

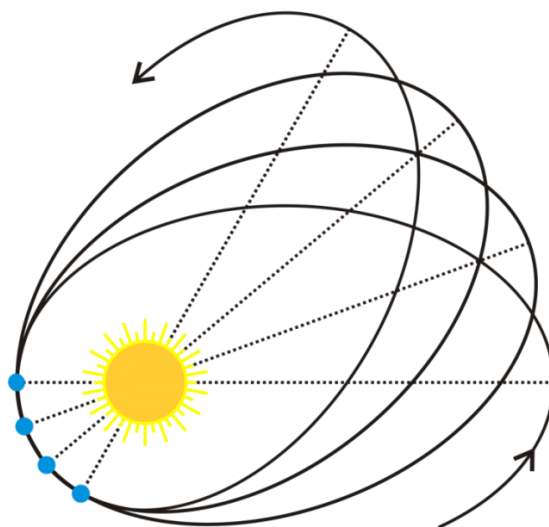
## Sprawdzić Einsteina

*Bronisława Średniawa*

*Niedługo minie 100 lat od obserwacji zaćmienia Słońca, które dostarczyło dowodu na poprawność ogólnej teorii względności opublikowanej w 1916 roku.*

### Trzy zjawiska

Ogólna teoria względności Einsteina (fot. 1) przewidywała trzy zjawiska, za pomocą których można przetestować jej przewidywania. Był to ruch peryhelium Merkurego, zakrzywienie trajektorii światła w pobliżu masy oraz grawitacyjne przesunięcie długości fali elektromagnetycznej w kierunku fal dłuższych – tj. ku czerwieni.



Fot. 1. Ruch Merkurego w peryhelium

(źródło: [https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=gUaAXs8L&id=8DEE8B9897EC60D903C26C993F72C976C9DBDF04&thid=OIP.gUaAXs8Lzc-DBrRaqfG1CwHaG2&mediaurl=https%3a%2f%2fblogs-images.forbes.com%2fstartswithabang%2ffiles%2f2015%2f11%2f2000px-Perihelion\\_precession.svg\\_-1200x1109.png&exph=1109&expw=1200&q=mercury+perihelion+motion&simid=608047245464044453&selectedIndex=1&ajaxhist=0](https://www.bing.com/images/search?view=detailV2&ccid=gUaAXs8L&id=8DEE8B9897EC60D903C26C993F72C976C9DBDF04&thid=OIP.gUaAXs8Lzc-DBrRaqfG1CwHaG2&mediaurl=https%3a%2f%2fblogs-images.forbes.com%2fstartswithabang%2ffiles%2f2015%2f11%2f2000px-Perihelion_precession.svg_-1200x1109.png&exph=1109&expw=1200&q=mercury+perihelion+motion&simid=608047245464044453&selectedIndex=1&ajaxhist=0))

W połowie XIX wieku astronom francuski Urbain Le Verrier bardzo dokładnie obliczył parametry orbity Merkurego wokół Słońca. Wziął pod uwagę przyciąganie newtonowskie między Merkurym a Słońcem i wszystkimi znanymi wówczas planetami: Wenus, Ziemią, Marsem, Jowiszem, Saturnem, Uranem, Neptunem. To, że peryhelium Merkurego (tj. położenie najbliższe Słońca) przesunęło się, nie było w obliczeniach w ramach teorii grawitacji Newtona zaskoczeniem. Jednak te obliczenia nie zgadzały się z obserwacją o niewielką, ale tajemniczą wartość 43 sekund kątowych. Próbowano się z tym uporać na różne sposoby. Najbardziej spektakularne było poszukiwanie pomiędzy Merkurym a Słońcem jeszcze jednej planety, której nawet przedwcześnie nadano nazwę Wulkan. Dopiero obliczenia w ramach ogólnej teorii względności wytłumaczyły ten tajemniczy przyczynek z bardzo dobrą dokładnością do jednej setnej sekundy kątowej. Był to najwcześniejszy przypadek rozwiązania zaobserwowanego problemu fizycznego przy wykorzystaniu ogólnej teorii względności.

