



Napęd statków kosmicznych, czyli pęd i energia

Jest dość oczywiste, że by zmienić prędkość potrzebna jest siła. I to jest prawda niezależna od tego, gdzie się znajdujemy, a więc czy jesteśmy na Ziemi czy w przestrzeni kosmicznej.

Jerzy **Kuczyński**

Na początek warto zauważyć, że siłę można uzyskać na dwa sposoby. Jeden to zmiana energii a drugi to zmiana pędu. Konkretnie siłę uzyskujemy różniczkując pęd po czasie

$$\mathbf{F} = d\mathbf{p}/dt$$

lub energię po przestrzeni. To ostatnie po trzech składowych przestrzeni, czyli

$$\mathbf{F} = -\text{grad } E = -(\partial/\partial x, \partial/\partial y, \partial/\partial z) \cdot E \\ = -(\partial E/\partial x, \partial E/\partial y, \partial E/\partial z)$$

Jak by nie było w obu przypadkach uzyskujemy ten sam wektor siły. Historycznie problem, które z powyższych równań ma sens fizyczny był dyskutowany przez kilkadziesiąt lat a zakończył go w 1743 d’Alembert¹ wykazując ich równoważność.

Jak się jednak wydaje współcześnie fakt takiej równoważności nie jest zbyt powszechnie uświadamiany. Przede wszystkim ze względu na codzienne doświadczenie. Otóż

zarówno pęd jak i energia w zasadzie podlegają prawom zachowania, więc aby uzyskać siłę trzeba dostarczyć odpowiedniej ilości obu tych wielkości. Obu, bo oczywiście są ze sobą związane i nie da się zmienić jednej z nich nie dokonując odpowiedniej zmiany drugiej. Jednak jest drastyczna różnica w „dostępności” obu wielkości na Ziemi i w przestrzeni kosmicznej. Otóż na Ziemi, a ogólniej w kontakcie z masywnym ciałem, mamy bardzo dużą dostępność pędu.

Nieco upraszczając i trywializując problem, w kontakcie z masywnym ciałem nie obowiązuje prawo zachowania pędu. Widać to na co dzień, gdy przyglądamy się ruchowi drogowemu. Samochód stoi – pęd wynosi zero. Po chwili jest w stanie ruchu i pęd jest całkiem spory. Jak doskonale wiemy nie musimy się martwić skąd ten pęd się wziął. Warto jednak nad tym się zastanowić. Otóż wziął się z Ziemi mającej w stosunku do samochodu „nieskończoną” masę. Pęd to iloczyn masy i prędkości² więc jeżeli tir o masie 60 ton nabędzie prędkości 10 m/s, to Ziemia uzyska prędkość około 10^{-19} m/s, bo oczywiście

$$M_1 \cdot v_1 = -m_2 \cdot v_2, \quad (*)$$

¹ A. K. Wróblewski, „Historia fizyki”, PWN Warszawa 2006 s. 205.

² Gdyby ktoś chciał być bardzo precyzyjny to w przybliżeniu. Ale w tym przypadku oczywiście w pełni poprawnym. Można dodać, że promień protonu też jest w pewien sposób przybliżony – inny jest promień „elektryczny” a inny masowy – p. B. Duran i in., Nature t. 615 (2023) s. 813. Ten ostatni przykład pokazuje coś więcej – przybliżenie może być zarówno ilościowe jak i „ideologiczne”. W przypadku pędu to ostatnie ma duże znaczenie (p. formalizm kanoniczny) ale to już inna bajka.

a Ziemia ma masę około $6 \cdot 10^{24}$ kg czyli z grubsza za 3 godziny ruchu z tą prędkością Ziemia przesunie się o średnicę protonu³ (około 10^{-15} metra). Nie wchodząc w szczegóły można stwierdzić, że będąc w kontakcie z masywnym ciałem można od niego „pożyczać” niemal dowolne ilości pędu.

Dla energii analogiczną sytuację mamy w przypadku kontaktu z termostatem. Możemy z niego czerpać, formalnie dowolną ilość, energii cieplnej nie zmieniając jego stanu, co w zasadzie łamie prawo zachowania energii. Masywna planeta stanowi dla pędu odpowiednik termostatu dla energii cieplnej. Dlatego w praktyce, poza przypadkami krótkotrwałych zderzeń, na planecie prawo zachowania pędu nie działa a próba jego uwzględnienia prowadzi do mało rozsądnych rozważań nie mających żadnego praktycznego zastosowania.

