

Satelity a efekty relatywistyczne

Co dzieje się ze sztucznymi satelitami krążącymi wokół Ziemi oraz jak ogólna teoria względności wpływa na orbity i ruch satelitów? Naukowcy z Instytutu Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu wraz z przedstawicielami Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA) opublikowali artykuł, który kompleksowo opisuje te zagadnienia.

Badaczom udało się odkryć kilka nigdy wcześniej nieopisanych efektów. Prof. Krzysztof Sośnica z IGiG przedstawił wyniki tych prac w październiku 2020 r. oraz w marcu 2021 r. na spotkaniach Naukowego Komitetu Doradczego Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA GNSS Science Advisory Committee, GSAC) w ramach specjalnych referatów zaproszonych. Wywołały one burzliwą dyskusję. Teraz wyniki badań zostały opublikowane w czasopiśmie naukowym „Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy”.

• Co wpływa na sztuczne satelity?

Jednym z dowodów, który na początku XX w. pozwolił na powszechną ak-

ceptację w środowisku naukowym ogólnej teorii względności Alberta Einsteina, było wyjaśnienie za jej pomocą zmiany pozycji perycentrum Merkurego względem Słońca. Wcześniej niektórzy podejrzewali, że dziwny ruch Merkurego wynika z obecności dodatkowej planety pomiędzy Merkurym a Słońcem, której nadano nazwę Wulkan. Dopiero Einstein zdołał wyjaśnić zaburzenia w ruchu planet za pomocą nowej teorii opisującej w kompleksowy sposób relacje pomiędzy czasem, przestrzenią, grawitacją i materią.

– Ale wiele innych efektów działających na pozostałe parametry orbit dotychczas nie zostało opisanych w literaturze. Nasza publikacja wypełnia tę lukę

i przedstawia opis perturbacji parametrów orbit oraz zmianę okresu obiegu satelitów krążących wokół Ziemi. Wyprawiliśmy efekty w sposób analityczny oraz przeprowadziliśmy symulacje potwierdzające prawidłowość naszych przewidywań – mówi prof. Krzysztof Sośnica, kierownik Zakładu Geodezji Satelitarnej na UPWr.

Jak wyjaśnia, teoria względności pozwala wydzielić trzy główne efekty działające na ruch satelitów:

- **efekt Schwarzschilda** będący konsekwencją ugięcia czasoprzestrzeni przez masę Ziemi (traktowaną jako regularna kula),

- **efekt Lense-Thirringa**, tzw. wleczenie układu odniesienia, będący konsekwencją obrotu Ziemi wokół własnej osi, co generuje powstawanie tzw. wirów czasoprzestrzennych, które pociągają za sobą satelity,

- **efekt de Sittera**, zwany również precesją geodezyjną, będący konsekwencją zakrzywienia czasoprzestrzeni przez



Naukowcy z IGiG UPWr zaangażowani w badania efektów relatywistycznych: prof. Krzysztof Sośnica, dr Grzegorz Bury, dr Kamil Kaźmierski

Słońce oraz poruszania się satelitów wokół Ziemi poruszającej się wokół Słońca, a więc złożenia dwóch ruchów.

– My opisaliśmy, jak te trzy efekty wpływają na rozmiar i kształt orbit oraz na orientację płaszczyzny orbity względem przestrzeni zewnętrznej – mówi prof. Sośnica.

● Zaskakujące efekty

Naukowcy z UPWr i ESA po raz pierwszy przedstawili, jak zmieniają się wielkości orbit sztucznych satelitów Ziemi za sprawą zakrzywienia czasoprzestrzeni przez Ziemię. Odkryli, że zmiana promienia orbit kołowych jest stała i wynosi -17,7 mm. Średnio o 17,7 mm skraca się również dłuższa półoś orbit eliptycznych, przy czym zmiana ta uzależniona jest od wysokości satelity. Przykładowo dla eliptycznych satelitów Galileo wynosi od około -8 mm w apogeum, do -28 mm w perygeum. Dla orbit silnie eliptycznych może osiągać nawet wartości dodatnie, ale tylko w apogeum. Wielkości tych mechanika klasyczna nie jest w stanie w żaden sposób wyjaśnić, stąd też konieczne było sięgnięcie po ogólną teorię względności. – Zaskoczyła nas otrzymana wartość zmiany 17,7 mm, gdyż jest to dokładnie dwukrotność promienia Schwarzschilda, czyli promienia czarnej dziury o masie Ziemi – przyznaje prof. Krzysztof Sośnica.

Naukowcy wyprowadzili też prosty uniwersalny wzór na zmianę orbity dla wszystkich ciał niebieskich: $-4GM/c^2$, gdzie G to stała grawitacji, M – masa ciała niebieskiego, a c – prędkość światła w próżni.

