Artykuł recenzowany

TEORIA RELATY A NAWIGACJA

Satelitarne wyznaczanie pozycji nie tylko stanowi podstawę rozwoju nawigacji, ale daje również odpowiedź na odwieczne poszukiwania człowieka dotyczące czasu i przestrzeni. Nie wszyscy wiedzą jednak, że geodezja satelitarna nie może się obejść bez teorii względności Einsteina, a nawet stanowi jej doskonałe potwierdzenie.

ROBERT RYDZ,
GRZEGORZ STĘPIEŃ

NASZE POSTRZEGANIE ŚWIATA (NATURA CZASU I PRZESTRZENI)

Wytłumaczenie efektów relatywistycznych nastąpiło stosunkowo niedawno, bo na początku XX w. Nie ma w tym nic dziwnego, ponieważ w „normalnych" warunkach, z jakimi stykamy się codziennie, są one niezauważalne. Dopiero użycie precyzyjnych narzędzi pomiarowych do obserwacji zjawisk wokół ciał o dużej masie (gwiazdy, czarne dziury) czy też zjawisk zachodzących przy prędkościach zbliżonych do prędkości światła (zderzenia cząstek w akceleratorze) wystawia nasze „logiczne" myślenie na ciężką próbę. Postrzeganie świata fizycznego opieramy bowiem na wyciąganiu wniosków z prowadzonych przez nas obserwacji. A nie podróżujemy przecież samochodem z prędkościami zbliżonymi do prędkości światła ani nie udajemy się w pobliże masywnych gwiazd.

Kiedyś trudny do zrozumienia był fakt, że fala elektromagnetyczna (energia) niesie ze sobą barwę. Ale to możliwość rejestracji przez oko ludzkie różnych długości (częstotliwości) fali (światła) sprawia, że świat nie jest czarno-biały. Z kolei orbity eliptyczne (opisujące ruch planet wokół Słońca) były dla Keplera tylko hipotezą. W dodatku trudną do przyjęcia, ponieważ burzącą idealistyczno-religijne postrzeganie świata (elipsy były w oczywisty sposób mniej doskonałe niż koła). Jednak dopiero dokładne obserwacje ruchów Merkurego, w połączeniu z niezgodnością przewidywań Newtona, stanowiły jeden z najważniejszych dowodów słuszności teorii względności.

Czas i przestrzeń wydają się nie być ze sobą związane (chyba że utkniemy w korku ulicznym). Okazuje się jednak, że nie mogą być rozpatrywane osobno, co – jak pokażemy poniżej – ma niebagatelne znaczenie w satelitarnym wyznaczaniu pozycji. Einstein wytłumaczył ten fakt w ogłoszonej w 1905 r. szczególnej teorii względności (STW), a następnie 10 lat później – ogólnej teorii względności (OTW). Stephen Hawking, obecnie jeden z najwybitniejszych fizyków teoretycznych i profesor matematyki w Cambridge, podał, iż bez uwzględnienia efektów relatywistycznych wyznaczając satelitarnie np. pozycję statku, otrzymalibyśmy wynik różny od prawdziwego o... kilka mil!

DOŚWIADCZENIE MICHELSONA-MORLEYA

Do najważniejszych eksperymentów fizycznych należy doświadczenie przeprowadzone w 1887 r. przez Alberta A. Michelsona i Edwarda Morleya. W XIX wieku zakładano, że fale rozprzestrzeniają się tylko w ośrodkach sprężystych. Aby światło (będące falą) mogło się swobodnie rozchodzić, wymyślono nieruchomy ośrodek, który wypełnia całą przestrzeń, i nazwano go eterem. Pomysł Michelsona polegał na pomiarze prędkości światła, a raczej różnic obserwowanej prędkości, w zależności od kierunku obserwacji. Opierał się na teorii Galileusza, który doszedł do wniosku, że prędkość i pozycja ciał w ruchu jest względna. Posłużymy się tutaj prostym przykładem. Gdy jadąc pociągiem, idziemy w kierunku lokomotywy (czyli zgodnie z kierunkiem i zwrotem pociągu), osoba stojąca na peronie zaobserwuje, że względem niej poruszamy się z sumowaną prędkością naszą i pociągu. Gdy idziemy w kierunku przeciwnym, to będzie to różnica prędkości naszej i pociągu.

