Co to jest teoria względności?

Dr Andrzej KRASIŃSKI

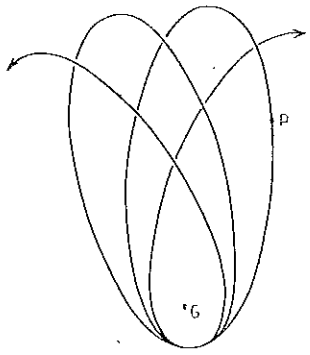
TESTY DOŚWIADCZALNE

Jeśli nowa teoria fizyczna ma zastąpić starą, musi spełniać trzy podstawowe warunki:

1. Wszystkie fakty eksperymentalne dobrze wyjaśnione przez starą teorię nowa teoria musi wyjaśniać co najmniej równie dobrze (tzn. z nie mniejszą dokładnością).
2. Nowa teoria musi wytłumaczyć, dlaczego stara dobrze nadawała się do opisu podlegających jej zjawisk.
3. Nowa teoria musi dobrze opisywać coś, czego stara teoria opisać nie potrafiła, albo co opisywała w sposób niezgodny z wynikami eksperymentu.

Bez spełnienia pierwszego warunku nowa teoria będzie uboższa od starej i nikt nie zechce zaprzątać sobie głowy uczeniem się jej. Bez spełnienia drugiego warunku, przy spełnionym pierwszym, nowa teoria jest zaledwie nowym podejściem do starych zagadnień, i jej wyższość jest bardzo problematyczna (zwłaszcza w przypadku, gdy stara teoria potrafi objaśnić nową — wtedy nowa jest tylko zabawką teoretyków). Dopiero spełnienie trzeciego warunku ukazuje istotną wyższość nowej teorii nad starą.

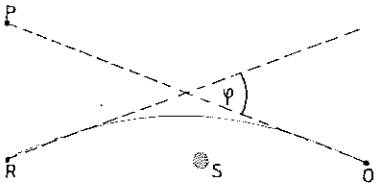
Z punktem pierwszym i drugim (zwanymi razem zasadą korespondencji) teoria względności nie miała większych kłopotów. Nowe, nieznane mechanice newtonowskiej efekty występują przy bardzo dużych prędkościach ruchu, w bardzo silnych polach grawitacyjnych i w wielkich obszarach Wszechświata. Ponieważ obiekty astronomiczne poruszają się na ogół (w porównaniu z prędkością światła) powoli, badane przez ludzi pola grawitacyjne Słońca i planet są słabe, zaś wszelkie dane obserwacyjne dotyczące wielkich obszarów są tak niedokładne, że dopuszczają znaczną dowolność interpretacji — teoria Newtona mogła skutecznie wyjaśniać bardzo wiele zjawisk astronomicznych w sposób ilościowo nieznacznie różniący się od opisu teorii względności. Natomiast punkt trzeci był kłopotliwy. Wyjaśnienie ruchu perihelium Merkurego oraz przepowiedzenie ugięcia promieni świetlnych w polu grawitacyjnym przed doświadczalnym wykryciem tego efektu były wielkimi osiągnięciami nowej teorii, lecz zaledwie dwa nowe, niewątpliwie potwierdzone doświadczalnie efekty — to było trochę za mało, aby odrzucić teorię Newtona, wspaniale rozwiniętą w ciągu 200 lat jej istnienia, prostą rachunkowo i pojęciowo i mającą na swym koncie niezliczoną ilość trafnie przepowiedzianych efektów. Dlatego przez ponad 50 lat teoria względności zdobywała sobie entuzjastów głównie dzięki swojej elegancji matematycznej, precyzyjnej, pięknej strukturze dedukcyjnej oraz dzięki pobudzającym wyobraźnię i fantazję, zaskakującym wnioskom z prostych obserwacji. Dopiero w ostatnich latach sytuacja ta zaczęła się zmieniać. Pięćdziesięciu lat potrzebowała technika na osiągnięcie takiego poziomu, aby odstępstwa teorii względności od teorii Newtona były możliwe do zmierzenia w większej ilości przypadków. Omówimy, w kolejności chronologicznej, najważniejsze i najciekawsze doświadczenia z tej serii.



