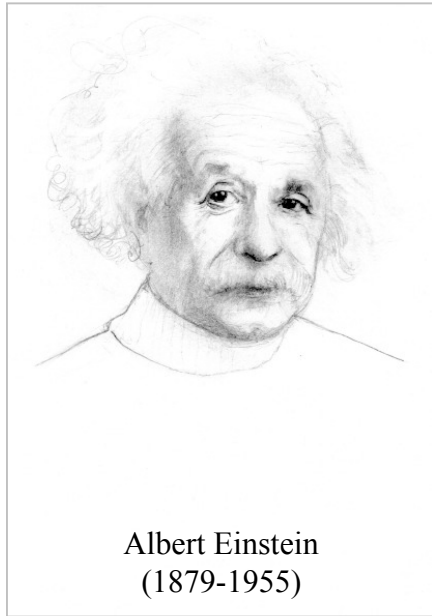
W przypadku **orbity biegunowej** (polarnej) o promieniu 642 km w ciągu roku precesja de Sittera odchyła oś żyroskopu w płaszczyźnie orbity o 6,6061 sekund kątowych, a precesja Lensego-Thirringa odchyła oś żyroskopu w płaszczyźnie prostopadłej do płaszczyzny orbity o 39,2 milisekund kątowych.

- 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].



- Satelita Gravity Probe B to satelita, który został umieszczony 20 marca 2004 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 warstewką niobu, zawieszane były elektrostatycznie.
- Uzyskane wyniki potwierdziły z dużą dokładnością istnienie precesji Schiffa.
- Misja była prowadzona przez NASA i Uniwersytet w Stanford pod kierunkiem Everita.
- **C. W. Francis Everitt (ur. 1934)**  
brytyjsko-amerykański fizyk

• 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].



Albert Einstein  
(1879-1955)

- Grawitacyjne przesunięcie linii spektralnych ku czerwieni to 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. Grawitacyjne przesunięcie ku czerwieni nazywane jest też grawitacyjnym poczerwienieniem.
- Grawitacyjne poczerwienienie przewidział Einstein w 1907 i 1911.

• A. Einstein: *Über das Relativitätsprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerungen.*

Jahrbuch der Radioaktivität und Elektronik 4 (1907) 411-462.

*O zasadzie względności i jej konsekwencjach.*

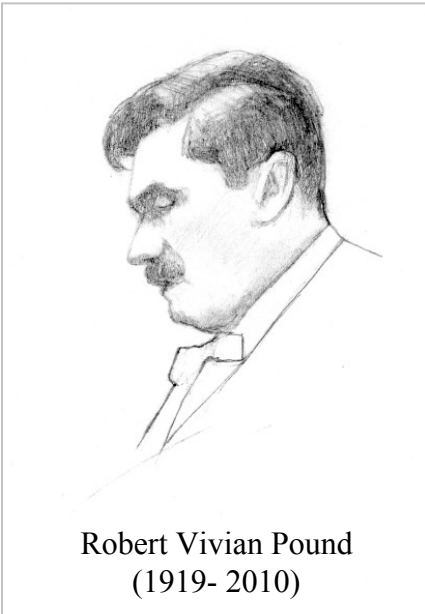
• A. Einstein: *Über den Einfluß der Schwerkraft auf die Ausbreitung des Lichtes.*

Annalen der Physik 35, 10 (1911) 898-908.

*O wpływie siły ciężkości na rozchodzenie się światła.*

- Poczynając od 1948 Adam badała przesunięcie grawitacyjne słonecznych linii widmowych, publikując wyniki w latach 1948, 1952, 1955, 1958 oraz 1959.
- **Madge Gertrude Adam (1912-2001)**  
angielska astronom (solar astronomer)

- M. G. Adam: *Interferometric measurements of wave-lengths. I. Development of the method of channels and its application at 5080 Å and 6020 Å.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **112** (1952) 546-569.
- M. G. Adam: *Interferometric measurements of wave-lengths. II. Measurements at 6500 Å and a general discussion of the solar red shift.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **115** (1955) 405-421.
- M. G. Adam: *Interferometric measurements of wave-lengths. III. A note on observational technique in the method of circular channels.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **115** (1955) 422-426.
- M. G. Adam, S. Nichols: *Interferometric measurements of wave-lengths. IV. The accuracy of measured wave-lengths.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **118** (1958) 97-105.
- M. G. Adam: *Interferometric measurements of wave-lengths. V. The radial current interpretation of solar red shifts.* Monthly Notices of the Royal Astronomical Society **118** (1958) 106-116.