Jeżeli przyjmiemy, że Ziemia jest takim pociągiem, a eter – nieruchomym peronem, to znając prędkość światła i mierząc jej różnice w różnych kierunkach, powinniśmy mieć możliwość określenia prędkości Ziemi względem eteru. Pomysł ten wykorzystał Michelson. Skonstruowany przez niego układ optyczny miał za zadanie wykrycie ruchu Ziemi poprzez pomiar obserwowanego na ekranie przesunięcia prążków interferencyjnych światła

WISTYCZNA

odbitego od specjalnie skonstruowanego układu zwierciadeł. Michelson badał wzajemne położenie prążków interferencyjnych, obracając cały układ zwierciadeł w różne strony świata. Wykonane najpierw przez niego, a następnie wspólnie z Morleyem doświadczenie zupełnie zaprzeczyło ich rozumowaniu. Mimo udoskonalenia układu pomiarowego i wielokrotnego powtórzenia obserwacji w różnych porach dnia i roku nie udało się zaobserwować przesunięcia prążków interferencyjnych. Prędkość światła mierzona w różnych kierunkach była zawsze taka sama. Czy zatem można było przypuścić, że Ziemia jest nieruchoma wobec eteru? Że jest jedynym nieruchomym ciałem we wszechświecie? Wobec tego Michelson i Morley zdecydowali się ogłosić, że prędkość ta jest bardzo mała (w granicy błędu pomiaru) i wynosi około 5 m/s.

WSPÓŁCZYNNIK LORENTZA

Niespodziewane wyjaśnienie tej zagadki zaproponował genialny holenderski fizyk Hendrik Antoon Lorentz. Prześledźmy tok jego myślenia, analizując przykład, do zrozumienia którego wystarczy jedynie znajomość wzoru na kulę i nieskomplikowane przekształcenia arytmetyczne. Jeżeli poruszający się w pociągu pasażer i „nieruchomy" obserwator na peronie w tym samym momencie (punkcie) zapaliliby sygnał świetlny, wygenerowaliby falę świetlną rozchodzącą się kuliście i izometrycznie w przestrzeni. By uprościć rozważania, musimy założyć, że pociąg z pasażerem poruszają się ze stałą prędkością w układzie bez przyspieszenia wobec obserwatora na peronie. Układy takie – poruszające się jeden względem drugiego bez przyspieszenia – nazywamy inercjalnymi bądź układami Galileusza. Dla prostoty obliczeń przyjmujemy ruch tylko w kierunku jednej osi – X, pozostałe osie schodzą się ze sobą idealnie, obserwatorzy w chwili zerowej (gdy zapalili światło) znajdowali się w tym samym punkcie (jakkolwiek byłoby to możliwe). Ponadto pociąg w chwili zerowej był już w ruchu ze stałą prędkością (nie zatrzymał się na stacji). Dla nieruchomego obserwatora, napisalibyśmy równanie (1) rozchodzącej się fali świetlnej (patrz ramka obok). Współrzędne układu ruchomego w układzie nieruchomym opisują związki (2). Ponieważ pociąg porusza się ze stałą prędkością względem peronu, dlatego związki (2) mają postać liniową. Czas jest tu rozumiany i wyznaczony jako iloraz drogi przez prędkość i jako współrzędna też musi mieć charakter liniowy. Analogicznie dla ruchomego obserwatora, równanie rozchodzącej się fali świetlnej w jego układzie przybierze postać (3), a po podstawieniu wartości ze związków (2) – równości (3a). Ponieważ, jak wykazali Michelson i Morley, prędkość światła niezależnie od kierunków obserwacji i ruchów ciał jest stała, dlatego równanie (1) powinno przejść w równanie (3) i powinniśmy mieć tożsamość (4), a po uporządkowaniu (5). Jest ona prawdziwa dla dowolnych wartości x i t, gdy wszystkie współczynniki przy zmiennych równają się zeru.