Rys. 1. Według teorii Einsteina planeta porusza się wokół gwiazdy po krzywej rozetkowej nawet wtedy, gdy jest jedyną planetą tej gwiazdy.

RUCH PERIHELIUM MERKUREGO

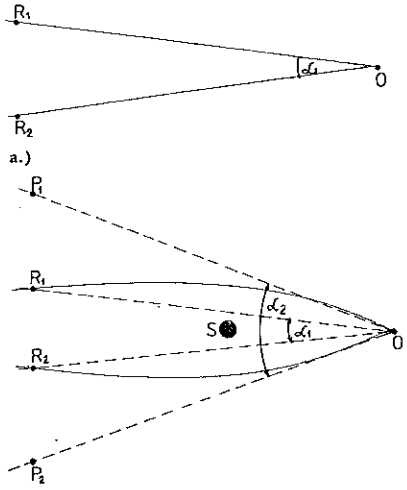
Pokazaliśmy już w poprzednim artykule, jak tłumaczyła ten efekt teoria Newtona i na jaki kłopot przy tym natrafiła. W myśl równań teorii względności, nawet gdyby Słońce miało tylko jedną planetę, jej tor nie byłby elipsą, lecz krzywą „rozetkową", zaś zaburzenia grawitacyjne wywołane przez inne planety jedynie powiększają obrót perihelium. Różnica obrotu zmierzonego i obliczonej sumy zaburzeń orbity Merkurego przez inne planety wynosiła, jak pamiętamy, $(43{,}11 \pm 0{,}45)''$ na stulecie. „Naturalny" obrót perihelium Merkurego, nie wywołany przez zaburzenia, miał wynosić $43{,}03''$ na stulecie. Widać, że pierwszy historycznie test teorii Einsteina wypadł niespodziewanie dobrze.



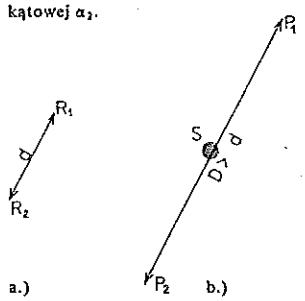
Rys. 2. Ugięcie promienia świetlnego w polu grawitacyjnym Słońca. R — rzeczywiste położenie gwiazdy, P — położenie pozorne rejestrowane na fotografii przez obserwatora O, φ — kąt ugięcia promienia, znacznie przesadzony.

UGIĘCIE PROMIENI ŚWIETLNYCH W POLU GRAWITACYJNYM

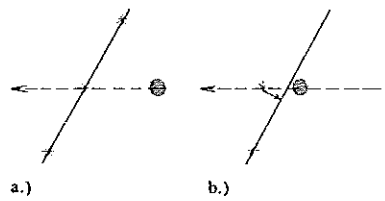
W czasach, gdy powstawała ogólna teoria względności, jedyną okazję zaobserwowania tego efektu dawały całkowite zaćmienia Słońca. Ugięcie było bowiem wystarczająco duże tylko dla promieni biegnących blisko Słońca, a to oznaczało, że trzeba rejestrować obrazy gwiazd znajdujących się w małej odległości kątowej od Słońca.



Rys. 3. Zasada pomiaru kąta ugięcia. a) Gdy gwiazdy są widoczne na niebie z dala od Słońca, ich położenia obserwowane zgadzają się z rzeczywistymi R_1 i R_2; kąt między kierunkami obserwowanych położeń wynosi α_1. b) Gdy gwiazdy są widoczne w pobliżu Słońca, ich położenia pozorne P_1 i P_2 znajdują się w większej odległości kątowej α_2.



Rys. 4. a) Położenia gwiazd R_1 i R_2 na fotografii w sytuacji odpowiadającej rysunkowi 3a. b) Położenia gwiazd R_1 i R_2 na fotografii w sytuacji z rysunku 3b.