Robert Vivian Pound  
(1919- 2010)

- Doświadczenie Pounda-Rebki to 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.

- R. V. Pound and G. A. Rebka, Jr.: *Apparent weight of photons*. Physical Review Letters **4**, 7 (April 1, 1960) 337-341.
- R. V. Pound and J. L. Snider: *Effect of Gravity on Nuclear Resonance*. Physical Review Letters **13**, 18 (11/1964) 539-540.
- R. V. Pound and J. L. Snider: *Effect of Gravity on Gamma Radiation*. Physical Review **140**, 3 B (11/1965) B788-B803.

- Robert Vivian Pound (1919-2010)  
kanadyjsko-amerykański fizyk
- Glen Anderson Rebka (ur. 1931)  
amerykański fizyk
- Joseph L. Snider  
amerykański fizyk

- Test z maserem wodorowym to test OTW przeprowadzony przez Vessota i współpracowników w czerwcu 1976, 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.
- **Robert F. C. Vessot**  
amerykański astrofizyk
- **Martin W. Levine**  
amerykański astrofizyk

• 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.

- Doświadczenie Shapiro to 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.
- Efekt ten został przewidziany przez Shapiro w 1964.
- Retardacja (opóźnienie) sygnału jest jednym z testów ogólnej teorii względności, który bywa nazywany czwartym klasycznym testem tej teorii.
- **Irwin I. Shapiro (ur. 1929)**  
amerykański fizyk i astrofizyk

- Irwin I. Shapiro: *Fourth test of general relativity*. Physical Review Letters **13**, 26 (28 December 1964) 789-791.
- Irwin I. Shapiro, Gordon H. Pettengill, Michael E. Ash, Melvin L. Stone, William B. Smith, Richard P. Ingalls, and Richard A. Brockelman: *Fourth test of general relativity: Preliminary results*. Physical Review Letters **20**, 22 (May 1968) 1265-1269.
- Irwin I. Shapiro, Gordon H. Pettengill, Michael E. Ash, Melvin L. Stone, William B. Smith, Richard P. Ingalls, and Richard A. Brockelman: *Fourth test of general relativity: Preliminary results*. Physical Review Letters **21**, 4 (July 1968) 266-266.

---

- Bertotti, Iess i Tortora przeprowadzili w 2003 test OTW, 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 częstotliwości przez Słońce na trasie Ziemia-Cassini-Ziemia zmierzono z dużą dokładnością. Wyniki potwierdziły przewidywania wynikające z OTW.

- **Bruno Bertotti**  
włoski astrofizyk

- **Luciano Iess**  
włoski fizyk

- **Paolo Tortora**  
włoski inżynier

• B. Bertotti, L. Iess i P. Tortora: *A test of general relativity using radio links with the Cassini spacecraft*. Nature **425**, 6956 (25 September 2003) 374-376.



- Z hipotezy Nordtvedta (1968) wynika, 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 Nordtvedta, stanowiąc tym samym pozytywny test silnej zasady równoważności.
- Laser Lunar Ranging Experiment to angielska nazwa tego testu.
- **Kenneth Leon Nordtvedt, Jr. (ur. 1939)**  
amerykański fizyk teoretyk

• 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.

- Fale grawitacyjne to 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.

- Teorię fal grawitacyjnych sformułował Einstein w 1916.

- **Albert Einstein (1879-1955)**

genialny fizyk teoretyk, laureat nagrody Nobla z fizyki w 1921

- **Nathan Rosen (1909-1985)**

amerykański fizyk teoretyk

- A. Einstein: *Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation*.

Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften **1**, 32 (1916) 688-696.

*Przybliżone całkowanie równań pola grawitacyjnego*. Po raz pierwszy została sformułowana teoria fal grawitacyjnych.

- A. Einstein: *Über Gravitationswellen*. Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften **1** (1918) 154-167.