Obliczone w ten sposób wartości przedstawione w postaci zależności (6) nazywamy współczynnikami Lorentza, a związki między współrzędnymi opisane zależnościami (7) nazywamy transformacjami Lorentza. Jeżeli przyjmiemy często używane oznaczenie (8), to równania (7) przybierają postać (9). Łatwo wykazać również, wiążąc układ odniesienia z pasażerem pociągu, że związki (9) przechodzą w równania (10), czyli obaj obserwatorzy obserwują te same efekty. Warto też zwrócić uwagę, że transformacje Lorentza przechodzą w transformacje Galileusza (wzory opisujące związki między współrzędnymi w mechanice Newtona), gdy przyjmiemy prędkość światła za równą nieskończoności ($k = 1$). Ogólnie wszystkie wzory mechaniki relatywistycznej przechodzą wtedy we wzory znane z mechaniki klasycznej. Trudności Michelsona i Morleya w interpretacji izotropowych właściwości rozchodzenia się fali elektromagnetycznej wytłumaczyć można przyjęciem logiki charakterystycznej dla mechaniki klasycznej, przy jednoczesnym wykluczeniu nieskończonej prędkości światła. Lorentz zaproponował tyleż ciekawą, co rewolucyjną hipotezę wyjaśnienia tych obserwacji, tłumacząc je skróceniem długości ciała w eterze o współczynnik k. Właściwe wytłumaczenie zjawiska podał dopiero Albert Einstein, ogłaszając STW, a OTW ostatecznie pogrzebała teorię eteru – absolutnego układu odniesienia.

WYPROWADZENIE TRANSFORMACJI LORENTZA – RÓWNANIA

(1) $x^2 + y^2 + z^2 = c^2t^2$

(2) $x' = k(x - vt) \quad y' = y \quad z' = z \quad t' = Ax + Bt$

(3) $x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2t'^2$

(3a) $k^2(x - vt)^2 + y'^2 + z'^2 = c^2(Ax + Bt)^2$

(4) $k^2(x - vt)^2 + y^2 + z^2 - c^2(Ax + Bt)^2 = x^2 + y^2 + z^2 - c^2t^2$

(5) $(k^2 - 1\ Ac^2)x^2 - 2(k^2v + ABc^2)xt + (k^2v^2 - B^2c^2 + c^2)t^2 = 0$

(6) $k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad A = \frac{\frac{v}{c^2}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad B = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

(7) $x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad y' = y \qquad z' = z \qquad t' = \frac{t - \frac{v^2}{c^2} \cdot x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

(8) $k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$

(9) $x' = k(x - vt) \qquad t' = k\left(t - \frac{v}{c^2} \cdot x\right)$

(10) $x = k(x' - vt') \qquad t = k\left(t' - \frac{v}{c^2} \cdot x'\right)$

EFEKTY RELATYWISTYCZNE – CZAS WŁASNY, DYLATACJA CZASU

Ze znaczącymi efektami relatywistycznymi mamy do czynienia w dwóch ogólnych sytuacjach:

- gdy jedno z ciał porusza się względem drugiego z relatywnie dużą prędkością,
- gdy przynajmniej jedno z rozpatrywanych ciał jest ciałem masywnym lub porusza się z przyspieszeniem (w OTW jest to równoważne).

Obie te sytuacje występują w przypadku satelitarnego wyznaczania pozycji. Mamy do czynienia z prędkością względną satelity wobec Ziemi, która jest jednocześnie ciałem masywnym. Z transformacji Lorentza wynika nie tylko efekt skrócenia długości, który można wytłumaczyć tym, że obserwatorzy będą mierzyć „inne" współrzędne, ale i skrócenie (wydłużenie) czasu, co w istocie daje ten sam efekt. Czas rozpatrywany jako współrzędna ulega zmniejszeniu (zwiększeniu) w najprostszym przypadku o współczynnik Lorentza (przy zerowym przesunięciu), zatem mierzony zegarem satelity i odbiornikiem naziemnym, też powinien się różnić. Autorzy publikacji poświęconej Galileo (opracowanej przez trzy francuskie instytucje zajmujące się badaniami nad aspektami strategicznymi, naukowymi i technicznymi wdrożenia systemu – patrz literatura) podają, że zegary atomowe montowane na satelitach spóźniają się 41 mikrosekund ($1\mu s = 1{\cdot}10^{-6}$s) na dobę w stosunku do zegarów ziemskich. Żeby uświadomić sobie wielkość zjawiska, dodajmy, że fala elektromagnetyczna (światło), poruszając się z prędkością około 300 000 km/s, przebywa w tym czasie drogę ponad 12 km!