Na planecie pozostaje jednak w mocy prawo zachowania energii, z którego realności zdają sobie sprawę wszyscy (prawie) mieszkańcy naszej planety. Dlatego w powszechnym przekonaniu do zmiany prędkości potrzebna jest jedynie odpowiednia energia i nic więcej. W praktyce stały kontakt z „termostatem pędowym” powoduje spore problemy dydaktyczne, bo bardzo trudno jest przekonać kogokolwiek, że pęd ma duże znaczenie i że warto o nim (czasem!) pamiętać.

Sytuacja drastycznie się zmienia, gdy zaczynamy rozważać problemy lotów kosmicznych. Tam oczywiście nic nie maskuje zachowania pędu. Niestety my ludzie myślimy dość schematycznie⁴ a przyzwyczajenie jest naszą drugą naturą. Dlatego często przenosimy bezmyślnie codzienne doświadczenie na inne sytuacje. Nie inaczej jest z problemem pędu, energii i silników sond kosmicznych. Na Ziemi pojazd by się poruszać musi pobierać energię i w zasadzie nic innego mu do tego nie jest potrzebne. W przestrzeni kosmicznej na zmiany prędkości potrzebujemy dostarczenia odpowiedniej ilości energii i pędu i to co na Ziemi nazywamy silnikiem nie wystarcza. Silnik statku kosmicznego musi dostarczać zarówno energii jak i pędu. I w zasadzie o tym wiemy, bo zawsze podkreśla się, że silnik statku kosmicznego jest silnikiem raketowym.

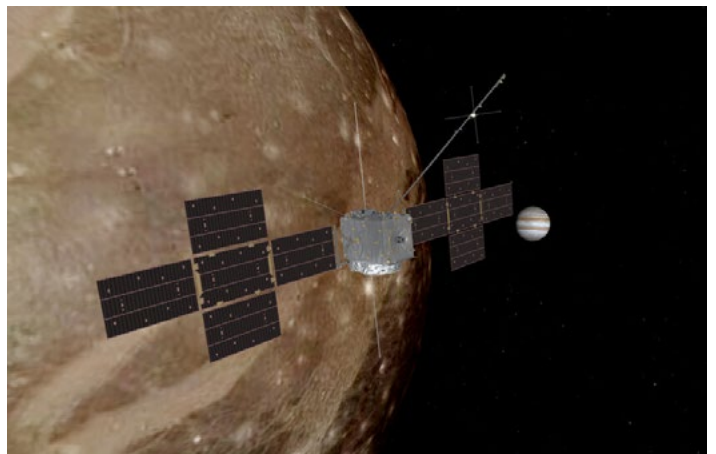
Niestety nasze codzienne doświadczenie nie wskazuje na znaczenie pędu i z „przyzwyczajenia” myślimy o dostarczaniu sondzie kosmicznej energii. I dzieje się tak nawet w dość porządnym tekście popularyzującym problem lotów kosmicznych⁵. W rzeczywistości w warunkach lotów kosmicznych panuje spora obfitość energii. W praktyce panele słoneczne dostarczają niemal dowolną ilość energii. Oczywiście w przypadku sond latających

w miarę blisko Słońca, powiedzmy do pasa głównego planetoid. Tu warto przytoczyć wartość stałej słonecznej w okolicach Ziemi. To przeszło 1360 W/m^2 . Więc nawet przy 10% sprawności kilka metrów kwadratowych baterii słonecznych dostarcza kilkaset watów mocy.

Wprawdzie lecąc na krańce Układu Słonecznego na taką moc nie ma co liczyć. W pobliżu Jowisza stała słoneczna to już tylko kilkadziesiąt watów na metr kwadratowy, ale ze względu na brak grawitacji panele mogą być spore. Np. sonda JUICE lecąca do Jowisza⁶ ma panele słoneczne o powierzchni 85 m^2 . Pada na nie w pobliżu Jowisza ponad 4 kW energii słonecznej więc biorąc pod uwagę sprawność sonda będzie dysponowała stałą mocą kilkuset watów.

Jeżeli dodać, że w przypadku sond lecących na krańce Układu Słonecznego zamontowanie „siłowni jądrowej” nie stanowi problemu to widać, że energii na sondach kosmicznych nie brakuje. Po prostu bierze się pewną ilość materiału promieniotwórczego (najczęściej jakiś związek zawierający pluton 238 o półokresie rozpadu 88 lat; czyli z punktu widzenia lotu w zakresie Układu Słonecznego to stałe źródło energii) i ciepło wynikające z rozpadu jąder generuje prąd elektryczny. Nie jest tego może za wiele, ale gdyby była potrzebna siłownia o mocy kilku czy nawet kilkudziesięciu kilowatów to nie stanowiłoby to wielkiego problemu technicznego. Czyli realnie dostępne są to moce zbliżone do mocy niewielkiego samochodu. Porównajmy to z siłami rzeczywiście generowanymi przez silniki sond kosmicznych.