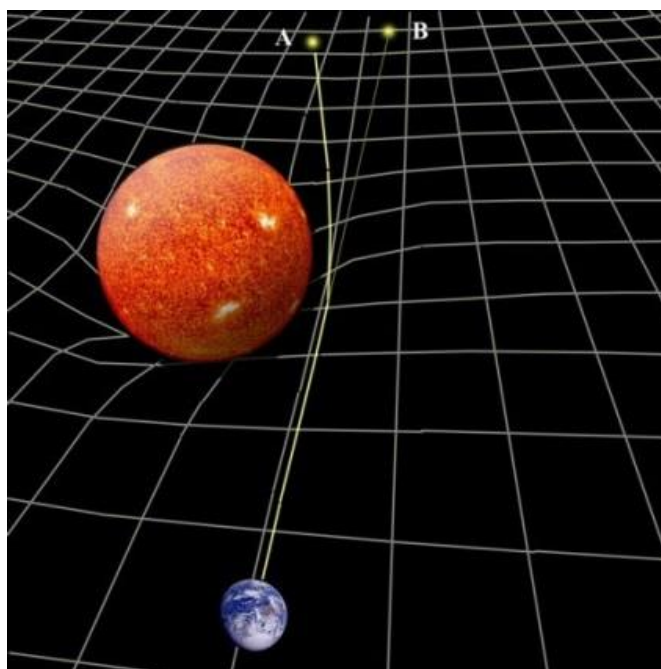
Drugim zjawiskiem było odchylenie promienia świetlnego od linii prostej w pobliżu Słońca. Można to było zmierzyć w czasie zaćmienia naszej najbliższej gwiazdy przez Księżyc – należało wykonać fotografie Słońca na tle gwiazd w czasie zaćmienia. Dla porównania, wcześniej lub później trzeba było z tego samego miejsca sfotografować ten sam obszar nieba, co w czasie zaćmienia. To zdjęcie musiało być wykonane oczywiście w nocy, kiedy gwiazdy są widoczne na swoich miejscach, w pozycjach niezaburzonych z powodu obecności Słońca. Wynik doświadczenia to różnica położenia każdej z widocznych gwiazd w obu sytuacjach. Gwiazdy daleko od Słońca nie powinny doświadczać widocznego odchylenia. Gwiazdy w pobliżu Słońca pozornie oddalają się od niego, tym bardziej, im bliżej tarczy słonecznej się znajdują.

Ogólnie uznawane doświadczalne dowody na istnienie trzeciego zjawiska – grawitacyjnego przesunięcia ku czerwieni znaleziono dopiero na przełomie lat 50. i 60. XX wieku. Warto podkreślić, że nie były to obserwacje astronomiczne, ale eksperyment wykonany w laboratorium.

### **Einstein potrzebował jeszcze trochę czasu**

W 1911 roku Einstein wyliczył, że promień świetlny przebiegający w pobliżu Słońca powinien się odchylić o 0,875 sekundy łuku. Środowisko naukowe chciało ten wynik sprawdzić. W 1912 roku z Argentyny do Brazylii wyruszyła ekspedycja, by obserwować zaćmienie Słońca. Mieli między innymi zająć się obserwacją sprawdzającą to przewidywanie Einsteina. Jednak zła pogoda zniweczyła te plany. Następne zaćmienie Słońca było 21 sierpnia 1914 roku na Krymie. Kilka ekspedycji tam się wybierało, jednak wybuch I wojny światowej pokrzyżował plany badaczom. Część astronomów Rosjanie zawrócili do domu, innych internowali, a ekwipunek skonfiskowali. Nie trzeba już właściwie dodawać, że pogoda do obserwacji nie dopisała. Może i dobrze się stało, bo war-

tość 0,875 sekundy kątovej nie była ostatecznie wartością poprawną. W istocie było to odchylenie wyznaczone zgodnie z teorią Newtona dla cząstki poruszającej się z prędkością światła. Trzeba dodać, że takie odchylenie zostało już obliczone w przeszłości przez Henry'ego Cavendisha w 1784 roku i przez Johanna von Soldnera w 1803 roku. Einstein potrzebował jeszcze trochę czasu. W 1915 roku skończył pracę nad tworzeniem ogólnej teorii względności i w roku następnym ukazała się ona drukiem. Wartość odchylenia światła w pobliżu Słońca wyznaczona z uwzględnieniem grawitacyjnego zakrzywienia przestrzeni (rys. 2) wynosiła 1,75 sekundy łuku. Nowa, dwukrotnie większa wartość takiego niewielkiego efektu zwiększyła szanse jego zmierzenia.