Dlaczego tak się dzieje? Skoro od 1960 r. przyjmujemy, że 1 metr jest to 1 650 763,73 długości fali elektromagnetycznej w próżni (pomarańczowej linii widmowej kryptonu 86), to skracanie lub podłużenie fali będzie „zmieniało" wartość metra. Prostym przykładem zmiany długości fali jest efekt Dopplera, który możemy usłyszeć w życiu codziennym, gdy zbliża, a następnie oddala się od nas pojazd. W przypadku zbliżania fala się skraca (wzrasta częstotliwość – dźwięk jest wyższy), gdy pojazd oddala się, następuje wydłużenie się fali (maleje częstotliwość – dźwięk jest niższy). Podobnie jest z falą świetlną – jeśli źródło światła się od nas oddala, to następuje przesunięcie w kierunku fali barwy czerwonej (dłuższej). Efekt ten zauważył amerykański astronom Edwin Hubble, obserwując odległe galaktyki. Na tej podstawie postawił swoją hipotezę o rozszerzającym się Wszechświecie.

Jeżeli „zmienia się" wielkość metra, dla fali świetlnej jest to droga odpowiadająca 0,000000003335640952 sekundy, a prędkość światła pozostanie stała, to zmianie musi ulec również czas ($t = S/V$). Dlatego dylatacja czasu, określana jako efekt opóźnienia się zegara będącego w ruchu w stosunku do zegara w układzie nieruchomym, występuje łącznie z efektem skrócenia odległości. Możemy zatem mówić o czasie własnym obserwatora, pokazywanym przez zegar w jego układzie. STW podaje, iż każdy z obserwatorów „posiada własne" jednostki długości i czasu. Jeżeli jeden z obserwatorów dokona pomiaru za pomocą własnych jednostek, drugi swierdzi, iż używa on innych jednostek. Wniosek jest taki, że we wszystkich układach inercjalnych prawa przyrody są identyczne (obaj mają rację). Ponieważ czas bezwzględny – przyjęty jako założenie przez Newtona – nie istnieje, a zarówno teoria, jak i wyniki doświadczalne dowodzą, że doskonała synchronizacja odległych od siebie zegarów jest niemożliwa, to konieczne jest uwzględnianie w pomiarach satelitarnych efektów relatywistycznych.

PSEUDOODLEGŁOŚĆ

Zasada Fermata głosi, że światło biegnie zawsze po takiej drodze, po której czas potrzebny na jej przebycie jest najkrótszy (linia geodezyjna). Zatem droga prosta w czterowymiarowej przestrzeni nie jest drogą najkrótszą w trzech wymiarach (ilustracja obok), ponieważ na światło „działa" grawitacja. W rzeczywistości fale elektromagnetyczne rozprzestrzeniają się po zakrzywionej przestrzeni, której krzywizna niedostrzegalna jest dla nas gołym okiem (widzimy w trzech wymiarach). Mierzona odległość, podobnie jak linia pionu, nie jest linią prostą. Krzywizna określa sposób, w jaki materia (fala elektromagnetyczna) się porusza, a materia określa sposób, w jaki przestrzeń się zakrzywia. Ponieważ w używanych przez nas trój-, a nie czterowymiarowych przestrzennych układach odniesienia (ITRF, WGS 84, GTRF) dla określenia pozycji wykorzystujemy „prostą" geometryczną trójwymiarową (czyli nie najkrótszą w czterech wymiarach) odległość od satelity, musimy uwzględniać poprawki relatywistyczne.

Profesorowie Stephen Hawking i Roger Penerose wykazali, iż jeśli ogólna teoria względności jest poprawna, to wszechświat rozpoczął się od punktu (skoro się rozszerza), chwili zwanej Wielkim Wybuchem, stanu absolutnego zakrzywienia przestrzeni, którego teoria nie potrafi opisać. Należy spodziewać się zatem kolejnych odkryć i jej modyfikacji. I może również rozwoju czterowymiarowych geodezyjnych układów odniesienia.

Odległość pomiędzy satelitą i odbiornikiem jest obliczana na podstawie czasu propagacji fali sygnału z satelity do odbiornika. Czas propagacji ustala się na podstawie różnicy między czasem wysłania sygnału (na skali czasu satelity) a czasem odbioru sygnału (na skali czasu odbiornika). Tak wyznaczoną różnicę czasu pomnożoną przez prędkość rozprzestrzeniania się sygnału radiowego nazywamy pseudoodległością.

