
Prędkości kosmiczne

Space velocities

Jan Kindracki*

Instytut Techniki Ciepłej, Wydział Mechaniczny, Energetyki i Lotnictwa Politechniki Warszawskiej

Abstrakt. Ruch w przyrodzie jest wszechobecny, porusza się wszystko, co nas otacza począwszy od elektronów i protonów, aż po gwiazdy i galaktyki. Miarą prędkości jest droga pokonana przez dany obiekt (człowieka, samolot, cząstkę elementarną, ...) w jednostce czasu. A prędkość wydaje się być coraz bardziej istotna w coraz szybciej zmieniającym się świecie. Prędkość w kosmosie ma fundamentalne znaczenie, gdyż jest związana z trajektorią ruchu i możliwością realizacji danego celu. Określając prędkość zawsze definiujemy jakiś punkt odniesienia. W niniejszym krótkim artykule przedstawiono „kosmiczną” względność prędkości i jak ona wpływa na kosmiczne misje ludzkości. Nie da się ukryć, że stajemy się gatunkiem „kosmicznych wędrowców”, dla których zdobywanie kolejnych kosmicznych celów to sens istnienia. Księżyc Jowisza, księżyc Saturna Tytan, to nasze kolejne długofalowe cele, jednakże na drodze do ich realizacji w rozsądnym dla człowieka czasie stoi prędkość, którą musimy koniecznie zwiększyć.

Słowa kluczowe: kosmos, prędkość, ruch, trajektorie kosmiczne

Abstract. Movement in nature is ubiquitous. Everything around us moves, from electrons and protons to stars and galaxies. By definition, velocity is the distance traveled by a given object (human, plane, elementary particle, ...) in a time unit. And velocity seems to be more and more important in a quick-changing world. Velocity in the universe is crucial because it is related to the trajectory of movement and the possibility of achieving a given goal. When determining velocity, we always define a reference point. This paper explores the “cosmic” relativity of velocity and how it affects humanity’s space missions. Undoubtedly we are becoming “space wanderers”, for whom reaching further space goals has become the essence of life. Jupiter’s moons, Saturn’s moon Titan are our next long-term goals, but there is speed in the way of achieving these goals in a reasonable time for human. In order to achieve further ambitious goals, we need to increase the available travel velocity.

Keywords: space, velocity, movement, space trajectories

Wprowadzenie

Patrząc w rozgwieżdżone niebo najlepiej w miejscu, gdzie światło miast i osiedli ludzkich jest znikome i pozwala na obserwację, marzymy o lotach do tych migoczących punkcików. Człowiek od dawna patrzył z tęsknotą na gwiazdy i rozmyślał o tym, jak się „tam” dostać. W miarę rozwoju nauki to marzenie zaczęło się materializować, najpierw pierwsze loty balonem Jean-Francois Pilatre de Roziera i Francois Laurenta d’Arlandesa w 1783 [1], następnie pierwszy udany lot samolotu braci Wright w 1903 roku [2].

Od końca lat 50. XX w. technologia, którą dysponuje ludzkość, pozwoliła wkroczyć w erę kosmiczną i na początku tej ery wszystko działo się bardzo szybko i intensywnie, wydaje się, że nie było dnia, kiedy nie można było powiedzieć o kolejnym „kosmicznym” osiągnięciu: pierwszy lot z przekroczeniem umownej granicy kosmosu, pierwsze zwierzę w kosmosie, pierwszy człowiek, pierwszy spacer kosmiczny, pierwsze połączenie statków w kosmosie, w końcu pierwszy człowiek na in-

nym ciele niebieskim – Księżycu. A to wszystko w uproszczeniu w ciągu 10 lat od rozpoczęcia ery kosmicznej. I tu należałoby postawić pytanie o prędkość i znaczenie jej prawidłowego określania dla lotów kosmicznych.