Fot. 2. Zakrzywienie przestrzeni, rys. Johnstone

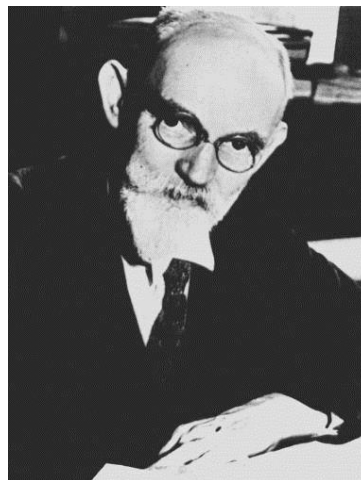
(źródło: [http://www.astro-photography.net/images/figure%20%20relativity\\_light\\_bending.jpg](http://www.astro-photography.net/images/figure%20%20relativity_light_bending.jpg))

### **Entuzjasta ogólnej teorii względności**

Pamiętajmy, że trwała I wojna światowa. Einstein pracował nad ogólną teorią względności w Berlinie. Jej najgorętszy orędownik Arthur Stanley Eddington (1882–1944) (fot. 3), astronom – w Anglii w Cambridge. Oba państwa dzieliło nie tylko Morze Północne, ale i linia frontu. Eddington otrzymywał materiały na temat ogólnej teorii względności od obywatela kraju neutralnego w tej wojnie, Holendra, Willema de Sittera (fot. 4).

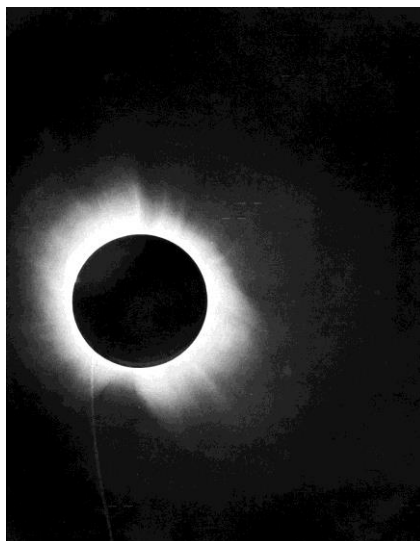


Fot. 3. Arthur Stanley Eddington (1882–1944)  
(źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Arthur\\_Stanley\\_Eddington#/media/File:Arthur\\_Stanley\\_Eddington.jpg](https://pl.wikipedia.org/wiki/Arthur_Stanley_Eddington#/media/File:Arthur_Stanley_Eddington.jpg))



Fot. 4. Willem de Sitter (1872–1934)  
(źródło: <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DeSitter.jpg>)

Królewski Astronom Sir Frank Watson Dyson zaproponował pomiary odchylenia promienia światelnego w pobliżu Słońca, w czasie zaćmienia Słońca 29 maja 1919 roku (fot. 5), kiedy to nasza gwiazda będzie na tle Hyadów, gromady otwartej w gwiazdozbiore Byka. Wybrał też nie jedno, ale dwa miejsca obserwacji.



Fot. 5. Zaćmienie Słońca w 1919 roku  
(źródło: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1919\\_eclipse\\_positive.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1919_eclipse_positive.jpg))

Eddington wygłaszał wykłady dla różnych gremiów na temat nowej teorii grawitacji, a w roku 1923 wydał książkę *Matematyczna teoria względności*. Einstein niebywale cenił tego entuzjastę swojej teorii, a wymienioną publikację uważał za najlepszą prezentację ogólnej teorii względności.

W 1917 roku rozpoczęto przygotowania do wypraw, które w czasie zaćmienia Słońca miały zmierzyć zjawisko ugięcia promienia świetlnego przez Słońce. Wojna trwała, Eddington, nawet jako pacyfista – z wyznania kwakier, mógł zostać zmobilizowany. Dzięki wstawiennictwu Królewskiego Astronoma, Franka Dysona i wysoko postawionych profesorów z Cambridge, po długich pertraktacjach w Home Office, Eddington w lipcu 1918 roku ostatecznie uniknął wcielenia do wojska.