Różnicę pomierzonego przez zegary czasu jako $\Delta\tau = t\text{-}t'$ możemy obliczyć z zależności (2) i (6) lub (9), przyjmując przybliżone parametry dla satelity, a mianowicie: $V_{względemZiemi} = 780$ m/s (dla $T_{obiegu} = 14{,}5$ h, $S_{obwód\ Ziemi} = 40\ 000$ km), wysokość orbity $r = 23\ 500$ km. Przyjętą drogę światło pokonuje w około 0,08 s,

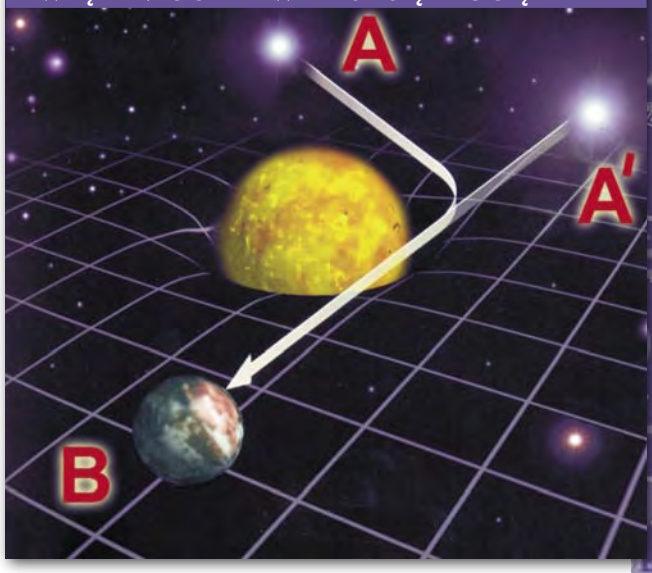
nas jednak interesuje opóźnienie zegarów. Po dokonaniu obliczeń otrzymalibyśmy wartość opóźnienia około $3 \cdot 10^{-13}$s. W tym czasie światło przebywa drogę około 0,1 mm.

Jest to wartość nieznacząca, ale policzona w niezakrzywionej czasoprzestrzeni (pominęliśmy masę Ziemi) i przy założeniu idealnego zsynchronizowania zegarów (gdy pokazywały ten sam czas w chwili rozpoczęcia pomiaru). Zazwyczaj jednak pomiar na punkcie, w zależności od metody, trwa nawet godzinę. A gdyby wskazania początkowe zegarów różniły się choć o 1 ns ($1 \cdot 10^{-9}$s), mielibyśmy już wartość 0,3 m (taką odległość pokonuje światło w czasie 1 ns) plus oczywiście błąd 0,1 mm. W rzeczywistości sytuacja jest jednak dużo bardziej skomplikowana. Do efektu związanego ze względnym ruchem satelity wobec Ziemi, dochodzi efekt grawitacyjnego zakrzywienia przestrzeni, efekt Dopplera generowany ruchem obrotowym Ziemi oraz efekt Sagnaca (generujący błąd 100 ns). Łączna wartość opóźnienia czasu, jak podają autorzy opracowania Galileo, odpowiada różnicy dodatniej 41 mikrosekund na dobę (około 0,5 ns na sekundę – około 14 cm/s odległości). Widać stąd, że dla uniknięcia efektów relatywistycznych niezbędna jest częsta synchronizacja zegarów.

