

Středoškolská odborná činnost 2008/2009

Obor 02 – fyzika

## Stručný úvod do teorie letu sluneční plachetnice

**Autor:**

Stanislav Fořt

Gymnázium Pierra de Coubertina

náměstí Fr. Křížika 860, 390 01

Tábor, 1. ročník

Tábor, 2009  
Jihočeský kraj

## **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval zcela samostatně, za použití uvedené literatury a informačních zdrojů včetně internetu a názory zde vyslovené jsou mými vlastními.

V Táboře dne .....

---

Stanislav Fořt, autor

## **Abstrakt**

Cílem mé práce je seznámit čtenáře blíže s problematikou slunečního plachtění. Rozebírám zde fyzikální aspekty pohybu slunečních plachetnic v prostoru a pomocí diskrétních simulací určuji parametry trajektorií. V závěru předkládám rozbor několika letů k planetám sluneční soustavy a cest do heliopausy.

# Obsah

1. Úvod a stručná historie.....	5
2. Použitá zjednodušení.....	8
3. Využití zářivého výkonu hvězdy.....	9
4. Tlak záření.....	10
5. Gravitační síla.....	11
6. Působící síly.....	12
7. Zatížení plachty.....	16
8. Manévry.....	18
9. Působení tlaku záření.....	20
10. Úniková rychlost.....	21
11. Změna excentricity dráhy.....	22
12. Teplota plachty.....	25
13. Popis simulace.....	27
14. Výsledky simulací.....	29
15. Závěr.....	36
16. Zdroje informací.....	39

# 1. Úvod a stručná historie

Sluneční plachetnice je kosmická loď vybavená velkou lesklou orientovatelnou plochou – plachtou, která odráží dopadající elektromagnetické záření do určeného směru. Tlak elektromagnetického záření dopadajícího na plachtu působí na loď silou, která je přímo úměrná ploše plachty a nepřímo úměrná druhé mocnině vzdálenosti od zdroje. Dokud můžeme považovat poměr plachty za zanedbatelný vůči vzdálenosti od zdroje. Plachetnice s sebou nese zátěž. Plachta musí být vytvořena z velmi tenkého materiálu, protože tlak záření je velice malý.

Historie slunečního plachtění je překvapivě dlouhá. O tlaku elektromagnetického záření se poprvé zmínil astronom Johannes Kepler v roce 1619 [3]. Vysvětloval jím orientaci ohonů komet při jejich průletu kolem Slunce. Správně se dověděl, že na prachové částice ohonu komety působí světlo určitým tlakem. Uspokojivé teoretické vysvětlení tohoto jevu však podal až v roce 1873 fyzik James Clerk Maxwell v rámci své elektromagnetické teorie [9]. Z elektromagnetické teorie vyplývá, že libovolný typ záření působí na jakékoli těleso určitým tlakem. Tento tlak je sice velice malý, ale v případě slunečního záření je k dispozici takřka neustále. O využití tohoto tlaku k pohonu kosmických lodí se začalo spekulovat nejprve ve vědeckofantastické literatuře. Dva francouzští spisovatelé, Faure a Graffigny, vypráví ve své knize „Neuvěřitelná dobrodružství ruského vědce na planetách“ v roce 1889 o cestě mezi Měsícem a Venuší plavidlem tvořeným velkým zrcadlem s kosmickou lodí ve svém středu [3].

Realističtější koncepci využití tlaku slunečního záření k pohonu lodě navrhli v roce 1924 ruští vědci Ciolkovskij a Canděr [3]. Koncepce byla lepší, protože si uvědomili, že bude nutné nejdříve dopravit plachetnici do vesmíru. Až pak bude možné využít tlaku záření. V padesátých letech dvacátého století se začaly objevovat různé vědeckofantastické povídky, ve kterých se pracovalo s fotonovými pohony. V USA se poprvé objevila myšlenka slunečního plachtění v článku C. A. Wileye (psal pod pseudonymem Russell Saunders) „The Clipper Ships of Space“, který vyšel v časopise *Astounding Science Fiction Magazine* v roce 1951 [10]. Termín „solar sail“, ze kterého vzniklo označení „sluneční plachetnice“, byl poprvé užit ve studii publikované v „*Jet Propulsion*“ americkým inženýrem R. L. Garwinem v roce 1958 [11]. Anglický spisovatel Arthur Charles Clark použil myšlenku sluneční plachetnice v povídce „The Wind from the Sun“, ve které popisoval závody malých plachetnic mezi Zemí a Měsícem [12]. O sluneční plachetnici hovoří i P. Boulle ve světoznámém románu „Planeta opic“.

V šedesátých a sedmdesátých letech 20. století se koncepce sluneční plachetnice dostala do stádia předběžných projektů. NASA<sup>1</sup> v sedmdesátých letech počítala s vypuštěním sondy poháněné tlakem slunečního záření k Halleyově kometě v roce 1986 [3]. Nedostatek financí však způsobil zrušení tohoto projektu v roce 1977. Tlaku elektromagnetického záření bylo využito při letu sondy *Mariner 4*<sup>2</sup> k Marsu [13]. Záření sondu stabilizovalo pomocí malých pohliníkových destiček umístěných na koncích solárních kolektorů. I v pozdějších letech byl tlak záření využit ke stabilizaci kosmických objektů. Družice série *Insat 2* využívají sluneční plachtu o rozměrech 2 m x 5 m [3]. Satelit je totiž vybaven pouze 1 solárním kolektorem. Tlaku záření bylo dále využito u družic *GOES 8* až 11 obdobným způsobem.

Na počátku osmdesátých let byla myšlenka závodů plachetnic obnovena skupinami nadšenců v USA a Evropě. Ve Francii vznikla v roce 1981 skupina U3P [14], která byla složena převážně ze zaměstnanců organizací CNES<sup>3</sup> [16], ONERA<sup>4</sup> a Matra Espace<sup>5</sup>. V roce 1979 byla v

1 National Aeronautics and Space Administration - Národní úřad pro letectví a kosmonautiku

2 Sonda *Mariner 4* pořídila jako první snímky povrchu Marsu a určila zde hodnotu atmosférického tlaku

3 Centre National d'Études Spatiales – francouzská kosmická agentura

4 Office National d'Études et de Recherches Aerospatiales – Francouzská kancelář pro kosmický vývoj a výzkum

5 Matra Espace – francouzská agentura zaštiťující aktivity v oboru kosmonautiky

USA založena skupina WSF<sup>6</sup>, která spolupracovala s JPL<sup>7</sup>. Skupina U3P začala s přípravou projektu své vlastní sluneční plachetnice a s propagací jejich závodu k Marsu, který se měl uskutečnit v roce 1992 k příležitosti 500. výročí objevení Ameriky Kryštofem Kolumbem [14] [3]. V Japonsku vznikla v roce 1982 skupina SSUJ<sup>8</sup>. V tehdejší Československu se v 1981 také začala formovat skupina zabývající se problematikou slunečního plachtění LSG [15].

Závod plachetnic k Marsu v roce 1992 se brzy ukázal jako nemožný kvůli finanční náročnosti a nedostatku zájmu. Proto se začalo uvažovat o mnohem jednodušším závodu mezi Zemí a Měsícem, který byl též nazýván Luna Cup. Závod měl proběhnout v roce 1994.

Pro Luna Cup byly navrhovány celkem 3 projekty sluneční plachetnice:

1. Skupina U3P navrhovala zprvu plachetnici se třemi křídly, pomocí kterých by bylo možné s lodí manévrovat. Později byla koncepce upravena na loď se čtvercovou plachtou a celkovou plochou 4000 m<sup>2</sup> o hmotnosti 250 kg. Plachta měla být napnuta na 4 diagonálních tyčích o délce 45 m. Tyče měly být vyrobeny z kompozitního materiálu na bázi uhlíkových vláken spojených epoxidovou pryskyřicí. Plachta měla být tvořena mylarovou fólií od firmy DuPont tloušťky 8 μm pohliníkovanou z obou stran. Odrazivost plachty měla být 85 % - 88 %. Plošná hustota by byla 62,5 g/m<sup>2</sup>. Zrychlení v okolí Země se mělo rovnat 0,12 mm/s<sup>2</sup>. Manévrování mělo zajišťovat 8 trojúhelníkových klapek na koncích plachty s celkovou plochou 240 m<sup>2</sup>. Hlavní část užitečného zatížení měla být TV kamera pro pořizování snímků Měsíce.

Tloušťka plachty	více než 8 μm
Plocha plachty	4000 m <sup>2</sup>
Hmotnost plachty	250 kg
Odrazivost plachty	85 % - 88 %
Zrychlení v okolí Země	0,12 mm/s <sup>2</sup>
Tvar plachty	čtverec

2. Dalším návrhem byl projekt japonské skupiny SSUJ. Pro měsíční závod byla nakonec vybrána konfigurace s plachtou o rozměrech 30 m x 30 m s celkovou hmotností kolem 96 kg.
3. Největší zkušenosti s vývojem slunečních plachetnic měly v té době USA, které na jejich vývoji pracovaly od roku 1975 nejprve v Laboratoři aplikované fyziky (APT<sup>9</sup>) J. Hopkinse, v MIT<sup>10</sup> a později i v WSF. Studie uvažovaly různé geometrie plachet. Od heliogyra stabilizovaného rotací až ke kruhové plachtě. Pro závod k Měsíci byla vybrána koncepce tříose stabilizované čtvercové plachty o délce strany 55 m, tvořené mylarovou fólií o tloušťce 2,54 μm. Předpokládalo se, že je tento rozměr největší možný, který je ještě napnutelný pomocí výsuvných tyčí bez pomoci vodících drátů. Vysunování tyčí by bylo zprostředkováváno mechanismem, který by se před startem plachetnice odhodil. Ve středu plachty by se nacházela na 3 m dlouhém nosníku TV kamera.