Rys. 5. Zasada pomiaru radiointerferometrycznego: a) Słońce z dala od trójki radioźródeł, ich obrazy leżą na jednej prostej, b) Słońce zbliżyło się do środkowego radioźródła, jego obserwowane położenie odchyla się od prostej łączącej dwa pozostałe obrazy.

Pomiar polegał na sfotografowaniu dwu wybranych gwiazd w chwili, gdy znajdowały się na niebie blisko tarczy słonecznej, sfotografowaniu tych samych dwu gwiazd w kilka miesięcy później, gdy były widoczne na tle nieba nocnego, i porównaniu ich względnych położeń na obu zdjęciach. Był to z wielu powodów trudny eksperyment. Nie zawsze w czasie zaćmień widać dostatecznie jasne gwiazdy leżące wystarczająco blisko Słońca. Przechowywane przez kilka miesięcy materiały fotograficzne deformują się pod wpływem wilgoci i ciepła, każda klisza w swój indywidualny sposób, nawet jeśli wszystkie pochodzą z tej samej serii produkcyjnej. Powiększa to błędy pomiarowe. Jeśli dodać do tego fakt, że całkowite zaćmienia Słońca mają dziwne upodobanie do występowania pośrodku oceanów, dżungli lub pustyń i rzadko zdarzają się w pobliżu dobrze wyposażonych obserwatoriów, sytuacja będzie jasna.

Dziś używa się do tego pomiaru radioteleskopów interferometrycznych, które potrafią wyznaczyć położenia źródeł fal radiowych z wielką dokładnością. Słońce jest dość słabym źródłem fal radiowych, dzięki czemu można śledzić „radiogwiazdy" nawet w małych odległościach kątowych od Słońca. Natura dostarczyła też astronomom bardzo dogodnej konfiguracji trzech radioźródeł (są one oznaczone symbolami 0111+02, 0116+08 i 0119+11). Leżą one niemal dokładnie na jednej linii prostej, prawie prostopadłej do toru Słońca na niebie, przy czym środkowe z nich jest codziennie przez około 4 tygodnie na przełomie marca i kwietnia każdego roku całkowicie przysłaniane przez Słońce. W czasie „zaćmienia" dwa pozostałe radioźródła, położone z dala od Słońca, a więc nie ulegające pozornemu przemieszczeniu na skutek ugięcia fal radiowych, mogą służyć do wyznaczania rzeczywistego położenia trzeciego źródła, dla porównania go z aktualnie obserwowanym położeniem pozornym. Odpadają więc kłopoty z wyprawami do dżungli i długim przechowywaniem nietrwałych materiałów.

Przewidywane przez teorię Einsteina ugięcie promienia świetlnego na samej krawędzi tarczy słonecznej wynosiło 1,749 sekundy kątowej. Pomiar, wykonany w r. 1974 i 1975 przez E. Fomalonta i R. Sramka w Narodowym Obserwatorium Radio-Astronomicznym w Green Bank (West Virginia, USA), dał wynik (1,761±0,016)".

GRAWITACYJNE PRZESUNIĘCIE KU CZERWIENI

Jest to efekt, który można łatwo wytłumaczyć posługując się analogią między siłami grawitacyjnymi i siłami bezwładności. Obserwator, poruszający się ruchem przyspieszonym wzdłuż kierunku biegu promienia świetlnego, zaobserwuje wydłużenie się fal świetlnych, czyli „poczerwienienie" światła, gdyż w jednostce czasu będzie go mijało mniej fal, niż wtedy, gdy spoczywał. Podobnie, światło wydobywające się z pola grawitacyjnego ulega „poczerwienieniu". Wykrycie poczerwienienia linii widmowych gwiazd oraz dwie obserwacje omówione powyżej były nazywane niekiedy „trzema klasycznymi testami teorii względności". Cywilizowani ludzie XX wieku są wciąż bardzo przywiązani do magicznych i symbolicznych liczb, i dlatego zręczniej było mówić o trzech testach, niż dwóch czy czterech, choć każdą z tych liczb można by uznać za trafną przy odpowiednio liberalnych kryteriach (niestety, następna liczba magiczna: siedem, była całkiem nieosiągalna). Grawitacyjne poczerwienienie światła jest bowiem niemal niemożliwe do zaobserwowania metodami astronomicznymi. Światło jest emitowane z powierzchni gwiazd przez materię, wykonującą szybkie, burzliwe ruchy, a więc na poczerwienienie grawitacyjne nakładają się efekty Dopplera związane z ruchem źródła światła. Ponadto, podobny skutek wywołuje przejście światła przez materię międzygwiezdną, której ilości i rozmieszczenie nie są dokładnie znane. Dlatego pierwsze wiarygodne wyniki dał dopiero eksperyment przeprowadzony w roku 1965 przez E. Pounda i F. Snidera metodami laboratoryjnymi w ziemskim polu grawitacyjnym. Okazało się, że zgodnie z przewidywaniami teorii Einsteina zmiana częstotliwości fali świetlnej $\Delta\nu$ wynosi:

$$\Delta\nu = \frac{gh}{c^2}\nu,$$

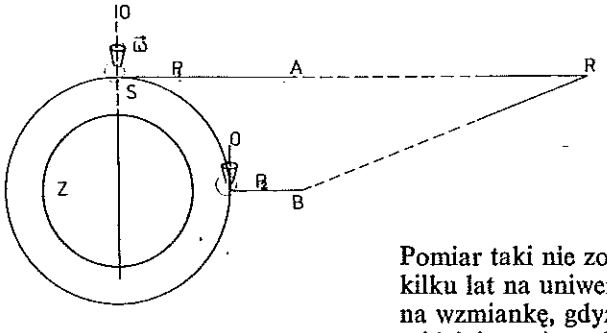
gdzie g — natężenie pola grawitacyjnego, c — prędkość światła, h — różnica wysokości między źródłem a odbiornikiem światła, ν — częstotliwość fali wysłanej.

ROZSZERZANIE SIĘ WSZECHŚWIATA

Efekt ten, omówiony w Delcie przez B. Kuchowicza w serii artykułów o kosmologii, bywa podawany jako jeden z dowodów („czwarty klasyczny", jeśli ktoś chce) ogólnej teorii względności. Rzeczywiście, wyjaśniono go teoretycznie najpierw przy pomocy teorii względności, lecz mimo to nie jest on jej potwierdzeniem eksperymentalnym ponieważ jest możliwy do opisania również w teorii Newtona.

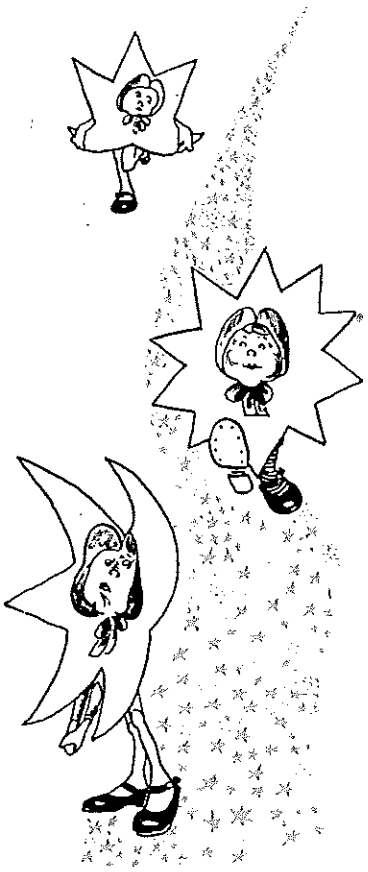
PRECESJA ŻYROSKOPU NA ORBICIE WOKÓŁ ZIEMI

Żyroskopem nazywamy swobodnie wirujące ciało, zawieszone lub podparte w swoim środku masy, a więc takie, na które nie działają żadne momenty sił. Teoria Einsteina przewiduje, że jeśli umieścimy żyroskop na orbicie wokół Ziemi, to jego oś obrotu powinna wykonywać kolisty ruch po powierzchni stożka zwany precesją. W przypadku orbity przebiegającej nad biegunami Ziemi (prostopadłej do płaszczyzny Równika) precesja będzie miała dwie składowe prostopadłe: jedną związaną z ruchem żyroskopu po orbicie, równą 6,9 sekundy łuku na rok, i drugą związaną z ruchem obrotowym Ziemi, równą 0,05 sekundy łuku na rok.