*O falach grawitacyjnych*. Podał między innymi wzór kwadrupolowy na moc energii wysyłanej w formie fal grawitacyjnych przez poruszające się ciała będące emiterami.

- A. Einstein, N. Rosen: *On Gravitational Waves*. Journal of the Franklin Institute **223** (1937) 43-54.

*O falach grawitacyjnych*. Podali rozwiązanie równań pola dla cylindrycznych fal grawitacyjnych.



- Pośredni (astronomiczny) dowód istnienia fal grawitacyjnych to obserwacyjny dowód sfinalizowany w 1979 przez Taylora, który 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.

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

• J. H. Taylor, L. A. Fowler and P. M. McCulloch: *Measurements of General Relativistic Effects in the Binary Pulsar PSR1913+16*. Nature **277** (1979) 437-440.

- 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].

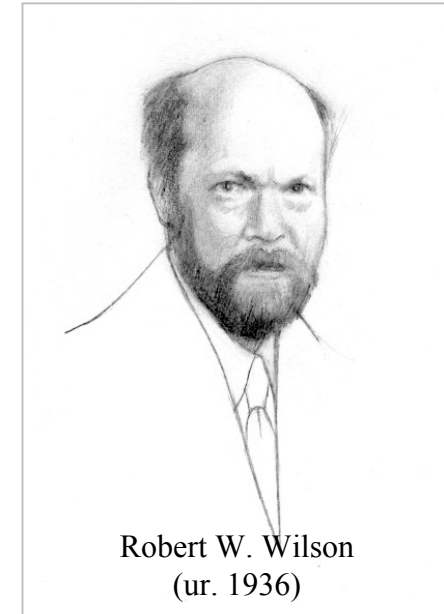
- 
- GPS (Global Positioning System) to globalny system nawigacyjny.
  - Aby określić pozycję w przestrzeni i czas, konieczny jest jednoczesny odbiór sygnałów z przynajmniej czterech satelitów.
  - Nie uwzględnienie poprawek wynikających z teorii względności spowodowałoby błąd w pomiarze czasu wynoszący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

**KOSMOLOGICZNE TESTY  
OGÓLNEJ  
TEORII WZGLĘDNOŚCI**

- Kosmologiczny model wszechświata powinien pomóc w udzieleniu odpowiedzi na następujące pytania:
  - Dlaczego niebo w nocy jest ciemne? (Olbers, 1826)
  - Jakie jest źródło mikrofalowego promieniowania tła? (Penzias & Wilson, 1965; Mather, 1990; Smoot, 1991)
  - Co jest przyczyną złożonej zależności poczerwienienia od odległości: dla małych odległości poczerwienienie jest ujemne, następnie zmienia znak na dodatni i liniowo rośnie (Hubble, 1929), po czym zaczyna szybko wrastać nieliniowo (Perlmutter, 1998; Ries & Schmidt, 1998).
- Odpowiedzi na te pytania można uzyskać w ramach podanego przeze mnie modelu (Osiak, 2012). Model ten został opracowany na bazie ogólnej teorii względności, dlatego powyższe zjawiska można traktować jako kosmologiczne testy OTW.