6 WSF - World Space Foundation

7 JPL - Jet Propulsion Laboratory

8 Solar Sail Union of Japan

9 APT - Applied Physics Laboratory

10 MIT - Massachusetts Institute of Technology

Pro cestu k Měsíci měly být všechny 3 lodě dopraveny na oběžnou dráhu jako náklad rakety Ariane 4. Měly být složeny v adaptéru Sylda, určeném pro vypouštění 2 družic, v prostoru pro druhou družici [17]. Po vynesení na dráhu 25 – 36 000 km mělo být perigeum změněno pomocí motorického manévru na výšku 15 000 km – 50 000 km. Následující 2 až 3 týdny mělo být prováděno zkušební manévrování na oběžné dráze Země. Pak by plachetnice „stoupaly“ k Měsíci po spirálovité dráze (kvůli stálému tlaku záření). Američané předpokládali pokračování letu k Marsu, ale ani tento program nebyl uskutečněn.

Kosmonauti na orbitální stanici Mir se pokoušeli vypustit zrcadlo kruhového tvaru, které by bylo možné chápat jako jistého předchůdce sluneční plachetnice. Šlo však jen o model, protože zrychlení zrcadla bylo velice malé [18].

V historii slunečních plachetnic osmdesátých let měla své místo i pražská skupina LSG a její návrh. Tato skupina se zabývala konstrukčními otázkami slunečních plachetnic pro již zmiňovaný závod Země – Měsíc. Skupina byla soustředěna kolem ing. Marcela Grüna. Nejdříve byly diskutovány základní otázky související s touto problematikou. Skupina se dále věnovala „minimální sluneční plachetnici“ tvořenou čtyřmi křídly s centrální konstrukcí a užitným zatížením. K otevření plachty se měla použít odstředivá síla. K dalšímu mechanismu zpevnění patřila metoda ztuhnutí polymeru pod vlivem UV záření. Tím by se plachta zafixovala. Skupina pracovala ještě na dalších metodách rozevírání plachet a jejich zpevňování.

Současné projekty slunečních plachetnic jsou skromnější, kladou si za cíl spíše v praxi ověřit využití tlaku elektromagnetického záření.

V roce 1997 dostal vývoj slunečních plachetnic další impuls. Evropská kosmická agentura ESA podpořila program organizace UNESCO, který byl nazván „Star of Tolerance“. Tento projekt byl navržen N. Razavim z Paříže. Měl symbolizovat globální komunikaci mezi národy a přispět ke snížení počtu válek. Měl být symbolem mezilidské tolerance. Cílem projektu bylo vypustit sluneční plachetnici s plachtou o ploše 1600 m<sup>2</sup>, která by byla vidět na celé Zemi. Plachetnice by 2 roky obíhala kolem planety a pak odletěla dál do kosmického prostoru. ESA ve spolupráci s německou kosmickou agenturou DLR investovala do vývoje modelu 1,5 mil. DEM. Tento projekt ještě není dokončen a pravděpodobně nikdy nebude.

Skupina U3P chtěla uskutečnit závody v období mezi roky 2004 – 2005 na dráze Země – Měsíc, ale tento projekt také skončil neúspěchem.

V roce 2005 způsobilo selhání nosné rakety Volna zkázu sluneční plachetnice Cosmos 1 [19] [20]. Tento projekt měl v praxi ověřit použití mikrovláknového záření ze Země místo tlaku slunečního záření.

Vývoj slunečních plachetnic probíhá nadále jak v NASA [21], tak i v ESA [22].

V této práci se pokusím vytvořit ucelený úvod do teorie letu sluneční plachetnice. Rozeberu zde fyzikální aspekty jejího letu a pomocí numerických simulací popíši vhodné strategie pohybu. Nebudu se zde zabývat odpoutáváním z gravitačního pole Země nebo manévry na její oběžné dráze. Budu se soustředit především na lety po sluneční soustavě a na cesty do heliopausy. Konstrukční problémy slunečního plachtění nebudou předmětem této práce.

## 2. Použitá zjednodušení

V této práci budu užívat jistá zjednodušení reality:

Při výpočtech a simulacích se omezím pouze na newtonskou fyziku. Rychlosti, kterými se budou plachetnice v mých modelech pohybovat nejsou ještě dostatečně vysoké k tomu, aby rozdíl mezi Newtonovou a Einsteinovou fyzikou způsobil výraznější chybu.

Dalším zjednodušením je, že se budu zabývat pouze dokonalými plachetnicemi, které budou tvořeny libovolně natočitelnou plachtou. Nebudu se starat o konstrukční aspekty tohoto problému. K uspokojivému zpracování tohoto tématu by byla potřeba práce mnohem většího rozsahu než je má.

Ve výpočtech budu zohledňovat pouze tlak záření. Tlak slunečního větru si dovolím zanedbat. Jeho intenzita je asi 1000 krát menší než intenzita tlaku fotonů.

Složitě matematické popisy letu sluneční plachetnice s natočitelnou plachtou nahradím výsledky diskrétních numerických simulací.

Dráhu Země budu považovat za kruhovou ve vzdálenosti 1 AU od Slunce.



### 3. Využití zářivého výkonu hvězdy

Slunce produkuje obrovské množství energie ve formě záření skrze celé elektromagnetické spektrum, které je možné použít jako zdroj zrychlení pro sluneční plachetnice.

$$\text{Zářivý výkon Slunce je: } L_S = 3,827 \times 10^{26} \text{ W} \quad (1)$$

Budu předpokládat, že Slunce emituje toto záření z celého povrchu rovnoměrně. Z toho vyplývá, že ve vzdálenosti  $l$  dopadne na plochu  $S$  za čas  $t$  energie  $E(t)$ :

$$E(t) = tS \frac{L_S}{(4\pi l^2)} \quad (2)$$

protože s rostoucí vzdáleností od zdroje na druhou musí klesat intenzita (v určité vzdálenosti musí být vždy konstantní součin povrchu koule o poloměru rovném vzdálenosti  $l$  a intenzity dopadajícího záření na jednotku plochy).

Podle Einsteinova vztahu:

$$E = mc^2 \quad (3)$$

který vyjadřuje vztah mezi energií a hmotou platí:

$$m(t) = tS \frac{L_S}{(4\pi l^2 c^2)} \quad (4)$$

(hmota ekvivalentní přijaté energii za čas  $t$  je  $m(t)$ ; vztah vznikl sloučením vztahu (3) a (2)).

Tato „hmota“ se pohybuje rychlostí  $c$ . Její hybnost je tedy:

$$p_m(t) = tS \frac{L_S}{(4\pi l^2 c)} \quad (5)$$

Při absorpci tohoto záření přijme plachetnice také jeho hybnost.

Síla působící po čas, odpovídá změně hybnosti.

Z toho vyplývá, že síla působící na plachtu je:

$$F = S \frac{L_S}{(4\pi l^2 c)} \quad (6)$$

(vztah vznikl dělením vztahu (5) časem  $t$ ).

## 4. Tlak záření

Síla působící na plachtu o ploše  $S$  je:

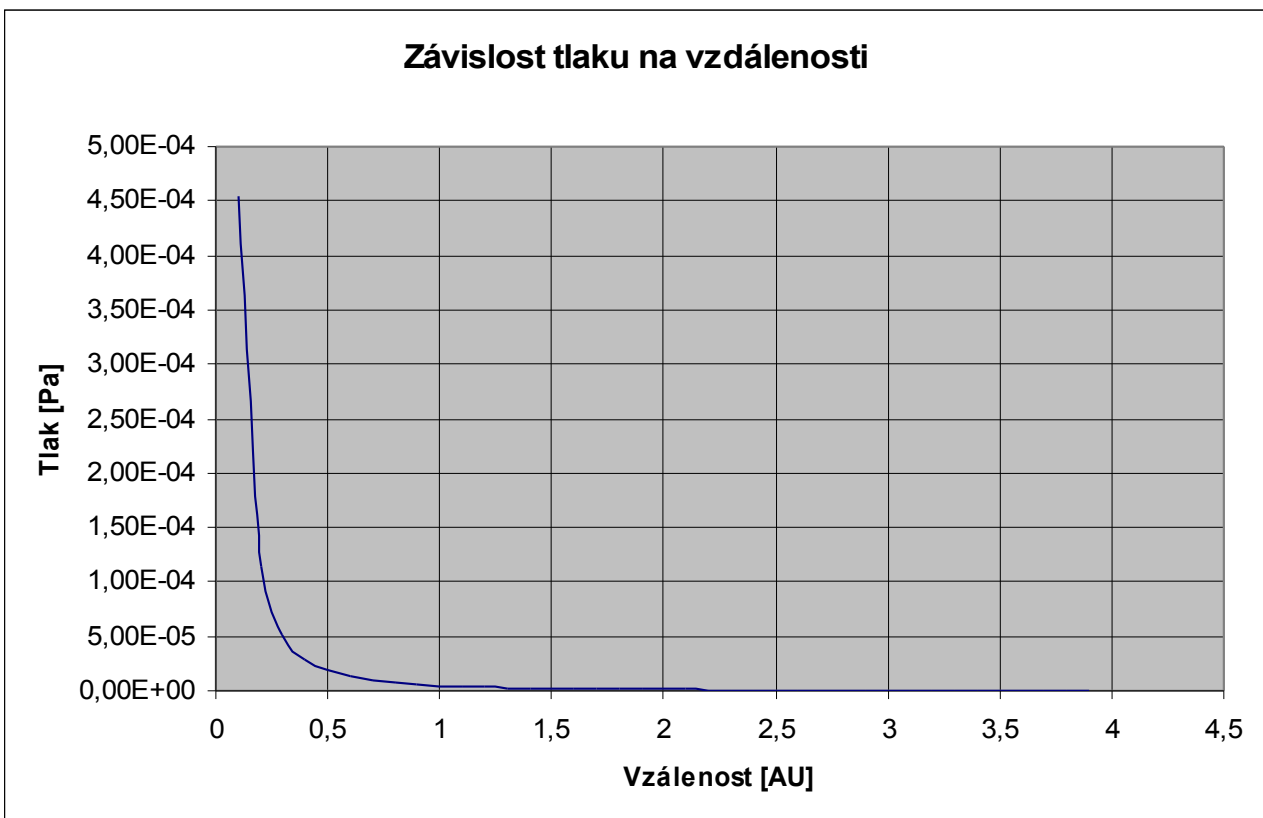
$$F = S \frac{L_s}{(4 \pi l^2 c)} \quad (7)$$