Rys. 6. Zasada pomiaru precesji żyroskopu. Z — Ziemia, S — satelita, ω — wektor prędkości kątowej żyroskopu, R — gwiazda używana jako punkt odniesienia, O — oś, wokół której żyroskop wykonuje precesję. W rzeczywistości gwiazda R znajduje się tak daleko od Ziemi, że prosta P_1A jest równoległa (w granicach błędu pomiarowego) do prostej P_2B.

Pomiar taki nie został jeszcze wykonany, przygotowania do niego trwają od kilku lat na uniwersytecie w Stanford (USA). Mimo to, eksperyment ten zasługuje na wzmiankę, gdyż jest wyjątkowo pięknym przykładem obustronnie twórczego oddziaływania techniki z nauką. Niestety, zbyt często oddziaływanie to jest rozumiane w sposób wulgarnie dosłowny, gdy np. głosi się publicznie, że jedynym sensem nauki i jedynym zadaniem ludzi nauki jest udzielanie natychmiastowych skutecznych odpowiedzi na problemy zawodowe inżynierów i dyrektorów fabryk. W tym ujęciu nauka (o ile można to zajęcie nazwać nauką) spełnia rolę służebną wobec techniki, zamyka się w ciasnych ramach codzienności i nigdy nie przyniesie wielkich odkryć, ani poznawczych, ani technicznych. Technika zaś, przez nikogo nie prowokowana do twórczych poszukiwań, wpada w tej sytuacji w zastój. W naszym problemie żyroskopu mamy przykład tego, jak wysokie wymagania eksperymentu naukowego stają się wyzwaniem dla ambitnych inżynierów i pobudzają ich do pracy, która w efekcie ubocznym przynosi nowe urządzenia dla „ziemskiej" techniki i nowe problemy dla innych dziedzin nauki. Kierunkiem, względem którego mierzy się precesję, jest oś teleskopu, elektronicznie sterowanego tak, aby cały czas śledził jedną, wybraną gwiazdę. Aby wykryć tak powolną precesję, pomiar musi trwać co najmniej kilka miesięcy, i przez cały czas żyroskop musi swobodnie wirować. Żadne zawieszenie mechaniczne nie może zapewnić dostatecznie małego tarcia. Zawieszenia elektrostatyczne lub magnetyczne indukują prądy wirowe w obracającym się ciele, które hamują obrót jeszcze skuteczniej niż tarcie. Postanowiono więc ochłodzić całe urządzenie do temperatury ciekłego helu (−271°C), aby móc skorzystać z nadprzewodzącego ekranu, eliminującego zewnętrzne zakłócenia magnetyczne i związane z nimi prądy wirowe, oraz z nadprzewodzących czujników do rejestrowania położenia żyroskopu. Jeśli teraz uzmysłowimy sobie, że termostat utrzymujący taką temperaturę, urządzenia elektroniczne do sterowania teleskopem i odczytu wyników pomiaru, nadprzewodzące czujniki, komputer i nadajnik radiowy do przetwarzania i przekazywania na Ziemię rezultatów, oraz urządzenia napędowe i paliwo mają być wszystkie razem pomieszczone w niewielkim satelicie kształtu walca o wymiarach 1,80 × 1,60 m, stanie się jasne, jak wielkie wymagania techniczne stawia opisywany eksperyment.



Poprzestańmy na tych przykładach, bowiem omówienie wszystkich, zrobionych i planowanych, testów eksperymentalnych teorii względności wymagałoby znacznie dłuższego artykułu. Przyjmijmy, że wiemy już, czym jest teoria względności i spróbujmy na zakończenie odpowiedzieć:

CZYM BĘDZIE TEORIA WZGLĘDNOŚCI?