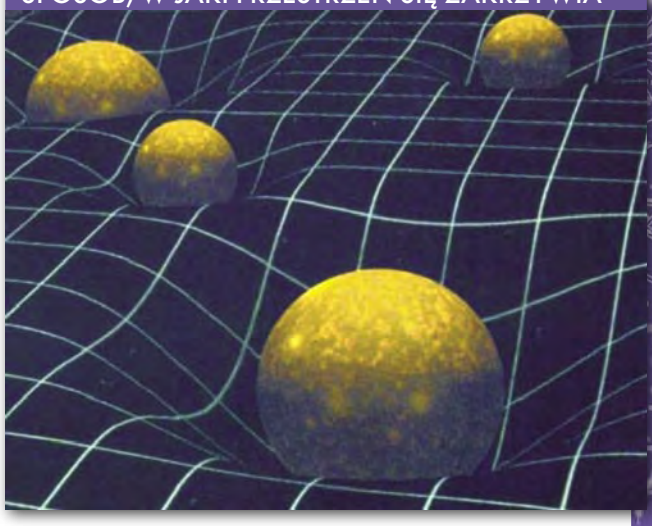
ATOM – NAJDOKŁADNIEJSZY ZEGAR ŚWIATA

W praktyce nie jesteśmy w stanie mierzyć czasu (czymkolwiek on jest), ograniczając się jedynie do zliczania częstotliwości. I tak jednemu obrotowi Ziemi wokół własnej osi przypisujemy dobę, a określonej częstotliwości wysyłania widma promieniowania elektromagnetycznego przez atom (9 192 631 770 okresów promieniowania odpowiadającego zmianie poziomu energetycznego atomu cezu) – sekundę. Gdyby zatem nie było przestrzeni, nie moglibyśmy zaobserwować powtarzających się zjawisk i czas byłby wtedy nieokreślony. Pytanie zatem, co było przed powstaniem wszechświata, jest pytaniem o sytuację, gdy nie było przestrzeni, czas w naszym rozumieniu nie istniał, a pytanie to zakłada istnienie czasu. Widać więc, że czas jest własnością przestrzeni i dla dokładnego określenia pozycji wymagane jest dokładne określenie czasu. Dla uzyskania tego efektu na satelitach montowane są zegary atomowe. Każdy satelita systemu Galileo posiada 4 zegary atomowe, 2 rubidowe i 2 bierne masery wodorowe. Wszystkie zegary atomowe na satelitach tworzą jednorodną, stabilną skalę czasu, są stale kalibrowane na podstawie danych pochodzących (w założeniach) z dwóch naziemnych stacji odniesienia. Umożliwia to stworzenie skali czasu porównywalnej z Międzynarodową Atomową Skalą Czasu (TAI – International Atomic Time), która jest określana jako wypadkowa ze wskazań zegarów atomowych rozmieszczonych na całym świecie. Synchronizacja skal czasu TAI i GST (Galileo System Time) w założeniach nie będzie przekraczać 50 ns. Dla samego pomiaru ma to jednak drugorzędne znaczenie, istotna jest bowiem synchronizacja czasu GST z czasem wskazywanym przez zegary satelitów. Zegar atomowy jest bez wątpienia najważniejszym elementem systemu, pozostaje jednak pewien problem: odbiorniki satelitarne nie posiadają zegarów atomowych i nie mierzą czasu z taką dokładnością jak satelity. Łączny skutek relatywistyczny jest taki, że częstotliwość odbierana jest większa o $4{,}7 \cdot 10^{-10}$ wartości względnej. W tym celu wysyłane przez satelity określone częstotliwości muszą być odpowiednio korygowane.

RYS. 1. DROGA AB DLA OBSERWATORA ZWIĄZANEGO Z B WYDAJE SIĘ DROGĄ A'B



RYS. 2. KRZYWIZNA OKREŚLA SPOSÓB, W JAKI MATERIA SIĘ PORUSZA, A MATERIA OKREŚLA SPOSÓB, W JAKI PRZESTRZEŃ SIĘ ZAKRZYWIA



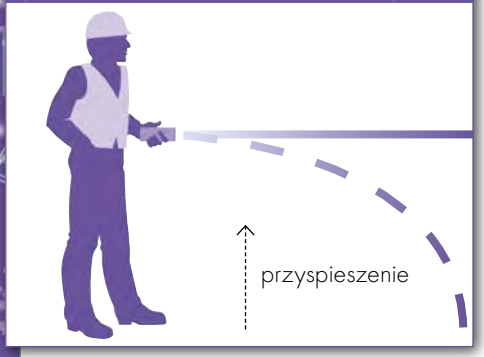
WYMAGANA DOKŁADNOŚĆ

Centra naziemne systemu Galileo, w odróżnieniu od systemu GPS, mają umożliwiać otrzymywanie w depeszy nawigacyjnej danych o statusie i wiarygodności systemu. Wpłynie to znacząco na jakość informacyjną systemu, co w połączeniu z ciągłością działania, zwiększy zaufanie użytkowników. Ma to zasadnicze znaczenie w komercjalizacji systemu. Dla uzyskania wymaganych dokładności określania pozycji niezbędne jest spełnienie kilku podstawowych założeń:

- określenie momentu emisji sygnału z dokładnością około nanosekundy w odniesieniu do przyjętego czasu wzorcowego;
- uwzględnianie czasu przesyłu sygnału w obrębie satelity, powodowane opóźnieniem układu elektronicznego oraz położeniem środka fazowego anteny względem środka masy satelity;
- stała synchronizacja zegarów atomowych satelitów z centrami naziemnymi;
- korekcja orbit satelitów;
- korekcja błędów jonosferycznych i troposferycznych;
- uwzględnianie w obliczeniach efektów relatywistycznych.