Tlak je síla dělená plochou. Z toho vyplývá:

$$p(l) = \frac{L_s}{(4 \pi l^2 c)} \quad (8)$$

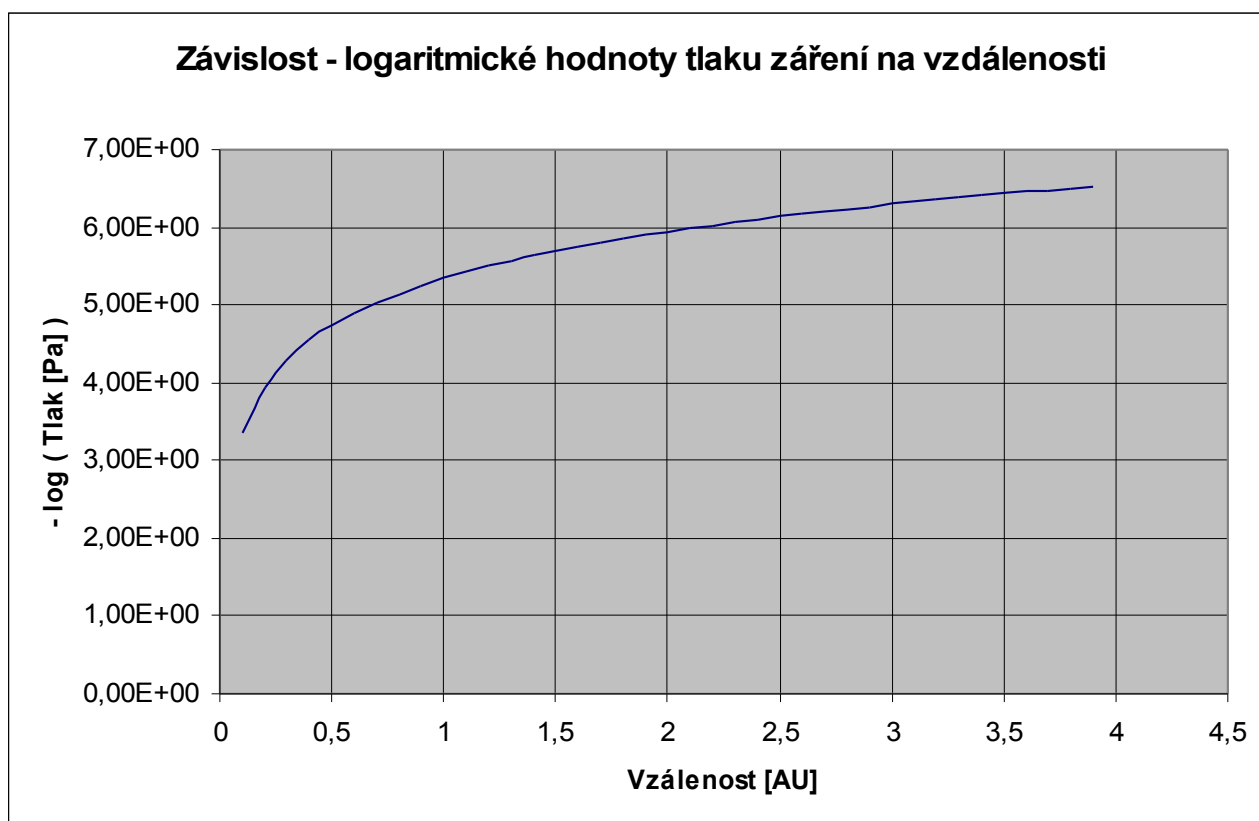
Tím jsem určil tlak emitovaného záření ve vzdálenosti  $l$  od hvězdy.

Pro hvězdu o zářivém výkonu Slunce  $L_s = 3,827 \times 10^{26} \text{ W}$  vypadá graf tlaku záření v závislosti na vzdálenosti takto:



Z grafu je jasně vidět, že tlak záření ve vzdálenosti Země je velice malý.

Zde je graf zobrazující absolutní hodnotu dekadického logaritmu tlaku záření v závislosti na vzdálenosti od Slunce:



V reálném případě bude tlak záření působící na plachtu nižší, protože plachta nedokáže zachytit v plném rozsahu fotony všech vlnových délek. Na druhou stranu bude tlak na plachtu zvyšovat tok částic pocházejících ze Slunce. Síla, jíž působí částice je ale mnohem menší než síla, kterou působí fotony.

## 5. Gravitační síla

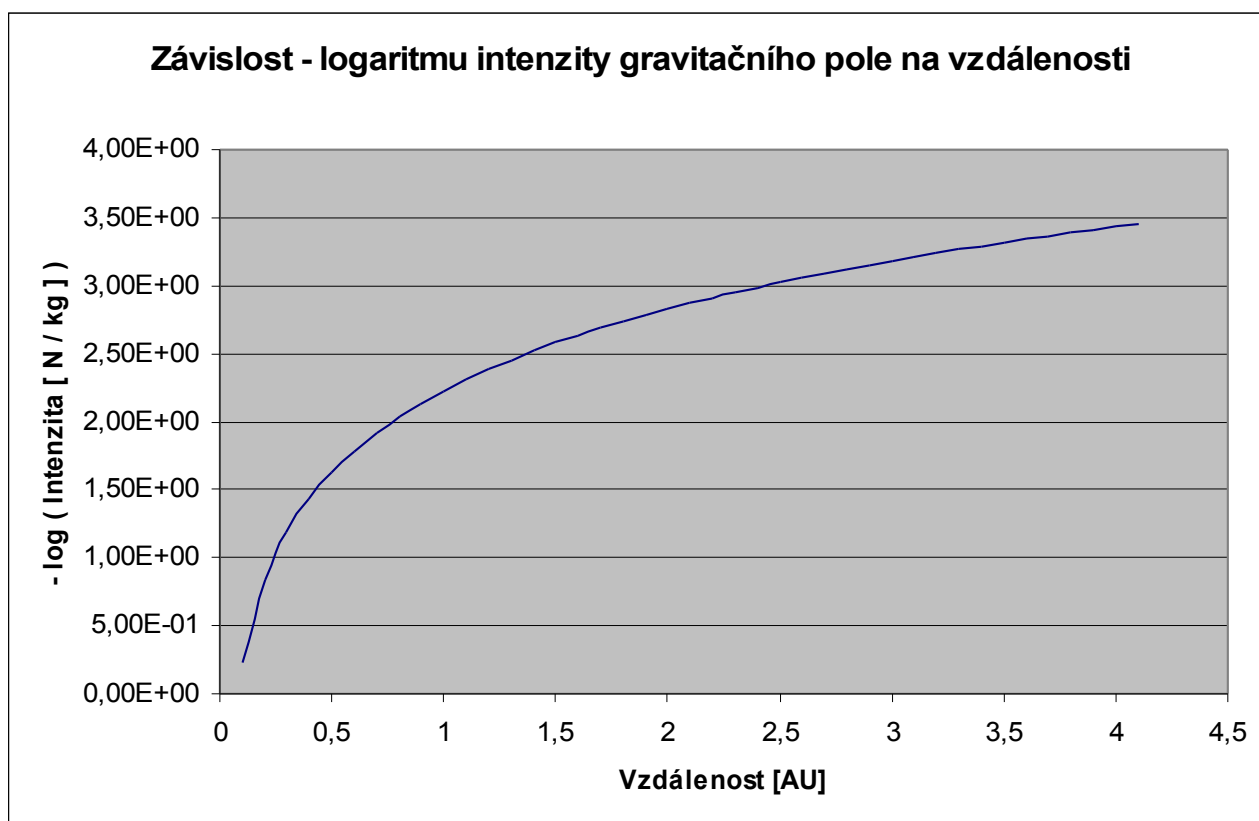
Intenzita gravitačního pole hvězdy ve vzdálenosti  $l$  je:

$$K(l) = \kappa \frac{M}{l^2} \tag{9}$$

kde  $\kappa$  je gravitační konstantou a  $M$  hmotností hvězdy.