Ryc. 1. Model balonu braci Montgolfier użyty w pierwszym locie załogowym, znajdujący się w London Science Museum [3]

*ORCID: 0000-0002-3453-7776



Ryc. 2. Kitty Hawk – pierwszy samolot w historycznym locie braci Wright [4]



Ryc. 3. Rakieta R7 (Mikhail (Vokabre) Shcherbakov) [6]

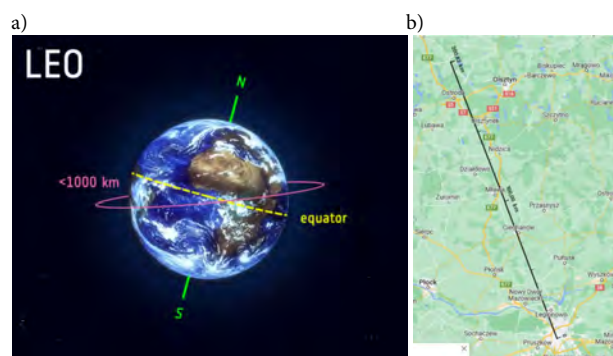


Ryc. 4. Ślad stopy Buzza Aldrina w czasie misji Apollo 11 (1969) [7]

Prędkości kosmiczne

Z definicji pierwszej prędkości kosmicznej lub inaczej prędkości eliptycznej wiemy, że jest to prędkość potrzebna do tego, aby dowolne ciało mogło pozostać w ru-

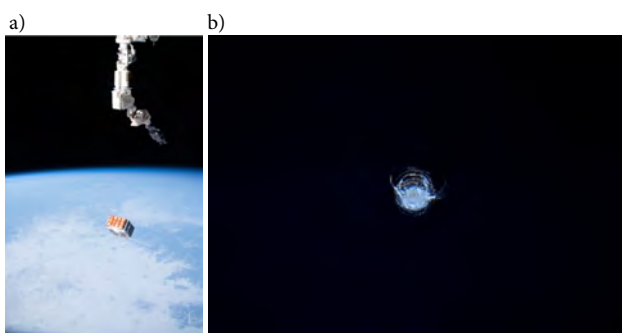
chu wokół innego ciała w przestrzeni kosmicznej. Trajektorię tego ruchu zwiemy orbitą i jeżeli jest ona trajektorią zamkniętą, to będzie orbitą eliptyczną (w teorii może być też kołowa, jednakże w rzeczywistości idealna orbita kołowa w zasadzie jest niemożliwa do osiągnięcia). Wartość tej prędkości zależy od promienia orbity. Dla orbity kołowej sprawa jest prosta, prędkość jest stała i niezmienna dla danego promienia orbity. W przypadku orbit rzeczywistych, czyli orbit eliptycznych, prędkość zmienia się i zależy od chwilowej wartości promienia wodzącego. Dla orbit satelitarnych okołoziemskich znajdujących się na niewielkiej wysokości nad Ziemią, czyli 200–1000 km, prędkości te są mniejsze niż 8 km/s, tj. poniżej 28 800 km/h. Przypomnijmy, że dopuszczalna prędkość pojazdu na autostradzie w Polsce to 140 km/h, lot samolotem pasażerskim odbywa się z prędkością ok. 1000 km/h. Tak więc na wszystkich amatorach dużych prędkości wartość prędkości orbitalnej robi wrażenie. Nasuwa się pytanie, czy my ją jesteśmy w stanie odczuć? Może paść tylko jedna odpowiedź: to zależy. Każdy z nas z pewnością wie, że Ziemia się obraca, ale czy zdajemy sobie sprawę, że w każdej sekundzie człowiek znajdujący się na równiku porusza się z prędkością liniową 1669 km/h względem środka Ziemi? A jednak tej prędkości nie odczuwamy. Tak więc następnym razem podczas jazdy z prędkością 100 km/h możemy stwierdzić, że poruszamy się z prędkością liniową 1769 km/h lub 1569 km/h, w zależności od tego, w którą stronę względem ruchu obrotowego Ziemi się poruszamy, lub osiągamy względem środka Ziemi jakąś inną prędkość z tego zakresu, jeżeli nie poruszamy się równoległe do równika. Okazuje się jednak, że to jest jeszcze bardziej skomplikowane, wrócimy do tego przykładu na końcu artykułu, a tymczasem skupmy się na prędkości orbitalnej i jej względności. Będąc na orbicie bliskiej Ziemi – LEO (ryc. 5a) o wysokości nad powierzchnią Ziemi ok. 200 km (w przybliżeniu odległość pomiędzy centrum Warszawy a miastem Morąg w województwie warmińsko-mazurskim, ryc. 5b), poruszamy się z prędkością ok. 7784,33 m/s i wcześniej ustaliliśmy,



Ryc. 5. Porównanie odległości: a) orbity LEO (obraz nie w skali, źródło: ESA–L. Boldt-Christmas) [9]; b) odległość na mapie pomiędzy Warszawą a miastem Morąg (źródło: na podstawie Google Maps [10])

że możemy jej nie odczuwać z powodu braku punktu odniesienia. Patrząc na szybko przesuwaną się miastami i kraje możemy zauważyć, że lecimy naprawdę szybko.

