



Výfučtení: Rychlé interstelární cestování

Úvod

Dne 4. října roku 1957 lidstvo vypustilo na oběžnou dráhu Země první umělou družici a vstoupilo tak do své kosmické éry. I přes následné dosažení celé řady dílčích úspěchů je však budoucnost, ve které jsou lety do vesmíru běžnou součástí našich životů, stále velmi vzdálená. Vstup soukromého kapitálu a vznikající konkurenční prostředí nám sice přináší určitou naději, že se lety do vesmíru v následující dekádě dále významně zlevní, ale určitě ne natolik, aby se status quo zásadně změnil. V tomto Výfučtení se zkusíme zamyslet nad tím, co expanzi lidstva do vesmíru brzdí. Nebudeme se držet při Zemi. Zaměříme se rovnou na interstelární cestování. Představíme si jeden zcela zásadní problém, který nám v cestách k našim hvězdným sousedům brání, podíváme se na jeho možná řešení využívající již existující technologie a nakonec se v zadání úlohy k Výfučtení krátce zamyslíme nad tím, jak by interstelární cestování mohlo vypadat, kdyby se nám zmíněný problém podařilo odstranit.

Univerzální měna vesmíru

Vědecký pokrok je chaotický, nepředvídatelný a vyžaduje velmi specifické incentive. Je prakticky nemožné jej jakkoliv organizovat nebo plánovat. Právě proto nelze napsat, že by rychlejšímu vývoji kosmických technologií bezprostředně bránila jedna konkrétní věc. Ostatně to by bylo neuctivé vůči tisícům raketových inženýrů a vědců, kteří neustále přicházejí s novými inovacemi, které teprve dohromady umožňují dosáhnout viditelného pokroku, jenž následně vnímá i široká veřejnost. K podobným tvrzením se můžeme uchýlit teprve tehdy, když se zaměříme na ty nejobecnější principy a prodloužíme časový horizont. Potom poměrně snadno dospějeme k názoru, že všechny operace ve vesmíru, které zatím známe jen od autorů sci-fi, mají jedno společné. Vyžadují řádově větší množství energie, než jakým lidstvo v současnosti disponuje.

Spotřeba energie je s vědeckotechnickým pokrokem svázána už od nepaměti. Na začátku byl člověk odkázán pouze na sílu svých svalů. Veškerou energii získával z potravy. Později se naučil používat sílu ohně a vody. Mnohem později, teprve když začalo lidstvo ve velkém spalovat fosilní paliva a získalo tak obrovské množství relativně levné energie, mohly být položeny základy moderního světa, ve kterém dnes žijeme. Domnívat se, že pokrok může být na spotřebě energie nezávislý, by bylo velmi naivní. Ostatně když se podíváme na světovou spotřebu elektrické energie, můžeme si všimnout, že v tomto století viditelně poklesla jen jednou. Došlo k tomu během největší finanční krize, tedy v době, kdy současně klesala i životní úroveň obyvatelstva.

Výše uvedené skutečnosti nám naznačují, že významného pokroku v dobývání vesmíru se nedočkáme dříve, než se nám podaří dosáhnout stejně významného pokroku v energetice. Průlom zde by mohl teoreticky nastat také v důsledku zvyšování tlaku na snižování emisí skleníkových plynů. Tato výzva, které čelíme nyní a v následujících letech, je jednou z vůbec největších výzev v historii.

Naštěstí by se interstelární lety daly za určitých podmínek uskutečnit i bez ohledu na výsledek transformace energetického sektoru. Než si ale tento koncept představíme, zkusíme si spočítat, o jakém množství energie potřebné na interstelární let, se tu konkrétně bavíme.

Řádový odhad potřebné energie

Abychom získali představu, jak enormně je interstelární cestování náročné, zkusme si spočítat, kolik energie by bylo potřeba pro interstelární let malé lodě s posádkou tvořenou čtyřmi astronauty. Můžeme vyjít z předpokladu, že taková loď by se musela pohybovat velmi rychle. Skoro tak rychle jako světlo. Pokud by se loď pohybovala řádově pomaleji než světlo, celá posádka by během letu zemřela stářím. Určitou alternativu představuje koncept obří lodě schopné pojmout řádově desítky tisíc kolonistů, která by mohla plout vesmírem celá milénia. U takové lodě by však nižší potřebnou rychlost vyvážila obří hmotnost a s potřebnou energií bychom na tom byli ještě hůře než v případě malé, lehké a rychlé lodě. Cestování rychlostí vyšší než světlo si zakažme. Jisté slibné koncepty nám sice třeba jednou umožní obejít Einsteinovu teorii relativity, ale bude lepší, když pro tentokrát zůstaneme nohama na zemi a podobné teorie prozatím přenecháme autorům sci-fi.