Jednotkou intenzity  $K$  je  $N \cdot kg^{-1}$ .

Zde je graf závislosti absolutní hodnoty dekadického logaritmu intenzity gravitačního pole v  $N\ kg^{-1}$  v závislosti na vzdálenosti v astronomických jednotkách:



Naštěstí není potřeba překonávat zcela gravitační sílu objektu, na jehož oběžné dráze se plachetnice nachází. Mohu využít toho, že při startu už nějakou rychlost sluneční plachetnice má. Stačí vhodně natočit plachtu tak, aby se rychlost získaná tlakem fotonů sečetla s orbitální.

## 6. Působící síly

Bylo by energeticky nevýhodné, aby plachta fotony jen přijímala. Způsobovalo by to její nadměrný ohřev a zároveň by byla ve značné míře omezena možnost změny její trajektorie.

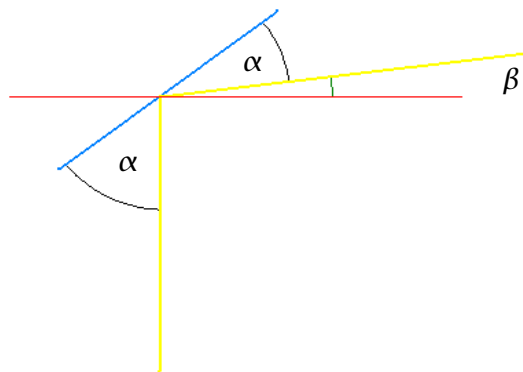
Přijímané fotony působí na plachtu silou:

$$F = S \frac{L_s}{(4 \pi l^2 c)} , \tag{10}$$

která vždy směřuje směrem od zdroje světla.

Odrazivost plachty označím  $\epsilon$ . Může nabývat hodnot od 0 do 1, kde 0 odpovídá nulové odrazivosti a 1 absolutní.

Zde je náčrt, který budu používat pro popis silového působení fotonů na plachtu:



Popis obrázku:

Žluté úsečky – paprsek světla, přicházející ze spodu a odrážející se od plachty

Modrá úsečka – plachta

Červená úsečka – kolmice na spojnici hvězda – plachta

Rovina plachty svírá s úsečkou hvězda – plachta úhel  $\alpha$ .

Plochu plachty označím  $S_r$ .

Vztah mezi velikostí parametru  $S$  (plocha plachty, která je kolmá na spojnici hvězda – plachta) a velikostí  $S_r$  (reálná plocha plachty) je:

$$S(\alpha) = S_r \sin(\alpha) \quad (11)$$

Tento vztah neplatí přesně, ale vzhledem k obrovským vzdálenostem od hvězdy si dovolím zanedbat fakt, že paprsky dopadající na plachtu nejsou rovnoběžné.

Sílu působící na plachtu rozložím na 2 složky. Složku, jejíž vektor je rovnoběžný s „červenou“ úsečkou (označím indexem  $x$ ) a složku, jejíž vektor je na tento vektor kolmý (označím indexem  $y$ ).

Síla  $F_y$  se skládá ze síly o velikosti  $F = S \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)}$  (12) a síly, kterou působí odražené fotony.

Velikost síly  $F_x$  je rovna velikosti složky síly, kterou působí odražené fotony v rovině osy  $x$ .

Úhel mezi odraženým paprskem a kolmicí na spojnici hvězda – plachta (červená úsečka) označím  $\beta$ .

Platí:

$$180^\circ = 90^\circ + 2\alpha + \beta \quad (\text{vycházím z toho, že úhel odrazu je roven úhlu dopadu}). \quad (13)$$

Ze vztahu (13) vyplývá:

$$\beta = 90^\circ - 2\alpha \quad . \quad (14)$$

Síla, kterou působí odražené fotony:

$$F_{od} = \Xi S \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)} \quad (15)$$

se rozkládá na 2 složky.

$$F_{Xod} = F_{od} \cdot \cos(90^\circ - 2\alpha) = F_{od} \cdot \sin(2\alpha) = \sin(2\alpha) \cdot \Xi S \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)} \quad (16)$$

$$F_{Yod} = F_{od} \cdot \sin(90^\circ - 2\alpha) = F_{od} \cdot \cos(2\alpha) = \cos(2\alpha) \cdot \Xi S \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)} \quad (17)$$

Na loď tedy působí rovnoběžně s osou  $x$  složka síly o velikosti:

$$F_x = \sin(2\alpha) \cdot \Xi S_r \sin(\alpha) \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)} \quad . \quad (18)$$

(rovna velikosti síly ve vztahu (16))

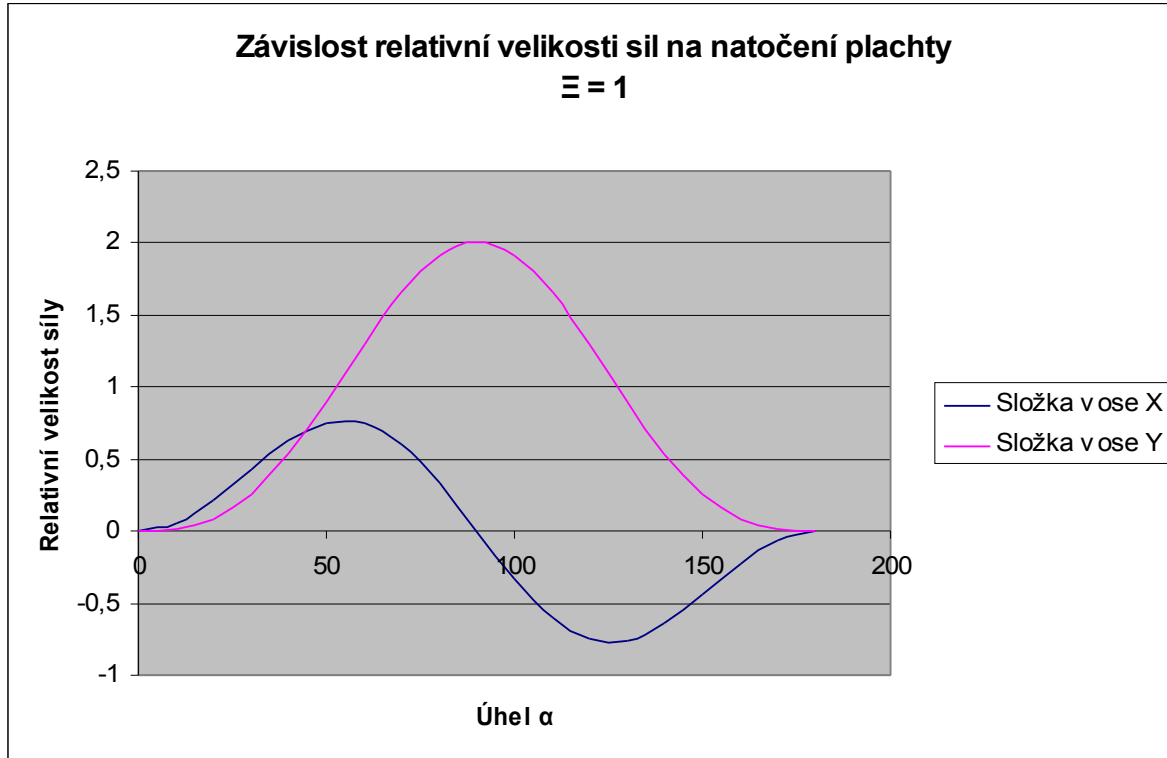
$$F_y = S \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)} - \cos(2\alpha) \cdot \Xi S \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)} = S_r \sin(\alpha) \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)} \cdot (1 - \cos(2\alpha) \cdot \Xi) \quad . \quad (19)$$

(součet sil ze vztahů (17) a (12))