Wyobraźmy sobie także, że na bardzo zbliżonej orbicie (o wysokości 202 km – tym razem to odległość pomiędzy centrum Warszawy a wyjazdem z Morąga w kierunku Elbląga) porusza się inny pojazd, którego prędkość wynosi 7783,15 m/s, tak więc „wyprzedzamy” go z prędkością 1,18 m/s (prędkość spaceru w świetle Księżycy) przy założeniu, że obydwa pojazdy poruszają się w takim samym kierunku (ryc. 6a), jeśli te pojazdy poruszałyby się w kierunkach przeciwnych, to prędkość „mijania się” wyniosłaby 15 567,48 m/s, co z pewnością nie stworzy okazji do pomachania sobie wzajemnie przez okno (ryc. 6b).



Ryc. 6. a) Efekt względności prędkości: lot z małą prędkością – wystrzelenie z pokładu stacji kosmicznej ISS satelity STPSat-4 w 2020 roku (źródło: NASA [11]); b) efekt spotkania się stacji ISS z obiektem poruszającym się względem stacji z dużą prędkością (źródło: ESA [12])

Przykład ten doskonale ilustruje względność prędkości tylko w zwykłym rozumieniu, bez uciekania się do szczególnej teorii względności Einsteina. Wszystkie manewry orbitalne związane ze zbliżaniem się i dokonywaniem do stacji kosmicznej odbywają się przy prędkościach względnych pomiędzy pojazdami rzędu pojedynczych metrów a nawet centymetrów na sekundę. Natomiast patrząc z Ziemi widzimy, jak pojazdy mknące z prędkością powyżej 7000 m/s próbują dokonywać tych manewrów. Czy to już jest cała względność prędkości, o których mówimy? Nie. Dotychczas byliśmy wprawdzie poza Ziemią (na orbicie), ale ciągle w niedalekich odległościach od niej, dla orbity LEO to 200 czy 500 km, nawet dla orbity geostacjonarnej to tylko ponad 36 000 km. A gdybyśmy chcieli „urwać się” ziemskiemu polu grawitacyjnemu, to już musimy rozpędzić nasz pojazd do ponad 11 km/s (II prędkość kosmiczna). Wtedy to polecimy w czerń kosmosu, ale niezbyt daleko, ponieważ podróżujemy ciągle pod nadzorem Słońca, czyli naszej gwiazdy centralnej, która przynajmniej w tej małej części Kosmosu jest „panem życia i śmierci”. Aby się na dobre wyrwać spod panowania grawitacji słonecznej, musimy się dalej rozpędzać aż do prędkości 16,6 km/s lub