Nyní se vraťme k našemu modelovému případu. Řekněme, že by loď vážila $m = 1\,000\text{ t}$ a potřebovali bychom ji urychlit na $v = 0,3c$. Energii takové lodi spočítáme podle relativistického vzorce, protože při takto velkých rychlostech už se začínají projevovat relativistické efekty. Pokud jste o speciální teorii relativity dosud neslyšeli nebo s ní neumíte počítat, nebojte se a klidně přeskočte až na výsledek. Pro řešení úlohy k Výfučení nebude její znalost potřebná. Doporučujeme zkusit si dosadit do standardního nerelativistického vzorce $E = mv^2/2$ a porovnat, o kolik se váš výsledek při této rychlosti liší.

$$E = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right) mc^2$$

$$E = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - 0,3^2}} - 1 \right) (1 \cdot 10^6 \text{ kg} \cdot (2,998 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1})^2)$$

$$E \doteq 4,34 \cdot 10^{21} \text{ J}$$

Číslo, které nám vyšlo, nám o energetické náročnosti interstelárních letů neřekne nic povzbudivého. Lidstvo dnes každou sekundu spotřebuje¹ řádově $10 \cdot 10^{13} \text{ J}$ energie. Vyrobit potřebné množství energie pro jediný interstelární let malé lodě by nám tímto tempem trvalo tisíce let. Situace by se dramaticky nezlepšila, ani kdybychom se stali plnohodnotnou civilizací prvního typu na Kardašovově škále, (využili bychom veškeré energetické zdroje Země). Polepšili bychom si sice o čtyři řády, ale i tak by výroba potřebného množství energie trvala celý rok. Dá se tedy předpokládat, že lidé nebudou moci cestovat mezi hvězdami dříve, než dokážou využít významné procento veškeré dostupné energie ve Sluneční soustavě.

Připomeňme si, že se stále bavíme výhradně o interstelárním cestování. Rychlé a pohodlné lety uvnitř Sluneční soustavy, které byly krátce zmíněny na začátku, by samozřejmě vyžadovaly o několik řádů méně energie. K jejich uskutečnění by nám proto mohl pomoci i méně radikální průlom v energetice, který by nemusel nutně spočívat ve vybudování Dysonovy sféry. Prozatím se však naděje na rychlé interstelární cestování úplně nevzdávejme. Pravda, budeme muset slevit z požadavku na lidskou posádku, ale výměnou se dostaneme ke konceptu, který je mnohem blíž současným technologickým možnostem a není ani limitován něčím tak fundamentálním jako je potřebné množství energie.

¹<https://ourworldindata.org/energy-production-consumption>

Nanofotonické plachetnice

Důvodem, proč obětovat lidskou posádku, je především snížení hmotnosti. To musí být skutečně radikální. Určitě nechceme dospět ke konceptu pomalé sondy, která by do nejbližší hvězdné soustavy letěla tisíce let. Zkusme si představit sondu s hmotností $m = 10\text{ g}$ a stejnou rychlostí jako v předchozím příkladě a spočítejme pro ni její kinetickou energii. Vyjde nám $4,34 \cdot 10^{13}\text{ J}$.

To už vypadá mnohem nadějněji. Můžeme si všimnout, že tentokrát už bychom potřebnou energii dokázali vyrobit během několika minut. Zbývá si položit otázku, jestli lze vyrobit sondu vážící pouhých pár gramů, kterou by šlo urychlit na rychlost řádově srovnatelnou s rychlostí světla, která by byla schopná proletět skrz mezihvězdný prostor a ideálně by nám potom na vzdálenost několika světelných let dokázala poslat nasbíraná data. Odpovědí je koncept nanofotonické plachetnice.