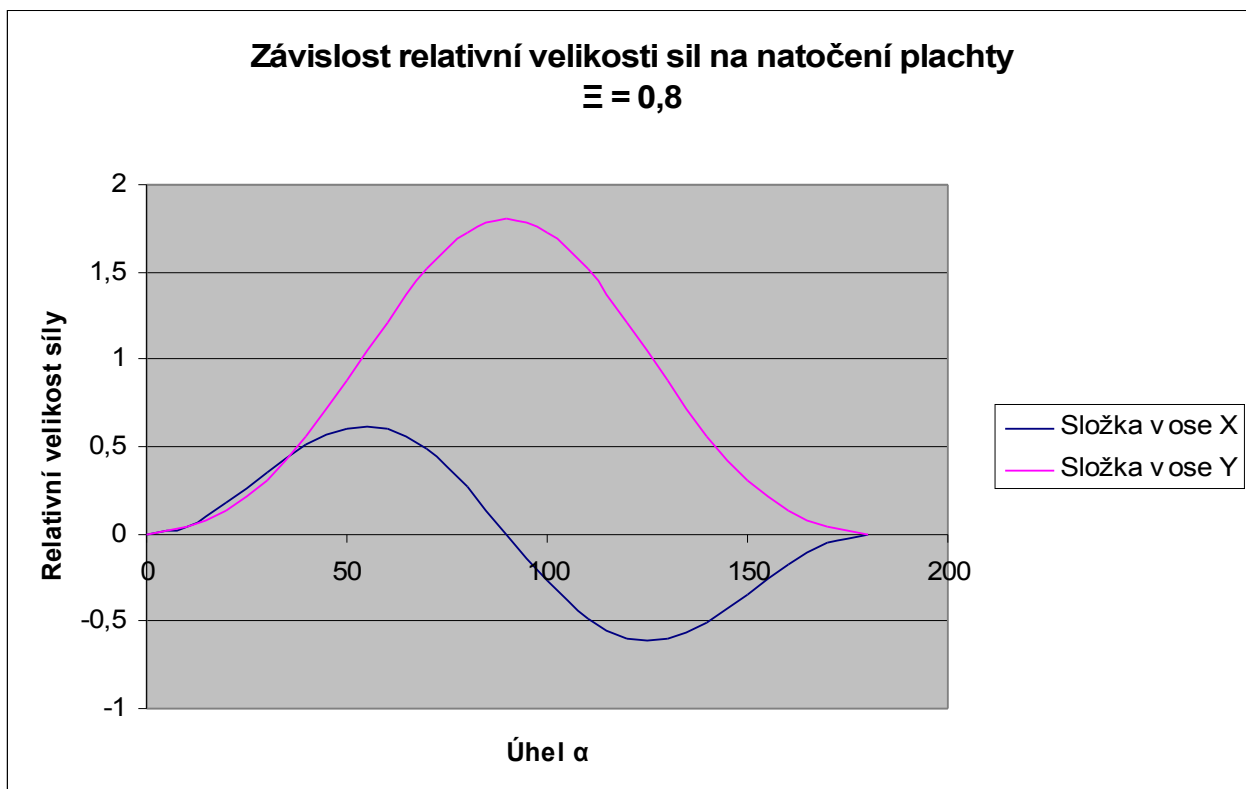
Tím jsem postihl i odraz fotonů. Tyto vztahy platí za předpokladu, že se fotony odrážení pod stejným úhlem jako dopadly.

Zde je graf závislosti velikosti relativních složek sil (síla ku  $S_r \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)}$ ) pro osy  $x$  a  $y$  na úhlu  $\alpha$ .

Pro  $\Xi = 1$  :



Pro  $\Xi = 0,8$  :



## 7. Zatížení plachty

Intenzita gravitačního pole závisí na převrácené hodnotě druhé mocniny vzdálenosti. Velikost tlaku slunečního světla závisí též na převrácené hodnotě druhé mocniny vzdálenosti.

$$K(l) = \kappa \frac{M}{l^2} \quad (20)$$

$$p(l) = \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)} \quad (21)$$

Zavedeme si novou proměnnou  $\Theta$ , která určuje celkové zatížení sluneční plachty na  $m^2$ .

$$m_0 = S_r d \rho \quad (22)$$

kde  $S_r$  je plocha plachty,  $d$  je tloušťka plachty a  $\rho$  hustota materiálu, ze kterého je vyrobena.

$m$  je hmotnost nákladu (toho co nezahrnuje do odrazné plochy).

Tím, že spočítám celkovou hmotnost (součet (22) a  $m$ ) a vydělím plochou plachty  $S_r$  získám:

$$\Theta = d \rho + \frac{m}{S_r} \quad (23)$$

Hmotnost lodi je pak:

$$m_l = \Theta S_r \quad (24)$$

Pokud bych chtěl gravitaci Slunce překonávat jen za pomoci tlaku fotonů, muselo by platit:

$$S_r \sin(\alpha) \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)} \cdot (1 - \cos(2\alpha) \cdot \Xi) > \Theta S_r \kappa \frac{M}{l^2} \quad (25)$$

z toho vyplývá:

$$\Theta < \sin(\alpha) \frac{L_s}{(4\pi c \kappa M)} \cdot (1 - \cos(2\alpha) \cdot \Xi) \quad (26)$$

Pro  $\Xi = 0,9$ ,  $\alpha = 90^\circ$  a Slunce platí:

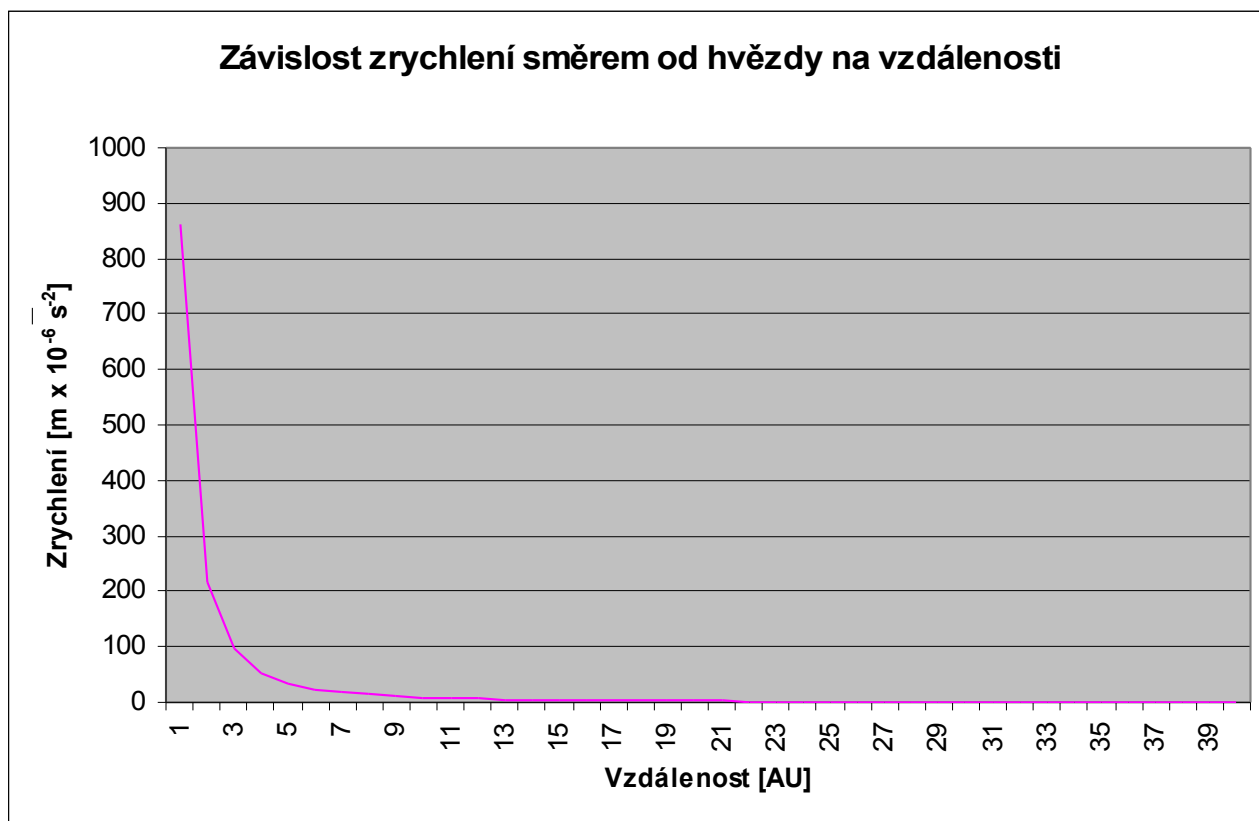
$$\Theta < 1,455 \text{ gm}^{-2}$$

Zde je graf závislosti složky zrychlení, která je rovnoběžná se spojnicí hvězda - plachetnice na vzdálenosti od Slunce.  $\Xi = 0,9$   $\alpha = 90^\circ$



Toto zrychlení má velikost:

$$a_Y = \sin(\alpha) \frac{(L_S(1 - \cos(2\alpha) \cdot E))}{(4\pi l^2 c \Theta)} \quad (27)$$



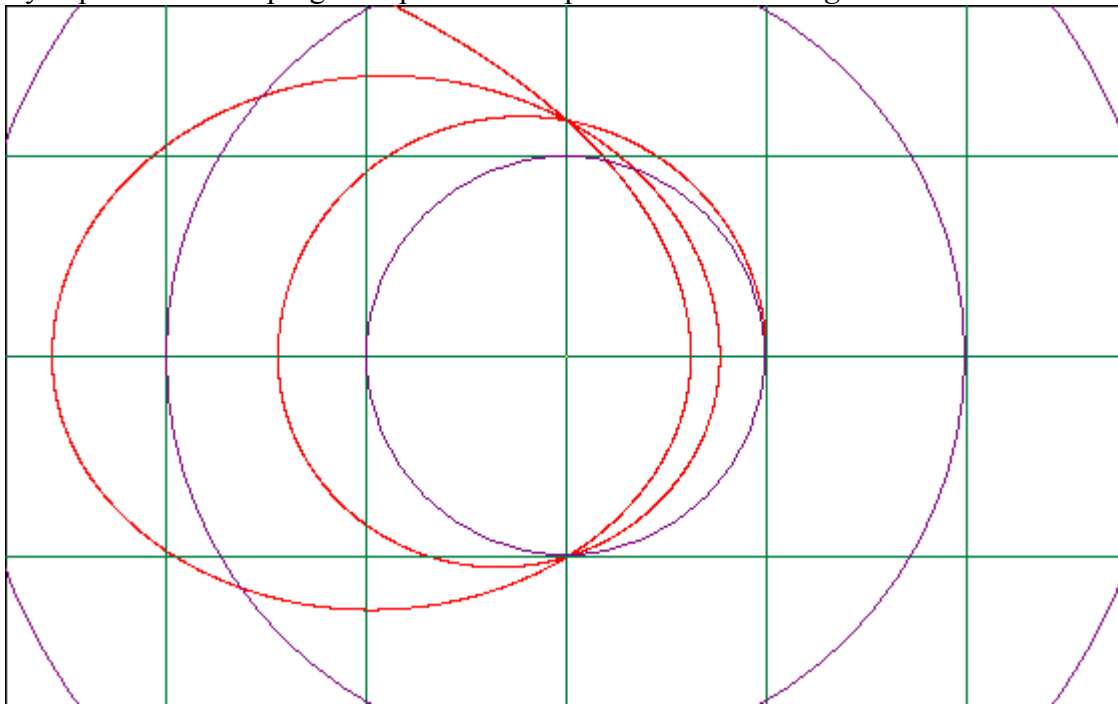
## 8. Manévry

Pro zobrazení manévřů v prostoru budu používat souřadný systém dvou typů. Prvním je klasický kartézský, který reprezentuje čtvercová síť (zelená barva). Druhý systém je reprezentován soustřednými kružnicemi se středem ve Slunci (fialové kružnice). Červená stopa je zobrazením trajektorie plachetnice.