Nieuwzględnienie błędów spowodowanych przejściem sygnału przez atmosferę dla jednej częstotliwości fali, mogłoby spowodować błąd wyznaczenia pozycji nawet 40 m. Dlatego używa się dwóch lub więcej częstotliwości

RYS. 3. PRZYSPIESZONY RUCH WINDY POWODUJE PARABOLICZNE UGIĘCIE PROMIENIA ŚWIETLNEGO (WINDA DOGANIA PROMIEŃ)



nośnych. Natomiast nieuwzględnianie efektów relatywistycznych, nie zapewniłoby nawet kilkumetrowej dokładności. Dzięki osiągnięciu wysokiej precyzji systemy satelitarne mogą być wykorzystane do testów relatywistycznych, do dokładnego sprawdzenia izotropowych właściwości prędkości rozchodzenia się światła. Teoria umożliwiła precyzyjne pozycjonowanie, a to z kolei pozwala na doświadczalne testowanie teorii.

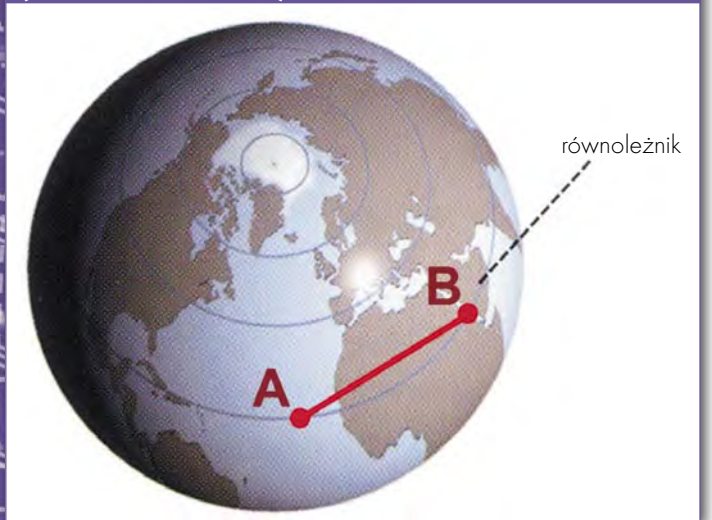
ZAKRZYWIENIE PRZESTRZENI

Klimat intelektualny panujący aż do początków XX w. sprawił iż Morley i Michelson, podobnie jak i Keppler, nie potrafili właściwie zinterpretować swoich obserwacji. Kłóciło się to bowiem z ich filozoficzno-religijnym postrzeganiem świata. Również teraz, mimo że minął już wiek, napotykamy na duże trudności z uświadomieniem sobie konsekwencji relatywistycznych. Dla pełnego zrozumienia tych zjawisk rozważmy pewien przykład. Gdybyśmy stanęli w windzie i zapalili światło równolegle do jej podłoża (rysunek 3), promień świetlny poruszałby się równolegle do podłogi. Gdyby jednak nagle winda ruszyła z przyspieszeniem w górę, nas wcisnęłoby w podłogę, a obserwowany promień świetlny ugiąłby się. Winda zaczęłaby doganiać światło, tor lotu zakrzywiłby się tworząc parabolę.

Podobne efekty zauważamy, obserwując światło poruszające się w grawitacyjnie zakrzywionej przestrzeni. W pobliżu masywnych gwiazd ulega ono ugięciu. Jeśli zakrzywienie przestrzeni wokół jakiejś masy jest wystarczająco duże, światło „ugina się" na tyle mocno, że zaczyna krążyć wokół niej jak satelity wokół Ziemi. Jeśli jest jeszcze większe, powoduje spiralne „spadanie" światła na tę masę. Dochodzimy do sytuacji, gdzie grawitacja (czyli zakrzywienie przestrzeni) jest na tyle duża, że światło zostaje całkowicie uwięzione. Prędkość światła nie pozwala na oderwanie się od tej masy – jest zbyt niska, by pokonać siły grawitacji (analogicznie: I prędkość kosmiczna jest niezbędna, by wystrzelić satelitę z Ziemi). Tak masywne obiekty nazywamy czarnymi dziurami. Zakrzywiają one przestrzeń wokół siebie, pochłaniając nawet światło.