- H. W. M. Olbers: *Über die Durchsichtigkeit des Weltraums*.  
Berliner astronomisches Jahrbuch für das Jahr 1826.  
*O przezroczystości przestrzeni kosmicznej.*
- A. A. Penzias and R. W. Wilson: *A Measurement of Excess Antenna Temperature at 4080 MHz*.  
Astrophysical Journal **142** (1965) 419-421.  
*Pomiar nadwyżki temperatury anteny przy 4080 MHz.*
- Grupa COBE: J. C. Mather i współpracownicy:  
*A Preliminary Measurements of the Cosmic Microwave Background Spectrum by the Cosmic Background Explorer (COBE) Satellite*.  
Astrophysical Journal Letters **354** (May 10, 1990) L37-L40.  
*Wstępne pomiary spektrum kosmicznego mikrofalowego tła uzyskane przez satelitę COBE.*
- Grupa COBE: G. F. Smoot i współpracownicy:  
*First results of the COBE satellite measurement of the anisotropy of the cosmic microwave background radiation*.  
Advances in Space Research **11**, 2 (1991) 193-205.  
*Pierwsze wyniki pomiaru anizotropii kosmicznego mikrofalowego promieniowania tła uzyskane przez satelitę COBE.*
- E. P. Hubble: *A Relation Between Distance and Radial Velocity Among Extra-galactic Nebulae*.  
Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America **15** (1929) 168-173.  
*Związek między odległością i prędkością radialną mgławic pozagalaktycznych.*
- S. Perlmutter *et al.*: *Discovery of a supernova explosion at half the age of the universe*.  
Nature **391** (1 January 1998) 51-54. Letters to Nature. Received 7 October 1997; Accepted 18 November 1997.  
*Odkrycie eksplozji supernowej w połowie życia wszechświata.*
- S. Perlmutter *et al.*, (The Supernova Cosmology Project): *Measurements of  $\Omega$  and  $\Lambda$  from 42 High-Redshift Supernovae*.  
Astrophysical Journal **517**, 2 (1999 June 1) 565-586. Received 1998 September 8; accepted 1998 December 17.  
*Pomiary  $\Omega$  i  $\Lambda$  z (na podstawie) 42 supernowych o dużym poczerwienieniu.*
- A. G. Riess *et al.*: *Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant*.  
The Astronomical Journal **116**, 3 (09/1998) 1009-1038.  
*Obserwacyjny dowód (pochodzący) z supernowych dla przyspieszającego wszechświata i stałej kosmologicznej.*
- Z. Osiak: *Antygravitacja*.  
Self Publishing (2012).





- **Heinrich W. M. Olbers (1758-1840)**

niemiecki astronom i lekarz

- **Edwin P. Hubble (1889-1953)**

amerykański astronom i kosmolog

- **Arno A. P. Penzias (ur. 1933)**

amerykański astrofizyk, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1978

- **Robert W. Wilson (ur. 1936)**

amerykański radio-astronom, laureat Nagrody Nobla z fizyki w 1978

- **John C. Mather (ur. 1946)**  
amerykański fizyk, astrofizyk i kosmolog,  
laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2006
- **George F. Smoot (ur. 1945)**  
amerykański fizyk, astrofizyk i kosmolog,  
laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2006
- **Saul Perlmutter (ur. 1959)**  
amerykański astrofizyk,  
laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2011
- **Adam G. Ries (ur. 1969)**  
amerykański astrofizyk,  
laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2011
- **Gian P. Schmidt (ur. 1967)**  
australijski astrofizyk,  
laureat Nagrody Nobla z fizyki w 2011

- Pojęcie fotonu w kontekście metryk Schwarzschilda oraz F-L-R-W prowadzi do paradoksu. Obliczając wpływ tych metryk na energię fotonu ze wzoru  $E = h/T$  lub równoważnego  $E = hc/\lambda$ , otrzymujemy różne wyniki w zależności od użytego wzoru.
- Paradoks ten został nazwany przeze mnie paradoksem fotonowym.
- Paradoks fotonowy nie ma miejsca w czasoprzestrzeniach konforemnie płaskich. W pozostałych czasoprzestrzeniach jednym z rozwiązań paradoksu fotonowego jest założenie, że energia fotonu zależy od punktu czasoprzestrzeni, w którym nastąpiła jego emisja i pozostaje stała podczas wędrówki fotonu. Oznacza to, że fotony mają pamięć, lub bardziej uczenie – energia fotonu jest niezmiennikiem. Przy czym, w silniejszym polu grawitacyjnym dane źródło powinno wysyłać fotony o mniejszej energii niż to samo źródło znajdujące się w słabszym polu.

$$z^* \stackrel{\text{df}}{=} \frac{E_{\text{lab}} - E_{\text{out}}}{E_{\text{out}}} = \frac{E_{\text{lab}}}{E_{\text{out}}} - 1$$

$$E_{\text{lab}} = \frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{g_{11}^{\text{lab}}}}$$