Rozwiązanie zadania M 160

Każdy podział niepustego zbioru A wyznacza w tym zbiorze relację równoważności $\sim$: $x \sim y \Leftrightarrow x$ i y *należą do tego samego podzbioru* A_i.

Wszystkich relacji określonych w zbiorze n-elementowym jest 2^{n^2}, gdyż par uporządkowanych (x, y), gdzie $x \in A$, $y \in A$, jest n^2, a relacja jest określona, gdy dla każdej takiej pary wiemy, czy x jest w tej relacji z y, czy też nie. Relacja może być więc utożsamiona z podzbiorem zbioru par, a podzbiorów takich jest 2^{n^2}. Ponieważ niektóre tylko relacje są relacjami równoważności, więc liczba podziałów zbioru n-elementowego nie przekracza 2^{n^2}.

Rozwiązanie zadania M 161

Wprowadźmy w płaszczyźnie kwadratu taki układ współrzędnych, by $A = (1, 1)$, $B = (-1, 1)$, $C = (-1, -1)$ i $D = (1, -1)$. Dowolny punkt okręgu ma wtedy współrzędne $(\cos\alpha, \sin\alpha)$, gdzie α jest pewną liczbą z przedziału $[0, 2\pi]$.

Mamy $a^2 = (1-\cos\alpha)^2 + (1-\sin\alpha)^2$,

$b^2 = (1+\cos\alpha)^2 + (1-\sin\alpha)^2$,

$c^2 = (1+\cos\alpha)^2 + (1+\sin\alpha)^2$,

$d^2 = (1-\cos\alpha)^2 + (1+\sin\alpha)^2$.

Stąd $a^2c^2 + b^2d^2 = 2(1-\cos^2\alpha)^2 + 2(1-\sin^2\alpha)^2 + (1-\cos\alpha+\sin\alpha-\cos\alpha\sin\alpha)^2 + (1+\cos\alpha-\sin\alpha-\cos\alpha\sin\alpha)^2 + (1+\cos\alpha+\sin\alpha+\cos\alpha\sin\alpha)^2 + (1-\cos\alpha-\sin\alpha+\cos\alpha\sin\alpha)^2$.

Uwzględniając równości $\cos^2\alpha + \sin^2\alpha = 1$ oraz $x^2 + y^2 = \frac{1}{2}(x+y)^2 + \frac{1}{2}(x-y)^2$ otrzymujemy, że

$$a^2c^2 + b^2d^2 = 2\sin^4\alpha + 2\cos^4\alpha + \frac{1}{2}(2-2\cos\alpha\sin\alpha)^2 + \frac{1}{2}(2\cos\alpha-2\sin\alpha)^2 + \frac{1}{2}(2+2\cos\alpha\sin\alpha)^2 + \frac{1}{2}(2\cos\alpha+2\sin\alpha)^2 =$$

$$= 2(\sin^4\alpha + \cos^4\alpha + 1 - 2\cos\alpha\sin\alpha + \cos^2\alpha\sin^2\alpha + \cos^2\alpha - 2\cos\alpha\sin\alpha + \sin^2\alpha + 1 + 2\cos\alpha\sin\alpha + \cos^2\alpha\sin^2\alpha + \cos^2\alpha + 2\cos\alpha\sin\alpha + \sin^2\alpha) = 2[(\sin^2\alpha + \cos^2\alpha)^2 + 4] = 10, \text{ c.n.d.}$$

CZYM BĘDZIE TEORIA WZGLĘDNOŚCI?

Często przedstawia się teorię względności jako dyscyplinę skończoną, zamkniętą, w której nic więcej nie da się zrobić. Nic bardziej błędnego. Nadchodzi właśnie okres intensywnych testów eksperymentalnych i obserwacyjnych, które odpowiedzą na stare pytania i na pewno dostarczą nowych. Najbliższe lata mogą przynieść rozwiązanie problemu, czy istnieją fale grawitacyjne, tzn. impulsy pola grawitacyjnego oderwane od swoich źródeł i wędrujące samodzielnie przez przestrzeń międzygwiezdną. Mimo znacznego wysiłku koncepcyjnego, technicznego i finansowego włożonego w ten problem przez kilka dużych ośrodków naukowych w świecie, precyzja detektorów jest wciąż jeszcze niezadowalająca, zaś jej poprawienie wiąże się z kolejną serią problemów technicznych najwyższej trudności.