Ogólna teoria względności głosi, że nie można odróżnić efektów działania pola grawitacyjnego od skutków przyspieszonego ruchu ciał. Jest to takie samo zjawisko. OTW rozszerza szczególną teorię względności o zjawiska optyczne. Żadne eksperymenty optyczne ani elektromagnetyczne nie pozwalają stwierdzić, czy znajdujemy się w spoczynku czy w ruchu jednostajnym. Analogicznie, nie możemy stwierdzić, czy poruszamy się ruchem przyspieszonym, czy znajdujemy się w polu grawitacyjnym. Plusem teorii względności jest zatem to, że nie narzuca żadnego konkretnego układu odniesienia. Możemy go związać np. ze środkiem mas Ziemi lub z dowolnym obserwatorem. OTW obnaża jednak skutki trójwymiarowego myślenia. Najkrótsza droga w dwóch wymiarach, np. między dwoma punktami na powierzchni Ziemi (rysunek 4), przy podejściu trójwymiarowym nie jest już najkrótsza. Moglibyśmy przewiercić przez kulę (elipsoidę) tunel-drogę, skracając tę odległość. Tak samo jest z wymiarem czwartym: prosta najkrótsza w trzech wymiarach nie jest linią geodezyjną w czterowymiarowej czasoprzestrzeni, a nasze ziemskie przestrzenne układy odniesienia są trójwymiarowe.

RYS.4. ODLEGŁOŚĆ AB MIERZONA W DWÓCH WYMIARACH WZDŁUŻ RÓWNOLEŻNIKA NIE JEST NAJKRÓTSZA W TRZECH WYMIARACH (CZERWONY KOLOR)



Podobnie jak nie ma idealnego odwzorowania powierzchni Ziemi na płaszczyznę, tak nie ma doskonałego odwzorowania czterech wymiarów na przestrzeń trójwymiarową. W przypadku map można powiedzieć, że jest to przestrzeń dwuwymiarowa, tylko przestrzennie zakrzywiona, stąd na mapach zniekształcenia kątów, odległości (w zależności od przyjętego odwzorowania). Podobnie zakrzywia się przestrzeń trójwymiarowa, tylko nie jesteśmy w stanie tego zobaczyć. Obserwujemy natomiast tego efekty. Według OTW ciała zawsze poruszają się po liniach prostych w czterowymiarowej przestrzeni, nam jednak wydaje się, że ich droga w przestrzeni jest krzywą. Światło porusza się w czterowymiarowej czasoprzestrzeni lub – jak kto woli – w zakrzywionej trójwymiarowej przestrzeni. Dlatego, by właściwie wyznaczyć współrzędne w naszych trójwymiarowych ziemskich układach odniesienia, musimy uwzględniać efekty relatywistyczne.

Nie należy jednak przeceniać OTW, nie sprawdza się ona zupełnie w mikroświecie. Ponadto profesorowie Stephen Hawking i Roger Penerose wykazali, iż jeśli teoria jest poprawna, to wszechświat rozpoczął się od punktu (skoro się rozszerza), chwili zwanej Wielkim Wybuchem, stanu absolutnego zakrzywienia przestrzeni, którego teoria też nie potrafi opisać. Wnioskowanie z teorii prowadzi „w ślepą uliczkę", można by rzec, że sama przewiduje swój koniec. Należy spodziewać się zatem kolejnych odkryć i jej modyfikacji. I może również rozwoju czterowymiarowych geodezyjnych układów odniesienia.

ROBERT RYDZ
Politechnika Warszawska,
GRZEGORZ STĘPIEŃ
22 WOK – Komorowo

Literatura:
- Hawking S., Krótka historia czasu, Wydawnictwo Zysk i S-ka, Warszawa 1996;
- System nawigacyjny Galileo, Aspekty strategiczne, naukowe i techniczne, Academie de Marine, Bureau des Longitudes, Academie Nationale de l'Air et de l'Espace, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006.
- Jeżewski M., Fizyka, PWN, 1970.