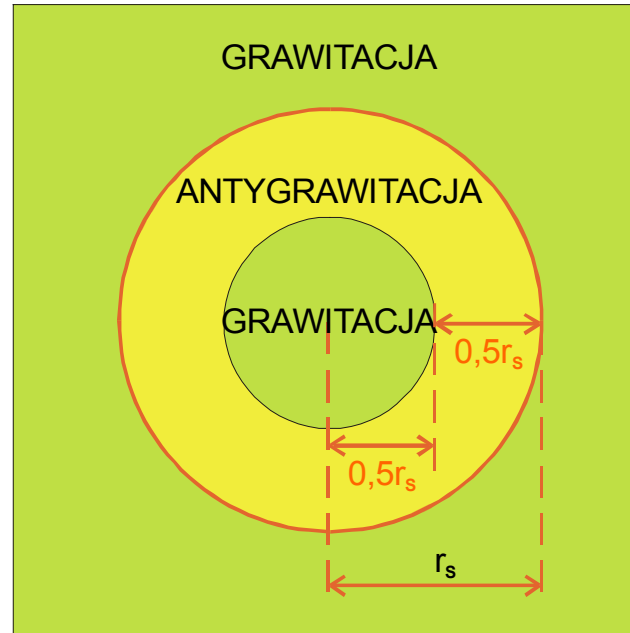
$$E_{\text{out}} = \frac{E_{\text{max}}}{\sqrt{g_{11}^{\text{out}}}}$$

$$z^* = \frac{\sqrt{g_{11}^{\text{out}}}}{\sqrt{g_{11}^{\text{lab}}}} - 1$$

- $E_{\text{lab}}$  = energia fotonu emitowanego ze źródła znajdującego się w laboratorium
- $E_{\text{out}}$  = energia fotonu emitowanego ze źródła znajdującego się poza laboratorium
- $E_{\text{max}}$  = energia fotonu emitowanego w nieobecności pola grawitacyjnego
- $g_{11}^{\text{lab}}$  = składowa tensora metrycznego w laboratorium w miejscu detekcji fotonu
- $g_{11}^{\text{out}}$  = składowa tensora metrycznego poza laboratorium w miejscu emisji fotonu

- Nasz Wszechświat można potraktować jako olbrzymią jednorodną Czarną Dziurę. Izoluje go od reszty wszechświata obszar przestrzeni, w którym występuje antygravitacja.
- Nasza Galaktyka wraz układem słonecznym oraz Ziemią, które w skali rozmiarów kosmologicznych można uważać za ledwie jako punkt, powinny znajdować się w pobliżu centrum Czarnej Dziury.

- $r_s$  – promień Schwarzschilda



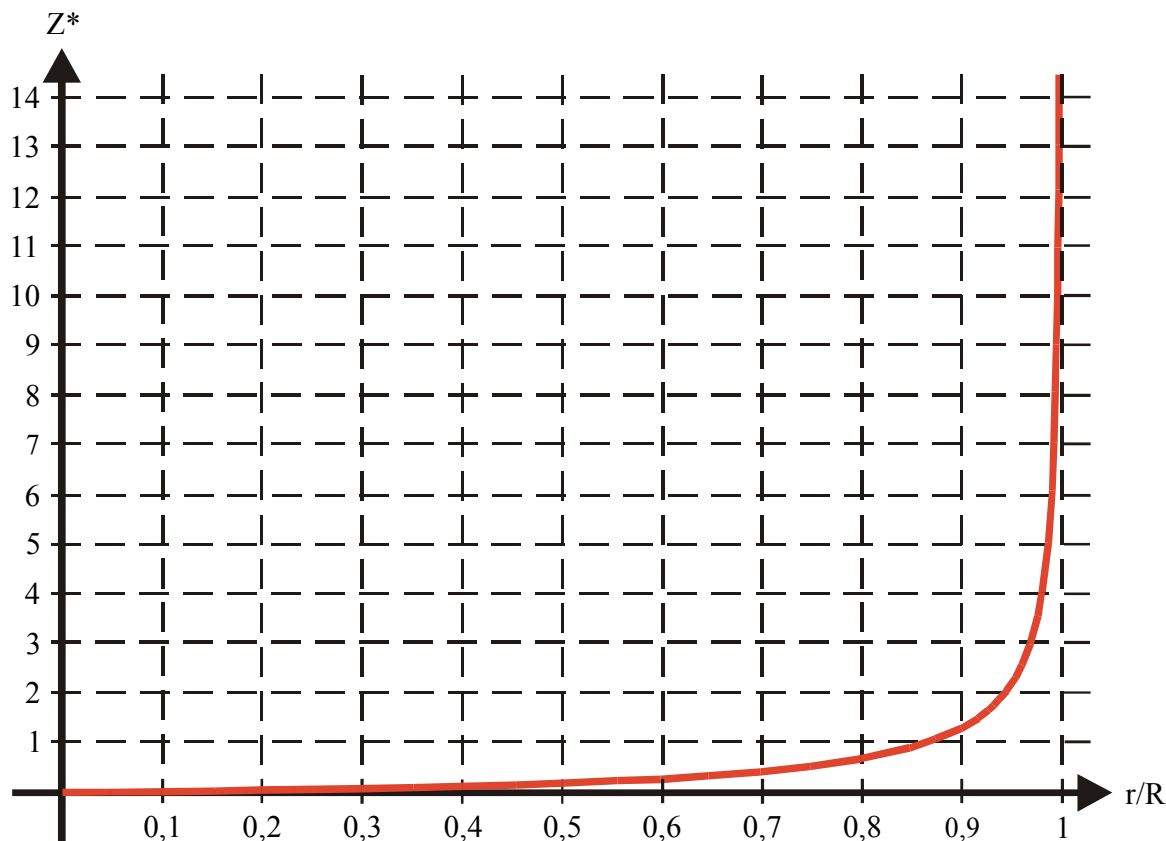
- Z. Osiak: *Antygravitacja*. Self Publishing (2012).