Začneme tím, že si nejprve představíme solární plachtu. Solární plachta funguje na velmi podobném principu jako plachty, které používají plachetnice na moři. Okolní pohyblivé se částice předávají plachtě část své hybnosti, což ji urychluje ve směru pohybu částic. V konečném důsledku se společně s plachtou dává do pohybu i plavidlo s posádkou. Zatímco v případě pozemských plachetnic jsou pohyblivými se částicemi molekuly vzduchu, ve vesmíru si plachetnice musí vystačit s fotony. Fotony jsou částice, které mají nulovou klidovou hmotnost a pohybují se rychlostí světla. Proto jejich hybnost nelze počítat standardním způsobem. Odvozením z relativistického vztahu pro energii pohyblivé se částice lze dospět k elegantnímu vztahu ve tvaru $p = \frac{h}{\lambda}$, kde h je Planckova konstanta a λ vlnová délka fotonu. Můžeme si všimnout, že s prodlužující se vlnovou délkou energie fotonů klesá. Různými úvahami bychom nyní mohli dospět k řadě dalších zajímavých poznatků o fotonech. Pro pochopení principu fungování fotonických plachetnic si ale vystačíme se samotným vztahem.

Určitě by nás například zajímalo, jakou silou fotony na plachtu působí a jaké zrychlení plachetnici udělují. Můžeme si rozmyslet, že síla bude určitě záviset na počtu dopadajících fotonů a jejich energii. Jelikož už jsme si vyjádřili hybnost fotonů v závislosti na jejich vlnové délce, vyjdeme ze vztahu pro sílu, který ji definuje jako změnu hybnosti za čas:

$$F = \frac{\Delta p}{\Delta t}.$$

Za předpokladu, že se fotony od plachty odrážejí a nejsou jí pohlcovány, dosadíme za změnu hybnosti dvojnásobek hybnosti jednoho fotonu vynásobenou časem t , plošnou hustotou fotonů dopadajících za jednotku času n a plochou plachty S . Dospějeme k následujícímu vztahu:

$$F = \frac{2hSn}{\lambda}.$$

Pokud by nás zajímalo zrychlení plachetnice, stačilo by výslednou sílu vydělit její hmotností. Kdybychom do vztahu dosadili konkrétní hodnoty, vyšlo by nám, že v rozumné vzdálenosti od Slunce jeho fotony skutečně dokážou plachetnici nezanedbatelně urychlit. To zní skvěle, neboť solární plachetnice mají oproti konvenčně poháněným vesmírným lodím jednu obrovskou výhodu: nemusí s sebou vézt těžké palivo. Výpočty raketových inženýrů následované letem Ikaru, první solární plachetnice, nám ale zároveň ukázaly jejich značnou nevýhodu: jsou sice urychlovány jistě, ale zato hodně pomalu. Tak pomalu, že bychom se k nejbližší hvězdě dostali opět nejdříve za několik tisíc let. Právě tady ale přichází do hry omezení na velmi malou hmotnost. Pokud bychom vyrobili nanofotonickou plachetnici vážící jen několik málo gramů, mohli bychom se místo na fotony pocházející ze Slunce spolehnout na výkonné pozemské lasery.

Pokud by se nám na takovou plachetnici podařilo svítit lasery s výkonem řádově ve stovkách gigawattů alespoň několik desítek minut, fotony by ji dokázaly urychlit třeba i na dvacet procent rychlosti světla. A touto rychlostí už by cesta k nejbližší hvězdě trvala jen dvacet let. Problém v tomto případě by bylo nasměrovat laser na plachetnici a vytvořit dostatečně málo rozbíhavý laserový paprsek.

Závěr

Představený koncept miniaturní sondy vážící sotva pár gramů, cestující významným procentem rychlosti světla a urychlované lasery, takzvané nanofotonické plachetnice, získal v posledních letech značnou pozornost. V cestě ke hvězdám nám ovšem brání i jiné problémy než jen nedostatek energie. Předně jde o pevnost plachty. Ta by musela mít současně maximální plochu a minimální hmotnost. V ideálním případě by proto neměla být tlustší než jen několik málo atomových vrstev. Dále by musela odrážet téměř sto procent fotonů a zvládat se dostatečně rychle ochlazovat vyzařováním, aby se neroztavila. Kromě toho by plachta měla být odolná kolizím s mezihvězdným prachem při rychlostech v řádu desítek tisíc kilometrů za sekundu. Asi není potřeba zdůrazňovat, že najít materiál s požadovanými vlastnostmi není snadné. Možným řešením je poslat ne jednu, ale rovnou tisíce nanofotonických plachetnic a doufat, že alespoň jedna extrémní podmínky přežije. To ale samozřejmě není univerzální řešení všech zmíněných problémů a před realizací projektu bude ještě potřeba další výzkum.

Viktor Materna
materna@vyfuk.org

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením propagace a mediální komunikace MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků. Realizace projektu byla podpořena Ministerstvem školství, mládeže a tělovýchovy.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence navštivte <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.