Rząd przeznaczył na instrumenty astronomiczne 100 funtów szterlingów i 1000 funtów szterlingów na podróż wraz z resztą kosztów. Skompletowanie koniecznego wyposażenia przedstawiało problem. Specjaliści od wykonywania instrumentów naukowych albo walczyli na froncie, albo byli zaangażowani w pracę na rzecz wojska. Praktycznie do zawieszenia broni w listopadzie 1918 roku nie mogli oni zająć się pracą na potrzeby ekspedycji. A już w lutym 1919 roku należało wyruszyć w drogę.

Zaledwie cztery miesiące po zakończeniu działań wojennych dwie angielskie drużyny astronomów wyruszyły w świat. Pierwsza pod przewodnictwem samego Eddingtona na wyspę Principe w Gwinei Równikowej w Afryce oraz druga wyprawa na czele z Andrew Crommelinem, astronomem z Greenwich, do brazylijskiego miasta Sobral.

### **Ekscytujące oczekiwanie**

Wynik planowanych obserwacji wcale nie był oczywisty. Mogło się zdarzyć różnie. Po pierwsze pogoda mogłaby zawieść wszystkich i trzeba by wtedy czekać na kolejne zaćmienie i organizować nowe wyprawy dla sprawdzenia wyników Einsteina. Mogli też podróżnicy – astronomowie nie wykryć żadnego odchylenia pozycji gwiazd w tle, mimo obecności Słońca. To nie zgadzałoby się ani z teorią Newtona, ani Einsteina. Mogli też na przykład otrzymać wynik z teorii newtonowskiej 0,875 sekundy łuku. Byłoby to miażdżące dla ogólnej teorii względności i samego Einsteina. W końcu mogli potwierdzić teorię Einsteina, czyli 1,75 sekundy łuku. To z kolei zdetrionizowałoby królującą od ponad dwustu lat teorię grawitacji Newtona. Środowisko naukowe czekało więc w napięciu na zaćmienie.

W dniu zaćmienia na wyspie Principe rano przeszła burza. Wydawało się, że pogoda nie pozwoli na jakikolwiek pomiar. Ale niespodziewanie około południa deszcz przestał padać, a półtorej godziny później Słońce zaczęło się wychylać zza chmur. Wykonano 16 fotografii. Z nich tylko dwie okazały się użyteczne. Do Londynu Eddington wysłał telegram „PRZEZ CHUMURY. OPTYMISTYCZNIE”.

W Sobral pogoda była lepsza. Zaćmienie nastąpiło tam rano. Wysłano telegram do Londynu: „ZACMIENIE DOSKONAŁE”. Jednakże nie obyło się bez problemów. 11 zdjęć zrobionych przy użyciu lunety, na której polegano najbardziej, okazało się nieostrych. Instrument stracił ogniskowanie z powodu ogrzania przez Słońce. Na szczęście, za pomocą rezerwowego, mniejszego teleskopu udało się wykonać 8 fotografii, z przynajmniej siedmioma gwiazdami na każdym zdjęciu.

Jak wspominałam na początku, sam efekt był bardzo subtelny. Niebagatelny wpływ na niego mogło mieć rozszerzanie się i kurczenie płytek fotograficznych na skutek zmian temperatury powietrza, gdyż w czasie samego zaćmienia zrobiło się wyraźnie chłodniej. Co więcej, emulsja fotograficzna mogła nie być idealnie jednorodna. Płytki fotograficzne mogły być eksponowane w innych warunkach w czasie zaćmienia i w czasie fotografowania tego samego obszaru nieba bez Słońca. Warunki, w których dochodzi do załamania światła w atmosferze ziemskiej mogły także ulegać zmianie w czasie zaćmienia. Takie nakładające się na siebie zaburzenia mogły zniweczyć wysiłek astronomów.

Eddington wykonał pierwsze obliczenia jeszcze na miejscu obserwacji. Już 3 czerwca, jak pisał w swoim notatniku, jedna fotografia z zaćmienia, którą opracował, dała rezultat zgodny z przewidywaniami Einsteina.