Drugim efektem opisanym po raz pierwszy w pracy naukowców jest zmiana kształtu orbit sztucznych satelitów. Badacze z UPWr i ESA dowiedli, że ogólna teoria względności w ten sam sposób zmienia kształt orbit eliptycznych i ko-

łowych. Ulegają one spłaszczeniu („elipsyzacji”), i to w podobny sposób. – Logika podpowiada, że efekt zmiany kształtu powinien być większy dla orbit eliptycznych, a dla orbit kołowych zaniedbywalny. Jest jednak inaczej – przyznaje prof. Sośnica. W wyniku tego procesu zmienia się wartość mimośrodoru orbity. W przypadku satelity ekscentrycznego Galileo teoria względności zmienia orbitę w perygeum tak, że orbita (duża półoś) staje się mniejsza (perygeum obniża się), ale bardziej kołowa (perygeum podwyższa się za sprawą zmiany mimośrodoru). W apogeum dłuższa półoś również maleje (apogeum obniża się), ale mimośrodość rośnie (apogeum zwiększa wysokość), i w ten sposób orbita staje się bardziej ekscentryczna.

Dwa opisane wyżej efekty dla orbit mimośrodkowych działają częściowo przeciwnie. W rezultacie zmiana wysokości satelity jest 4 razy mniejsza niż sam efekt wynikający ze zmiany dużej półosi i wynosi -4,4 mm.

Trzeci odkryty efekt dotyczy precesji geodezyjnej – jej wartość silnie zależy od kąta nachylenia Słońca względem płaszczyzny orbity satelity. Naukowcy wykazali, że efekt precesji geodezyjnej jest największy dla satelitów geostacjonarnych krążących nad równikiem. Wcześniej nikt nie zwrócił na to uwagi, gdyż brano pod uwagę jedynie efekt średni, a nie rzeczywisty wynikający z geometrii satelita-Ziemia-Słońce.

– Orbita misji Gravity Probe B, na którą NASA wydała 750 mln dol. i która miała potwierdzić efekt precesji geodezyjnej, była nachylona względem płaszczyzny równika pod kątem 90° . My dowiedliśmy, że znacznie lepszym rozwiązaniem byłoby wykorzystanie satelitów krążących nisko nad równikiem oraz orbit, nad którymi Słońce nachylone jest pod maksymalnym możliwym kątem, odpowiadającym nachyleniu płaszczyzny ekliptyki względem równika. Wówczas misja przyniosłaby o wiele lepsze rezultaty w zakresie dokładności wyznaczonego efektu precesji geodezyjnej – podkreśla kierownik Zakładu Geodezji Satelitarnej na UPWr.

● Znaczenie odkryć

Ostatecznie naukowcy wykazali, że ogólna teoria względności w słabych polach grawitacyjnych (zaniedbując utratę energii związaną z falami grawitacyjnymi) w długich interwałach zachowuje moment pędu satelitów i energię satelitów krążących wokół Ziemi. Natomiast w krótkich interwałach zasady zachowania energii i pędu, a także prawa Keplera są złamane, co jest

szczególnie widoczne w przypadku orbit eliptycznych.

Do tej pory do weryfikacji efektów relatywistycznych wykorzystywano specjalnie w tym celu przygotowane misje satelitarne (np. misja Gravity Probe B). Jak się okazuje, satelity GNSS posiadają ogromny potencjał w zakresie weryfikacji niewielkich efektów relatywistycznych dzięki bardzo dokładnym orbitom, rozbudowanej sieci naziemnych stacji śledzących na wszystkich kontynentach oraz złożoności konstelacji zawierającej satelity na orbitach średnich, geostacjonarnych, kołowych i eliptycznych. Wiele efektów relatywistycznych (np. zmiana dłuższej półosi orbity lub dryft węzła wstępującego satelitów GNSS) przekracza kilka lub kilkanaście milimetrów w ciągu doby, co jest w pełni mierzalne przy obecnych dokładnościach oferowanych przez systemy GNSS. Gdyby wykorzystać kilka lat obserwacji GNSS, weryfikacja efektów relatywistycznych, takich jak precesja geodezyjna, może być przeprowadzona ze znacznie większą dokładnością niż w przypadku dróg misji relatywistycznych. Potencjał w zakresie fizyki podstawowej, jaki drzemie w GNSS, jest ogromny i jeszcze niezbadany.

Efekt precesji geodezyjnej czy efekt wleczenia układu odniesienia często są pomijane przez niektóre centra analiz Międzynarodowej Służby GNSS (IGS); uwzględniany jest jedynie efekt Schwarzschilda. Jak pokazały wyniki badań, nawet te niewielkie efekty relatywistyczne są istotne z punktu widzenia obecnie osiąganymi dokładności i mogą powodować powstawanie błędów systematycznych w parametrach orbit i zegarów satelitów GNSS.

Kolejne badania zespołu naukowców UPWr i ESA będą polegały na pomiarze parametrów relatywistycznych charakteryzujących krzywiznę czasoprzestrzeni z wykorzystaniem obserwacji Galileo, GPS i GLONASS oraz próbie wykrycia wszystkich tych orbitalnych efektów relatywistycznych, które są teoretycznie spodziewane, z wykorzystaniem rzeczywistych obserwacji GNSS.

Opracowanie Redakcji na podstawie materiałów UPWr

Więcej informacji o odkryciach można znaleźć w artykule grupy naukowców z Polski, Francji, Holandii i Hiszpanii pod kierownictwem prof. Krzysztofa Sośnicy z IGIG UPWr pt. „General relativistic effects acting on the orbits of Galileo satellites”, który ukazał się w czasopiśmie „Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy”.



Fot. Tomasz Lewandowski/UPWr

oraz Radosław Zajdel