42,1 km/s. Różnica pomiędzy tymi dwoma wartościami wynika właśnie z punktu odniesienia. Należy pamiętać, że Ziemia porusza się wokół Słońca ze średnią prędkością 29,78 km/s, co możemy wykorzystać, jeżeli będziemy chcieli się poruszać w czasie naszej ucieczki w tym samym kierunku co Ziemia i wykorzystać efekt „procy”, albo możemy „iść pod prąd” i rozpędzać się mozolnie do ponad 42 km/s w przeciwnym kierunku. Z prędkością związany jest jeszcze jeden efekt, o którym trzeba wspomnieć. Dla przykładu weźmy lot z Ziemi w kierunku Marsa. Wystrzelony obiekt należy rozpędzić do wspomnianej II prędkości kosmicznej (trochę ponad 11 km/s), aby go wprowadzić na trajektorię prowadzącą do Marsa, a precyzyjniej do punktu w przestrzeni, w którym Mars i nasz obiekt zjawiają się w przyszłości w określonym czasie koniecznym na pokonanie tej odległości zarówno przez Marsa, jak i przez nasz obiekt. Tak więc nasz obiekt należy wprowadzić na orbitę eliptyczną, heliocentryczną, która przynajmniej w dwóch punktach styka się zarówno z orbitą Ziemi, jak i Marsa. Planując parametry podróży w bliskiej odległości od Ziemi, tj. w strefie wpływów grawitacyjnych Ziemi (ang. SOI), lot po tej trajektorii możemy potraktować jak lot po orbicie hiperbolicznej względem naszej planety, gdzie wartości prędkości obiektu są zupełnie inne niż wartości jego prędkości względem Słońca. Ta sama sytuacja powtórzy się, kiedy dotrzemy w pobliże Marsa, wtedy potraktujemy w układzie współrzędnych marsocentrycznych tę samą trajektorię ruchu jako fragment hiperboli, choć w układzie heliocentrycznym jest elipsą. Ponadto ten sam punkt na trajektorii we współrzędnych heliocentrycznych jest jednocześnie punktem na hiperboli i punktem na elipsie we współrzędnych marsocentrycznych. Ten przykład pokazuje, jak punkt odniesienia wpływa na wartość prędkości a nawet na nazewnictwo orbity.

Wracając do naszego przykładu stacji kosmicznej, to nie porusza się ona tylko ponad 7 km/s, ale należy uwzględnić jeszcze prędkość Ziemi i obiektów związanych z nią grawitacyjnie w ruchu dookoła Słońca. Sprawa się coraz bardziej komplikuje, Słońce bowiem porusza się względem centrum naszej galaktyki – Drogi Mlecznej z prędkością ok. 250 km/s. A nasza Galaktyka zbliża się do galaktyki Andromedy z prędkością ok. 111,6 km/s, by za miliard lat nastąpiło zderzenie – wielkie kosmiczne „bum” [8]. Wniosek z tego płynie taki, że mówiąc o prędkości zawsze musimy brać pod uwagę punkt odniesienia. Co więcej, licząc koszty związane z przemieszczaniem się w kosmosie także należy brać pod uwagę punkt odniesienia. W tym przypadku nie za bardzo interesuje nas, jaką prędkość będzie mieć nasz statek względem centrum Drogi Mlecznej, a tylko jaka jest różnica pomiędzy prędkością wymaganą w aktual-

nym układzie odniesienia względem obiektu, którego grawitacja dominuje, a prędkością obecnie posiadaną. I ta różnica prędkości przekłada się bezpośrednio na wykonalność danego manewru lub nawet osiągnięcie celu. Możliwości technologiczne, jakimi obecnie dysponujemy, są dość skromne w stosunku do naszych potrzeb czy wyobrażeń.

Prędkość a misje kosmiczne

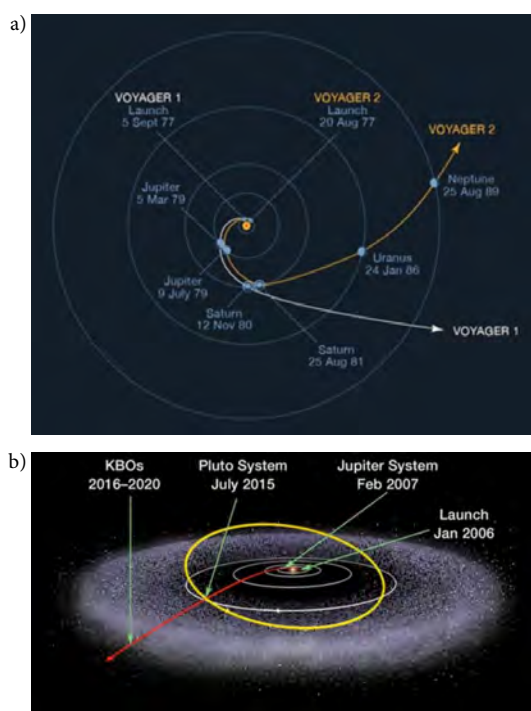
Statki kosmiczne serii Voyager, wysłane u zarania naszej ery kosmicznej, rozpoczęły swą daleką podróż zdobywając kolejne planety Układu Słonecznego i rozwijając różne prędkości; najpierw z rakieta nośną wzbily się na orbitę, potem przyspieszyły, aby opuścić ziemskie pole grawitacyjne i udać się w podróż ku najdalszym planetom naszego układu, przynosząc przy tym szereg spektakularnych odkryć. Zmiany prędkości odbywały się najpierw za pomocą silników raketowych, a następnie wykorzystywano grawitację gazowych gigantów [13, 14], by stać się kosmicznym wędrowcem opuszczającym Układ Słoneczny (ryc. 7a). W tych misjach wykorzystywano energię grawitacji, aby osiągać niezbędne przyspieszenia kosztem znacznego wydłużenia czasu misji. Lata później, tytułem „kosmicznego wędrowca”, można było nazwać misję New Horizons (ryc. 7b). Obranie innej trajektorii lotu związanej z faktem odwiedzania innych ciał, niż było to w przypadku statków z serii Voyager, wiąże się z tym, że statek ma inną prędkość i osiągnie tę samą odległość przestrzenną w innym czasie. W tych przypadkach kluczowa jest wartość prędkości determinująca