### Potwierdzenie

Eddington przyjął na siebie główny ciężar opracowania danych pomiarowych. Rezultaty z obu wypraw przedstawiono w Royal Society of London w dniu 6 listopada 1919 roku. Zebranie prowadził J.J. Thomson – odkrywca elektronu. Przemawiali: Dyson, Crommelin i Eddington. Odchylenie promienia świetlnego w pobliżu Słońca wyniosło ze zdjęć w Sobral  $1,98 \pm 0,16$  sekundy łuku, a ze zdjęć w Principe  $1,61 \pm 0,40$  sekundy łuku. Zatem potwierdzały nową teorię grawitacji.

Sam Einstein o wynikach dowiedział się wcześniej, już pod koniec września 1919 roku i dla niego nie było wątpliwości, że potwierdzają jego teorię.

Einstein skomentował podniecenie i nerwowe oczekiwanie Maxa Plancka na wyniki ekspedycji. Geniusz z poczuciem humoru pisał, że gdyby Planck rozumiał nową teorię grawitacji, to spokojnie poszedłby spać w czasie zaćmienia Słońca 29 maja 1919 roku, tak jak zrobił to sam Einstein.

Na wspomnianym zebraniu 6 listopada 1919 roku był również obecny Ludwik Silberstein, znawca i autor podręczników ogólnej teorii względności, rodem z Polski. Wówczas, na posiedzeniu w Royal Society, zwrócił się on do Eddingtona żartując, że tylko trzech ludzi rozumie teorię grawitacji Einsteina. W domyśle, pierwszym miał być jej twórca, drugim Silberstein. Gdy Eddington przez chwilę nic na to nie odpowiedział, Silberstein zachęcił go do odpowiedzi, mówiąc, by nie był tak nieśmiały. Na to Anglik celnie zaripostował: „Ah, nie!

Ja się zastanawiałem, kim mógłby być ten trzeci”. Oczywiście miał na myśli siebie, jako tego drugiego.

### **Od niedowierzania po pewność**

Nie można potępiać tych, którzy podchodzili ostrożnie, a nawet sceptycznie do tych wyników. Warto zwrócić uwagę, że wykonano również obliczenia ze zdjęć z większego teleskopu z Sobral, które były nieostre i otrzymano wartość szukanego kąta 0,93 sekundy łuku. Była to wielkość wyraźnie bliższa wynikowi z teorii Newtona niż Einsteina. Eddington odrzucił jednak te wartości z powodu braku ostrości zdjęć. Co więcej, niektórzy naukowcy mieli wątpliwości czy Eddington, wielki entuzjasta ogólnej teorii względności, na pewno pozostał wierny najlepszym standardom opracowania danych. Sprawdzenia obliczeń Eddingtona wykonywano wielokrotnie przez lata, za pomocą coraz to lepszej techniki obliczeniowej. Okazało się, że wyniki Eddingtona obroniły się mimo upływu lat.

Drugi raz mierzono odchylenie promienia świetlnego przechodzącego w pobliżu Słońca w 1922 roku w czasie zaćmienia Słońca w Australii. Potem wielokrotnie jeszcze powracano do tej metody aż do lat 50. XX stulecia. Z powodu zaburzeń w trakcie przechodzenia światła przez atmosferę ziemską nie udało się istotnie zmniejszyć niepewności takich wyników. Potem uzyskano zwiększenie dokładności dzięki pomiarom interferencji fal radiowych.

Dziś zjawisko zakrzywienia promienia świetlnego w pobliżu dużej masy mierzy się z imponującymi dokładnościami. Wielką popularność zdobyła sobie metoda tzw. mikrosoczewkowania grawitacyjnego, której prekursorem był zmarły przedwcześnie polski astronom Bohdan Paczyński (1940–2007). Pomiaru takie dostarczają wiedzy o budowie galaktyk, pomagają szukać niewidocznej materii, czarnych dziur, czy dostarczają informacji o fluktuacjach w promieniowaniu reliktowym.

Warto dodać, że na temat omówionego w tym artykule doświadczenia nakręcono film *Einstein and Eddington* (2008).