Jak pisze autor cytowanej pracy⁵ to ... kilka niutonów. I taka siła przy dłuższym działaniu wystarczyłaby na dostarczenie do krańców Układu Słonecznego w ciągu kilku lat. Niewiele więcej niż niuton na tonę sondy oznacza wzrost



³ Bardziej realistycznie przesunie się dużo dalej, ale znacznie mniejsza część planety, co zostanie skompensowane ruchem innych samochodów w innych kierunkach (w tym i tego samego tira, który zakręcając i hamując też wniesie przyczynek do kompensacji „pożyczki” pędu od naszej planety. W sumie może problem i ciekawy, ale w tej chwili niezbyt istotny i sumarycznie można powiedzieć, że pożyczka pędu zostanie na dłuższą metę „splacona” nie powodując żadnych skutków.

⁴ Tu trudno mi tu nie zacytować mojego najwybitniejszego nauczyciela licealnego (biologa, profesora Jana Szopy – zakończył karierę zawodową jako rektor jednej krakowskich uczelni) – ludzie należą do gatunku „homo sapiens” co niektórzy tłumaczą „człowiek myślący” ale w rzeczywistości należałoby to raczej tłumaczyć jako „człowiek sapiący”.

⁵ Przykładem służy tekst P. Berga „Co zmieni napęd jądrowy w raketach”, *Polityka* 17/23 (19.04, 23) s. 64. W tekście dyskutuje się problemy energii dla pojazdów kosmicznych nie zauważając, że na sondach kosmicznych panuje niemal nieograniczona obfitość źródeł energii.

⁶ D. Castelvetchi, *Nature* t. 616 (2023), s. 420.

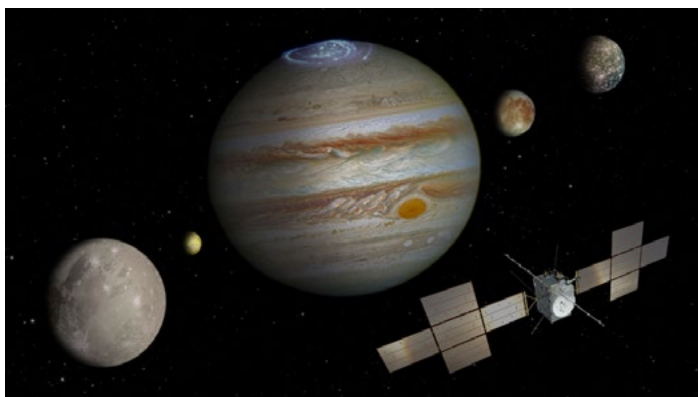


Foto – esa.int/ESA

prędkości około sto metrów na sekundę w ciągu doby a rok stałego działania ponad 30 km/s. Przy takich przyspieszeniach latamy do wszystkich obiektów Układu Słonecznego bez zawracania sobie głowy „asystami grawitacyjnymi” i żadna misja nie trwa powyżej dziesięciolecia, chyba, że czas badań po dotarciu na miejsce będzie długi. Niestety jednak tak duże siły są dostępne bardzo krótko – o rocznej pracy z generacją siły jednego niutona możemy jedynie pomarzyć.

Bardziej obiecująco wygląda perspektywa lotów kosmicznych, gdyby dysponować jakimś kawałkiem autostrady. Np. gdyby na Księżycu mieć szynę, na której można by sondę przyspieszać, to szyna o długości około 1000 kilometrów i przyspieszenie rzędu 30 – 40 m/s² wystarczy do uzyskania prędkości wystarczającej do opuszczenia Układu Słonecznego. To ostatnie pod warunkiem wykorzystania prędkości Ziemi i Księżyca.

W przypadku „autostrady na Księżycu” oczywiście mamy dowolną ilość pędu – szyna pozwala na odebranie naszemu satelicie jego potrzebną ilość. Wydatek energetyczny, aby to osiągnąć odpowiada kilkunastu litrom paliwa na kilogram masy sondy. Wystarczy przyspieszyć sondę do takiej prędkości by w pobliżu docelowego ciała prędkość była na tyle niewielka by konwencjonalny silnik raketowy umożliwił manewrowanie sondą w układzie tego ciała. Tak więc, gdy mamy do dyspozycji odpowiednią ilość pędu loty kosmiczne wydają się bardzo łatwe i względnie tanie.