możliwości przelotu obok wybranego obiektu, ale definiowana tym razem względem centralnego ciała naszego układu, czyli Słońca. Naukowcy planujący te misje pamiętali o punktach odniesienia, ale tylko tych istotnych dla danego przypadku. Nie interesowała ich prędkość ucieczki z naszej Galaktyki, tylko to, co może wpływać na ruch pojazdów w obszarach ich zainteresowań. Tak więc mówiąc o prędkości zachowajmy rozsądek, nie zawsze do opisu podróży, nawet kosmicznej, trzeba brać pod uwagę wszystko do samego końca: prędkość względem galaktyki, grupy lokalnej galaktyk itd., gdyż tak naprawdę nie wiadomo, gdzie ten koniec się znajduje.

Podsumowanie

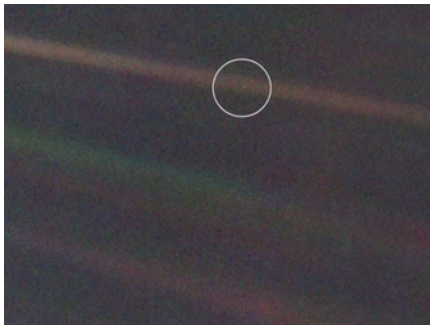
Obecnie część naukowców „żyje” powrotem człowieka na Księżyc, na którym nie byliśmy fizycznie od ponad 50 lat! Jednakże prawdziwym celem naszego powrotu na Srebrny Glob jest Mars, a misje księżycowe i założenie stacji wokół Księżyca mają tylko ułatwić osiągnięcie tego celu. Jak przedstawiono wcześniej, nasz gatunek posiada ciągle jeszcze zbyt małe możliwości napędowe w stosunku do naszych aspiracji; start misji marsjańskiej z orbity okołoksiężycowej będzie tańszy i bardziej bezpieczny w realizacji. Pamiętajmy, że przy tak dużych skalach odległości dla człowieka (a paradoksalnie małych dla kosmosu) lot pojazdu załogowego musi być zoptymalizowany pod względem energetycznym, gdyż człowiek potrzebuje zabrać ze sobą „całe środowisko”, by mógł oddychać (powietrze) i żyć (wodę i żywność), co stanowi znaczącą masę pojazdu kosmicznego. Tak więc podróż na Marsa, przynajmniej w najbliższym czasie, będzie odbywać się z prędkościami wyznaczonymi przez mechanikę nieba dziesiątki lat temu, a jej skrócenie (tj. zwiększenie prędkości) odbędzie się dopiero po przełomie w dziedzinie napędów.

Ciekawe czy Mikołaj Kopernik spoglądając w niebo ponad 400 lat temu i widząc gwiazdy i planety (tj. ruchome bądź błędzące gwiazdy, jak wtedy powszechnie je nazywano), myślał o prędkościach i odległościach w kosmosie? Czy formułując swoją teorię naszego układu planetarnego myślał, iż będzie ona miała tak wielkie znaczenie, że w przyszłości umożliwi latanie w kosmos i dywagowanie na temat prędkości kosmicznych? Tego nie wiemy, ale z pewnością możemy powiedzieć, iż prędkość i jej względność ma fundamentalne znaczenie dla naszej dzisiejszej cywilizacji. To Mikołaj Kopernik uporządkował stan ówczesnych obserwacji i stwierdził, że Słońce jest pośrodku, wbrew odczuciom każdego z obserwujących codziennie przemieszczające się Słońce ze wschodu na zachód. Postawienie Słońca w środku układu współrzędnych przyczyniło się do opracowania przez Keplera eleganckich praw opisujących tę część przyrody,