- Promień Naszego Wszechświata wynosi 6,31 mld lat świetlnych.
- Dla  $H = 75 \text{ km/s Mpc}$  gęstość Wszechświata w tym modelu jest ponad 17 razy większa niż gęstość w modelu Wszechświata Friedmana i wynosi 51 protonów na metr sześcienny. **Nasz model nie wymaga przyjęcia założenia o istnieniu ciemnej energii.**
- W odległości od środka Ziemi w przybliżeniu równej 236000 lat świetlnych poczerwienienie mierzone względem naszej planety zmienia znak z ujemnego na dodatni.
- Światło docierające do Ziemi z Naszej Galaktyki, której promień wynosi około 50000 lat świetlnych a grubość około 12000 lat świetlnych, powinno być przesunięte ku fioletowi względem światła emitowanego na powierzchni Ziemi. Przy czym ujemna wartość poczerwienienia powinna być zależna od kierunku obserwacji.

$$z^* \stackrel{\text{df}}{=} \frac{E_{\text{lab}}}{E_{\text{out}}} - 1$$

$$z^* \approx \frac{\sqrt{1 - 1,4 \cdot 10^{-9}}}{\sqrt{1 - \frac{r^2}{R^2}}} - 1$$

- E – energia fotonu
- R – promień Naszego Wszechświata



- Wykres zależności poczerwienienia  $z^*$  od odległości  $r$  od centrum Naszego Wszechświata (**Uwaga:**  $z^*$  przyjmuje wartości ujemne dla stosunku  $r/R$  w przybliżeniu mniejszego niż  $3,74 \cdot 10^{-5}$ .)

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



- Jak na Ziemi wykazać realność proponowanego modelu Naszego Wszechświata jako czarnej dziury z otoczką antygravitacyjną?
- Należy zmierzyć wartość prędkości światła w pionowej rurze próżniowej tuż pod powierzchnią i tuż nad powierzchnią Ziemi. Jeżeli różnica kwadratów tych pomiarów będzie równa kwadratowi drugiej prędkości kosmicznej, to zostanie potwierdzone istnienie czarnych dziur z otoczką antygravitacyjną.

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)_{in}^2 - \left(\frac{dr}{dt}\right)_{out}^2 = \frac{2GM}{R}$$

$$\left(\frac{dr}{dt}\right)_{in} - \left(\frac{dr}{dt}\right)_{ex} \cong \frac{GM}{cR} \cong 0,2 \frac{m}{s}$$

- Indeks „out” odnosi się do wartości prędkości światła tuż nad powierzchnią Ziemi, a indeks „in” – tuż pod powierzchnią Ziemi.

# Teoria Względności



Zbigniew Osiak

Testy

03