Obserwacje astronomiczne mogą potwierdzić istnienie (lub nieistnienie) czarnych dziur — umarłych gwiazd, które po wyczerpaniu zapasów energii zapadły się pod wpływem własnej grawitacji tak bardzo, że żadna materia ani nawet światło nie mogą wydostać się z ich powierzchni na zewnątrz. I fale grawitacyjne, i czarne dziury są tworami, których istnienie nie daje się opisać w teorii Newtona.

W związku z badaniami doświadczalnymi pozostaje inny, bardzo intensywny nurt działalności relatywistów: tworzenie nowych teorii grawitacji, różnych od teorii Einsteina. Są one tworzone nie po to, aby teorię Einsteina zastąpić (choć i ta możliwość nie jest wykluczona), lecz aby dostarczyć tła, na którym będzie można wyraźniej zobaczyć, co teoria Einsteina przewiduje i co jeszcze można by zmierzyć (przypomnijmy: gdy wszyscy wierzyli tylko w teorię Newtona, nikomu nie przyszło nawet do głowy, że światło może uginać się w polu grawitacyjnym).

Można też przypuszczać, że powstanie od dawna oczekiwana kwantowa teoria grawitacji, która pogodzi fizykę kwantową, słuszną w skali atomu i cząstek elementarnych, z teorią względności, operującą w skali gwiazd. Te dwie teorie opisują na razie rozłączne zbiory zjawisk i nikt nie zna sposobu na ich równoczesne zastosowanie, które jest konieczne np. dla opisu pierwszych chwil istnienia Wszechświata (patrz artykuł B. Kuchowicza w Delcie 10/1977).

Tyle można powiedzieć na podstawie prac już rozpoczętych. Przewidywania wybiegające dalej w przyszłość bywają zawsze niebezpieczne. Odkrycia, które dają się zaplanować, są z reguły mało odkrywcze, zaś przewidywacze zawsze okazywali się niedojrzałymi do przyszłości, którą usiłowali przewidzieć. Bardzo pouczającym przykładem jest tu wiersz J. W. Goethego „Zahme Xenien", napisany w odruchu protestu przeciwko doświadczeniom Newtona z rozszczepianiem światła:

Bracie! Wyjdźże z izby mroku,
Gdzie światło się w sztuki rwie
I w żałosnych skarg potoku
Błaznom w pokłon ciało gnie.
Zabobonu wielbicieli
Było w latach przeszłych dość,
W głowach twych nauczycieli
Niech trwa widm i złudzeń czczość.
Ty, w pogodny dzień, spojrzenie
Do błękitu nieba wznieś,
Patrz, jak słońce się czerwieni,
Gdy nadchodzi już dnia kres.
Wtedy, z okiem, sercem zdrowym,
Wesół, daj naturze cześć:
To o świetle jest tęczowym
Wspólna wszystkim wiedzy treść.

Goethe był nie tylko wybitnym poetą, lecz także, dzięki wszechstronnym zainteresowaniom i działalności, jednym z wielkich ludzi swojej epoki. Nie da się jednak ukryć, że wierszyk ten jest dziś dla niego kompromitujący. Historia przyznała rację Newtonowi, i to w sposób nie dający Goethemu żadnej szansy obrony. Zatem ... nie wystarczy być wielkim człowiekiem, aby trafnie przewidywać przyszły rozwój nauki. Mylili się co do tego nawet sami twórcy wielkich odkryć. Niech o tym pamiętają ci spośród czytelników Delty, którzy za kilka lub kilkanaście lat zajmą w hierarchii naukowej odpowiedzialne stanowiska i będą mogli mądrymi lub niemądrymi decyzjami dobrze lub źle wpływać na rozwój nauki w Polsce.