Ryc. 7. Trajektorie międzyplanetarne: a) misji Voyager 1 i 2 (źródło: [16] na podstawie NASA); b) misji New Horizons (źródło: [17])

a jedno z tych praw dotyczy właśnie prędkości. Prędkość w kosmosie ma znaczenie i właściwe jej określenie wraz z punktem lub poziomem referencji stanowi fundament podróży kosmicznych, które dopiero jako ludzkość zapoczątkowaliśmy. Na tym etapie naszego „kosmicznego” rozwoju uzyskujemy na razie niewielkie wartości prędkości, o czym świadczy to, że Voyager 1 po 45 latach od wystrzelenia osiągnął odległość 23 772 811 136 km (stan na 29.01.2023) [18], co daje średnią prędkość 1 414 613,37 km/dobę. To dużo i mało, zależy z jakiego punktu odniesienia na to spojrzymy. Myślę, że nasz gatunek zrobił duży krok, kiedy patrzę na zdjęcie Ziemi widzianej okiem statku kosmicznego Voyager 1 w 1990 roku z odległości 6 437 376 000 km; Ziemia to ten mały punkt w białym okręgu na ryc. 8 – NASZ DOM mieniący się jako jedna z „gwiazd”. Ciekawe, co by powiedział na to Kopernik?



Ryc. 8. Ziemia widziana okiem statku kosmicznego Voyager 1 w roku 1990 z odległości ponad 6 miliardów km (6 437 376 000 km) przed wyłączeniem kamery [19]

Literatura

- [1] Tom D. Crouch, *Lighter Than Air*, Johns Hopkins University Press, 2008.
- [2] Telegram from Orville Wright in Kitty Hawk, North Carolina, to His Father Announcing Four Successful Flights, 1903 December 17.
- [3] By Mike Young at English Wikipedia - Transferred from en.wikipedia to Commons., Public Domain, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2063973>
- [4] Zdigitalizowane zdjęcie wykonane przez Johna P. Danielsa, Library of Congress, Prints & Photographs Division, LC-DIG-ppprs-00626.
- [5] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Wrightflyer_highres.jpg
- [6] https://commons.wikimedia.org/wiki/File:R-7_Rocket_%28Samara_Space_Museum%29.jpg
- [7] <https://history.nasa.gov/ap11ann/kippsphotos/apollo.html>
- [8] <https://pixabay.com/pl/photos/gepard-afryka-namibia-kot-2859581/>
- [9] <https://images-assets.nasa.gov/image/s132e012208/s132e012208~orig.jpg>
- [10] Własny na bazie serwisu Google Maps.
- [11] <https://aegisaero.com/news/aegis-aerospace-awarded-new-satellite-contract/>
- [12] https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2016/05/Impact_chip
- [13] <https://www.theattic.space/home-page-blogs/2020/1/9/the-astonishing-voyage-of-voyager>
- [14] <https://solarsystem.nasa.gov/basics/primer/>
- [15] Nadia Drake, Milky Way Has 4 Billion Years to Live — But Our Sun Will Survive, <https://www.nationalgeographic.com/science/article/scientists-predict-our-galaxys-death>
- [16] <https://www.businessinsider.com/nasa-voyager-pictures-45-year-journey-neptune-uranus-saturn-earth-2022-6?IR=T#the-voyager-probes-were-designed-to-visit-jupiter-and-saturn-1>
- [17] <http://pluto.jhuapl.edu/Mission/The-Path-to-Pluto-and-Beyond.php>
- [18] Status misji Voyager <https://voyager.jpl.nasa.gov/mission/status/>
- [19] <https://www.businessinsider.com/nasa-voyager-pictures-45-year-journey-neptune-uranus-saturn-earth-2022-6?IR=T#it-gave-us-the-earths-most-distant-self-portrait-dubbed-the-pale-blue-dot-19>