Sluneční plachetnice může manévrovat v prostoru několika způsoby:

Prvním způsobem je protahování oběžné dráhy. Tento postup je velmi jednoduchý po výpočetní stránce, ale jeho efektivita je nízká. Dosažení cíle trvá dlouho a trajektorie není v žádném případě ideální. Úhel plachty může nabývat hodnot  $90^\circ$  a  $0^\circ$ .

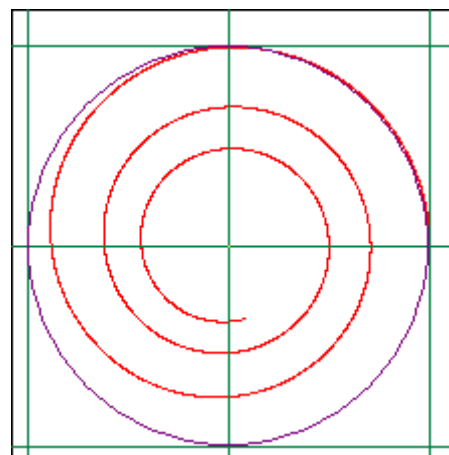
Zde je výstup simulačního programu pro sluneční plachetnici  $\Theta = 10 \text{ gm}^{-2}$  a  $E = 1$  :



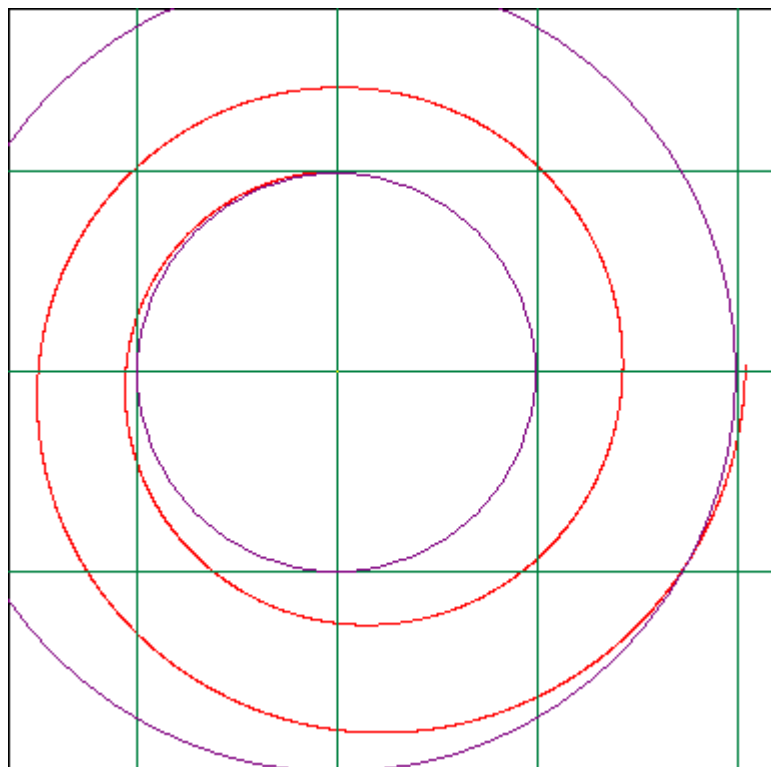
(zelený čtverec má stranu délky 1 AU a Slunce leží ve středu fialových kružnic)

Druhým, mnohem efektivnějším způsobem, je natáčení plachty v celém rozsahu úhlů ( $0^\circ$  až  $180^\circ$ ). Tento postup umožňuje měnit oběžné dráhy efektivně a rychle. Loď může zvyšovat nebo snižovat svou vzdálenost od hvězdy po trajektorii, která připomíná spirálu nebo získat únikovou rychlost provedením takzvaného H-reversal manévru. Ten spočívá v jakémsi přibrzdění a obrácení směru rotace kolem hvězdy.

Příklad klesání po spirále pro loď s  
 $\Theta = 20 \text{ gm}^{-2}$  ,  $E = 1$  a  $\alpha = 135^\circ$  :



Příklad stoupání po spirále pro loď s  $\Theta=20 \text{ gm}^{-2}$  ,  $E=1$  a  $\alpha=45^\circ$  :

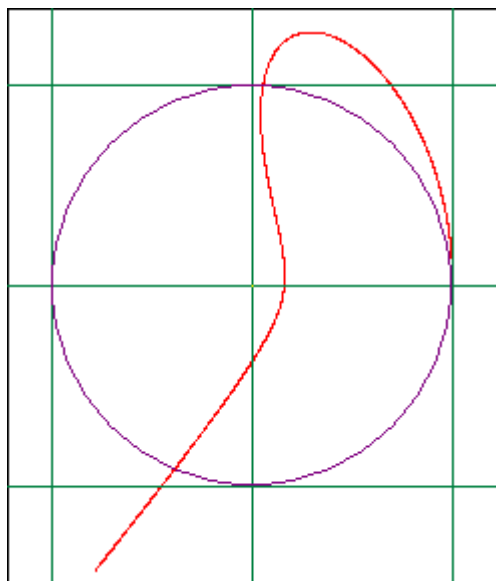


(velikost strany zeleného čtverce je 1 AU a Slunce leží ve středu fialových kružnic)

Z grafů výše je patrné, že optimální úhel pro nejrychlejší stoupání je  $45^\circ$  a pro nejrychlejší klesání  $135^\circ$ .

Pro extrasolární lety je vhodné použít H-reversal manévr.

Zde je ukázka H-reversal manévru s lodí s  $\Theta=2 \text{ gm}^{-2}$  ,  $E=1$  a  $\alpha=120^\circ$  :



Sluneční plachetnice se při tomto manévru při protnutí dráhy Země pohybuje poprvé rychlostí  $14 \text{ km s}^{-1}$  a podruhé rychlostí  $90 \text{ km s}^{-1}$ .

Největší přiblížení ke Slunci je v tomto případě  $0,158 \text{ AU}$ . Tento manévr tedy klade velké nároky na konstrukci lodi a materiál plachty. Při těsném průletu kolem hvězdy se bude odrazná plocha nadměrně ohřívat.

## 9. Působení tlaku záření

Nyní se zaměřím na efekt tlaku záření, který se ve výsledku projeví zmenšením síly působící směrem ke hvězdě.

Zrychlení vyvolaná tlakem fotonů:

$$a_y = \sin(\alpha) \frac{(L_S(1 - \cos(2\alpha)) \cdot \Xi)}{(4\pi l^2 c \Theta)} \quad (28)$$

Zrychlení způsobené gravitační silou:

$$a_g = \kappa \frac{M}{l^2} \quad (29)$$

$M_2$  je hmotnost, která působí gravitační silou, která je rovna rozdílu velikosti gravitační síly hmotnosti  $M$  a síly, kterou působí tok fotonů (to vše v určité vzdálenosti).

$$M_2 = M - \sin(\alpha) \frac{(L_S(1 - \cos(2\alpha)) \cdot \Xi)}{(4\pi c \Theta \kappa)} \quad (30)$$

(sloučení vztahů (28) a (29))

Je vidět, že ze vzorce zmizela vzdálenost  $l$  od středu hvězdy.

$$\text{Poměr mezi hmotnostmi je } \gamma = \frac{M_2}{M} \quad (31)$$

Z toho plyne:

$$\gamma = 1 - \sin(\alpha) \frac{(L_S(1 - \cos(2\alpha)) \cdot \Xi)}{(4\pi c \Theta \kappa M)} \quad (32)$$

Tento vztah využiji hned v další části práce pro výpočet změny excentricity dráhy.

## 10. Úniková rychlost

K tomu, aby sonda o hmotnost  $m$  opustila gravitační vliv nějakého tělesa o hmotnosti  $M$ , musí mít ve směru spojnice těleso – loď únikovou rychlost.

Potenciální energie gravitačního pole ve vzdálenosti  $l$  od těžiště tělesa o hmotnosti  $M$  odpovídá:

$$E_p = -\kappa \frac{Mm}{l} \quad (33)$$

Kinetická energie odpovídající únikové rychlosti musí být větší nebo rovna energii pro přesun sondy do nekonečné vzdálenosti.