Teraz więc spróbujemy ocenić koszty zdobycia pędu w przestrzeni kosmicznej. W najprostszym modelu wystarczy oszacować pojedynczy impuls silnika (układu) zachowującego pęd i energię. Powiedzmy sonda o masie m_1 wyrzuca „paliwo” o masie m_2 z prędkością v_2 . Oczywiście zachodzi równanie (*) w którym nieznaną wielkością jest prędkość uzyskana przez sondę v_1 .

Wyliczając tę prędkość możemy wyliczyć stosunek energii kinetycznych zyskanej przez sondę i uniesionej przez paliwo.

$$E_1/E_2 = m_1/m_2$$

A więc energie uzyskane przez rozważana ciała są w odwrotnym stosunku do ich mas. Inaczej mówiąc sonda o masie tony wyrzucająca w celu uzyskania odrzutu kilogramową masę paliwa, dzieli się z tym paliwem energią kinetyczną tak, że paliwo unosi jej tysiąc razy więcej niż uzyskuje sonda. W praktyce masa materii odrzutowej jest dużo mniejsza niż promil masy sondy i z energetycznego punktu widzenia napęd raketowy jest skrajnie nieefektywny. Albo jeszcze inaczej – energia nie ma żadnego znaczenia przy napędzie sond kosmicznych.

Tym co decyduje o możliwościach manewrowania jest wyłącznie masa materii odrzutowej (przeznaczonej do uzyskania odrzutu). Jeżeli nią dysponujemy to możemy manewrować. Gdy masa się kończy żadna ilość energii nie jest w stanie zmienić prędkości sondy⁷. Dodajmy niezależnie czy chodzi o zmianę wartości czy tylko kierunku tej prędkości. Brak masy odrzutowej powoduje próby uzyskania tej masy w trakcie lotu. Jednak praktycznie jest to niemożliwe – pomysł pobierania materii międzyplanetarnej jest nie do zrealizowania. Po prostu tej materii jest niewiele a na dodatek ma względem sondy sporą prędkość i pobranie jej wiąże się z dużymi stratami pędu.

W praktyce jedyną materią dostępną w przestrzeni międzyplanetarnej jest promieniowanie słoneczne. Jak już wspomniano jest go dużo, ale ma minimalny pęd. Warto zauważyć, pęd światła (promieniowania elektromagnetycznego) jest opisany wzorem

$$p = E/c$$

To bardzo niewielka wartość. Np. strumień światła niosący moc jednego kilowata na metr kwadratowy dostarcza siły około $3 \cdot 10^{-6}$ N/m². A więc by uzyskać niuton siły potrzeba powierzchni trzydziestu hektarów! Do kilometra kwadratowego to samo światło dostarczyłoby gigawat mocy! Wprawdzie siłę można podwoić przez odbicie tego światła, ale to dalej tylko dwa niutony.

Podsumowując powyższe rozważania zauważamy, że doświadczenia ziemskie są często dosyć nietypowe. Wprawdzie fizyka, taka jaką znamy ze szkoły, to fizyka „w sytuacji ogólnej” czyli takiej jaka panuje w przestrzeni kosmicznej, ale ludzka intuicja z zasady tworzy się na doświadczeniu codziennym. Powoduje to, często nieświadome, przenoszenie codziennych doświadczeń na sytuację, gdy rzeczywistość ma nieco inne własności. Tak właśnie jest z problemem energii i pędu w przestrzeni kosmicznej. I to może nie jest zbyt dziwne. Gorzej, że takie nieuprawnione „przenoszenie intuicji” dotyczy popularyzatorów i popularyzacji nauki. A to jak widać zdarza się dość często.

Jerzy Kuczyński
Akademia Śląska

⁷ Warto zauważyć, że ciekawym sposobem przyspieszania sondy byłoby „ostrzeliwanie” jej naładowanymi cząstkami, tak by cząstki te wpadały w pole elektryczne związane z sondą tak ukształtowane by odbijać te cząstki w wybranym kierunku. W ten sposób można by uzyskać siłę działającą w dość dowolnym kierunku. Oczywiście źródłem tych cząstek mógłby być akcelerator umieszczony np. na Księżycu, a więc nie mający problemów z brakiem pędu.