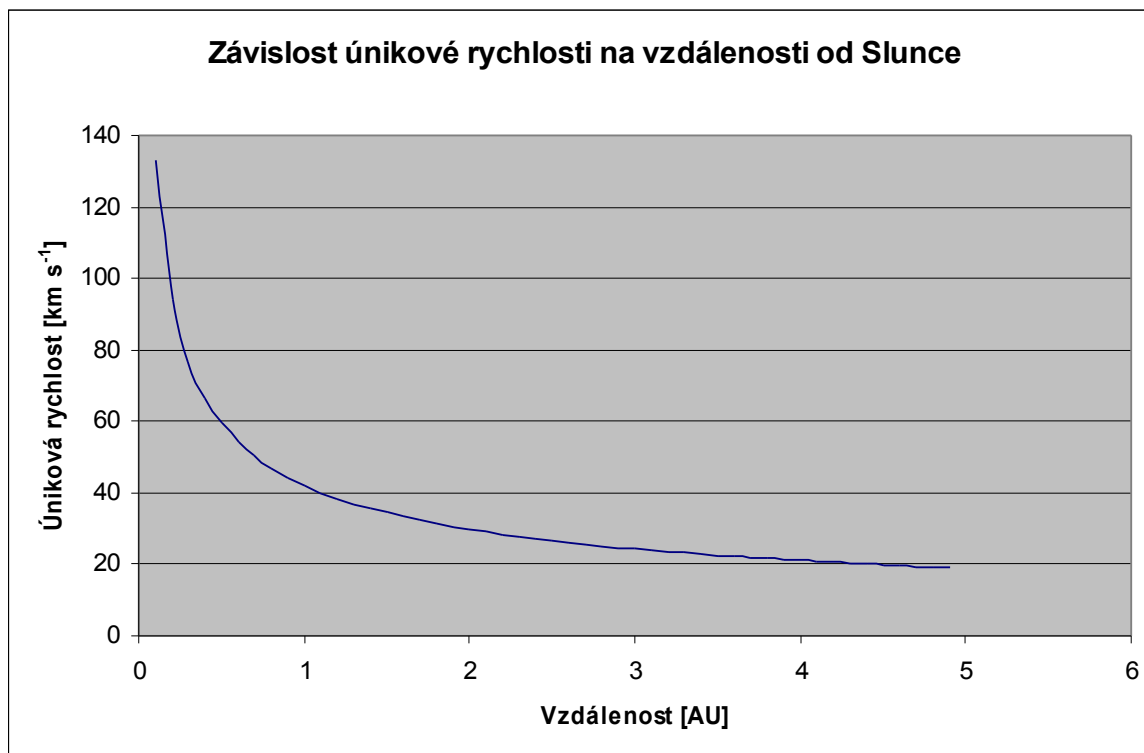
Proto:

$$\kappa \frac{Mm}{l} = \frac{1}{2} m v_u^2 \quad (34)$$

z toho plyne:

$$\sqrt{\left(\kappa \frac{2M}{l}\right)} = v_u \quad (35)$$

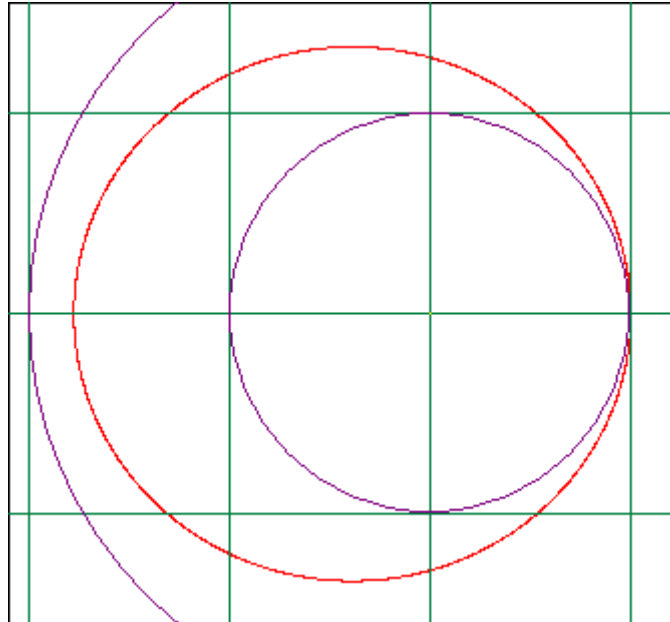
Pro hmotnost Slunce vypadá graf závislosti únikové rychlosti na vzdálenosti  $l$  takto:



## 11. Změna excentricity dráhy

Nejjednodušším manévrem sluneční plachetnice, při němž je úhel  $\alpha=90^\circ$  konstantní, je změna parametrů dráhy.

Zde je výřez z výstupu simulačního programu:



Ve středu fialových kružnic je Slunce. Velikost strany zeleného čtverce je 1 AU. Červená stopa je trajektorie sluneční plachetnice.

Plachetnice startuje z kruhové oběžné dráhy o velké poloose 1 AU s otevřenou plachtou a  $\alpha=90^\circ$ . Místo startu se stane periheliem a plachetnice přejde na stabilní eliptickou dráhu, která odpovídá oběžné dráze kolem hvězdy s výše určenou hmotností  $M_2$  (vztah (30)). Slunce leží v jednom z ohnisek nové dráhy.

Nyní určím vzdálenost afelia od hvězdy.

Celková mechanická energie plachetnice se během pohybu po elipse nemění. To je v souladu se zákonem zachování energie.

Celková mechanická energie :

$$E = \frac{1}{2} m_l v_p^2 - \kappa (M - \sin(\alpha) \frac{(L_s(1 - \cos(2\alpha)) \cdot E)}{4\pi c \Theta \kappa}) \frac{m_l}{r_p} \quad (36)$$

Ze zákona zachování momentu hybnosti vyplývá:

$$v_a r_a = v_p r_p \quad (37)$$

kde na levé straně leží parametry afelia a na pravé perihelia.

Energie v afeliu a periheliu se musí rovnat hodnotě určené ve vztahu (36).

Platí:

$$v_p^2 - \kappa \frac{M_2}{r_p^2} = v_a^2 - \kappa \frac{M_2}{r_a^2} \quad (38)$$

z toho vyplývá:

$$v_p^2 - \kappa \frac{M_2}{r_p^2} = v_a^2 - \kappa \frac{M_2}{(v_p r_p)} v_a \quad (39)$$

Vznikla kvadratická rovnice v normovaném tvaru:

$$v_a^2 - \kappa \frac{M_2}{(v_p r_p)} v_a - v_p^2 + \kappa \frac{M_2}{r_p^2} = 0 \quad (40)$$

Kořeny tedy jsou:

$$v_{a12} = \kappa \frac{M_2}{(v_p r_p)} \pm \sqrt{\left(\kappa^2 \frac{M_2^2}{(v_p^2 r_p^2)} - 2\kappa \frac{M_2}{r_p} + v_p^2\right)} \quad (41)$$

kde rychlost

$$v_a = \kappa \frac{M_2}{(v_p r_p)} - \sqrt{\left(\kappa^2 \frac{M_2^2}{(v_p^2 r_p^2)} - 2\kappa \frac{M_2}{r_p} + v_p^2\right)} \quad (42)$$

a

$$v_p = \kappa \frac{M_2}{(v_p r_p)} + \sqrt{\left(\kappa^2 \frac{M_2^2}{(v_p^2 r_p^2)} - 2\kappa \frac{M_2}{r_p} + v_p^2\right)} \quad (43)$$

Ze vztahu  $v_a r_a = v_p r_p$  (vztah (37)) získám:

$$r_a = \frac{(v_p r_p)}{\left(\kappa \frac{M_2}{(v_p r_p)} - \sqrt{\left(\kappa^2 \frac{M_2^2}{(v_p^2 r_p^2)} - 2\kappa \frac{M_2}{r_p} + v_p^2\right)}\right)} \quad (44)$$

Po dosazení získám vztah, který se mi nevejde na stránku, proto ho sem v zájmu přehlednosti nebudu vkládat.

Zde je substituce:

$$M_2 = M - \sin(\alpha) \frac{(L_S (1 - \cos(2\alpha)) \cdot \Xi)}{(4\pi c \Theta \kappa)} \quad (45)$$

Když znám hodnoty  $r_a$  a  $v_a$ , získám hodnotu  $r_p$  takto:

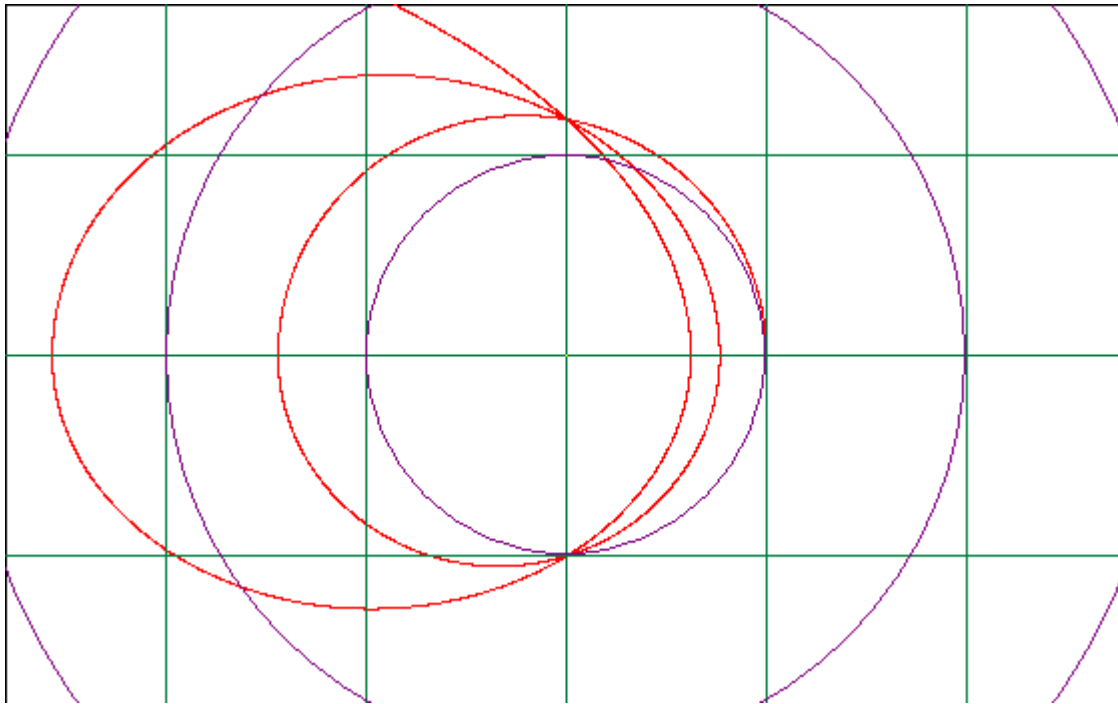
$$r_p = \frac{(v_a r_a)}{\left(\kappa \frac{M_2}{(v_a r_a)} + \sqrt{\left(\kappa^2 \frac{M_2^2}{(v_a^2 r_a^2)} - 2\kappa \frac{M_2}{r_a} + v_a^2\right)}\right)} \quad (46)$$

Vztah (46) je obdobný vztahu (44). Stačí prohodit dolní indexy  $p$  za  $a$  a naopak.

Budu předpokládat, že se plachta může otočit do stavu  $\alpha=90^\circ$  a  $\alpha=0^\circ$  okamžitě. To značně zjednoduší výpočet.

V případě, že je potřeba udržovat apsidní přímku pořád na stejném místě, je ideální strategií pro protahování dráhy nastavit v afeliu úhel na  $\alpha=0^\circ$  a v periheliu na  $\alpha=90^\circ$ . Trajektorie je pak postupně protahována podle vztahů (46) a (44).

Zde je příklad s lodí s  $\Theta=10 \text{ gm}^{-2}$  a  $\mathcal{E}=1$  :

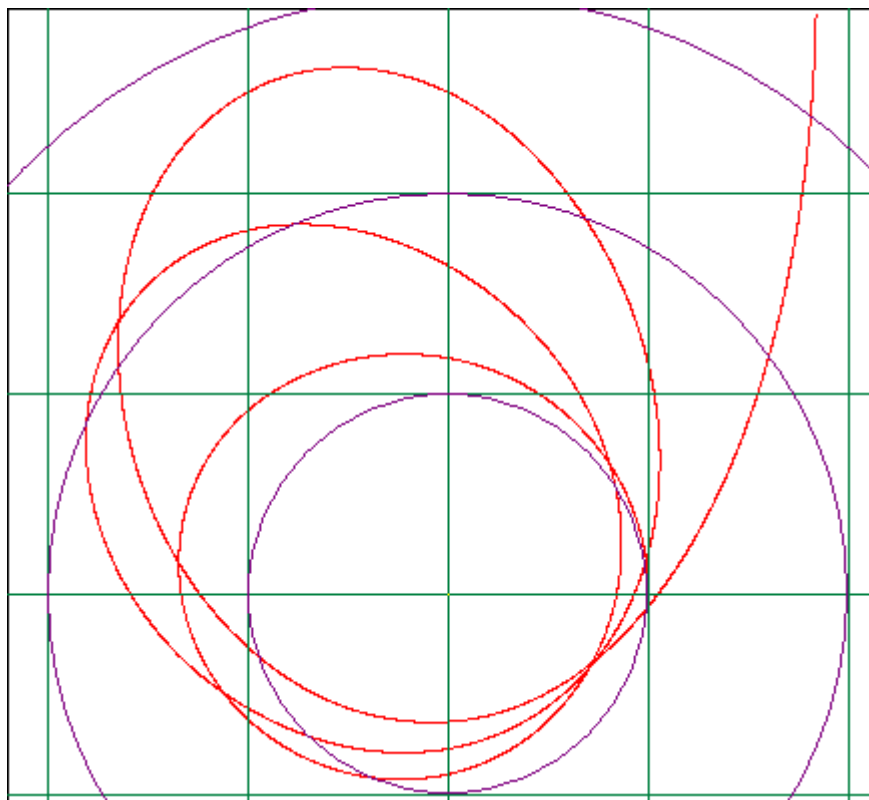


Průsečíky drah budou ležet vždy na stejném místě.

Lod' v periheliu nastaví úhel na  $\alpha=90^\circ$  a v afeliu na  $\alpha=0^\circ$ . Jak je vidět na obrázku, apsidní přímka (spojnice perihelia a afelia) je pořád na stejném místě.



Zde je příklad lodi se stejnými parametry u níž je provedena změna úhlu alfa dříve než loď dosáhne apsidní přímky předchozího oběhu:



Je patrné, že se celá trajektorie začne stáčet (spojnice perihelia a afelia mění svou polohu).

Na obou výřezech má strana zeleného čtverce rozměr 1 AU a Slunce se nachází ve středu fialových kružnic.

## 12. Teplota plachty

Protože v reálném případě je  $\Xi$  vždy menší než 1, musí nějaká energie v plachtě zůstat.

Energie přijatá plachtou za čas  $t$  je:

$$E(t) = tS \frac{L_s}{(4\pi l^2)} \quad (47)$$

Z toho v plachtě zůstane:

$$E_z(t) = (1 - \Xi)tS \frac{L_s}{(4\pi l^2)} \quad (48)$$

Jediným způsobem snížení vnitřní energie plachty je její vyzáření. Použijí vztah pro záření

absolutně černého tělesa:

$$E_v = \sigma T^4 S_r t \quad (49)$$

(nepoužil jsem  $S$ , protože plachta vyzařuje celou svou plochou)

Plachta ale vyzařuje teplo na obě strany, tudíž musí platit:

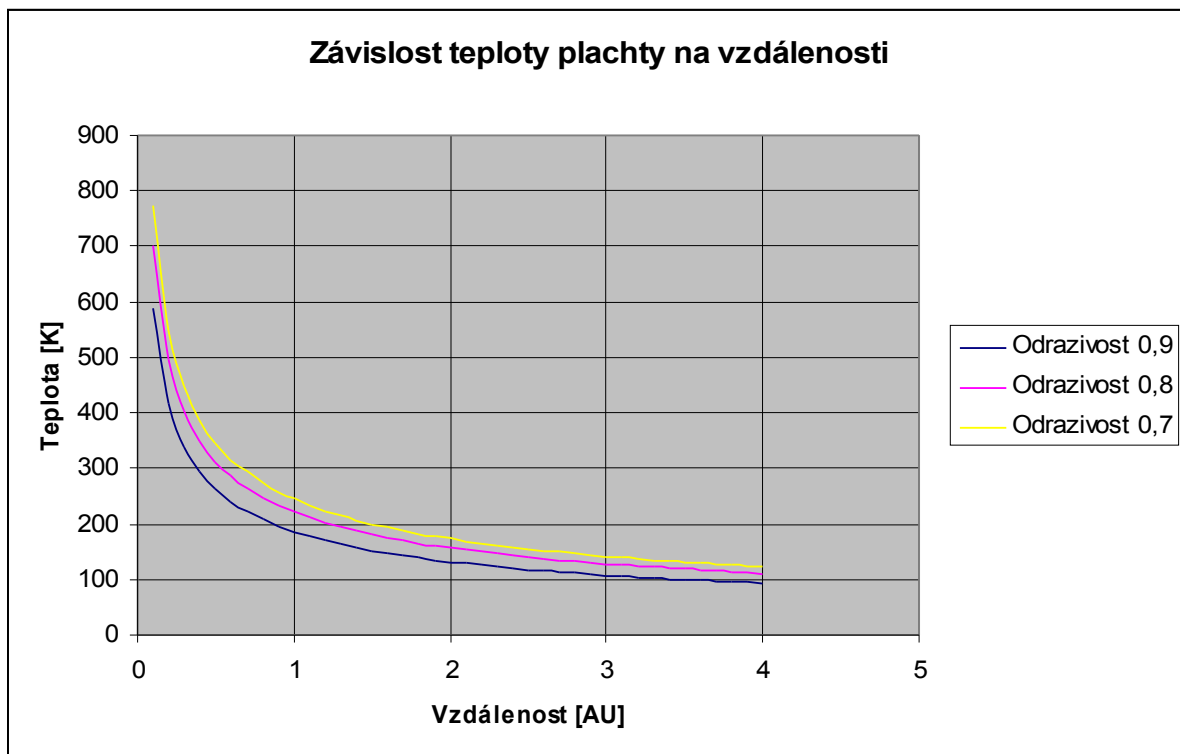
$$2 \sigma T^4 S_r t = (1 - \varepsilon) t S \frac{L_s}{(4 \pi l^2)} \quad (\text{sloučení vztahů (49) a (48)}) \quad (50)$$

Aby se teplota plachty neměnila, musí být přijatá energie rovna vyzářené. Z toho plyne:

$$T = \sqrt[4]{\left( (1 - \varepsilon) \sin(\alpha) \frac{L_s}{(8 \pi l^2 \sigma)} \right)} \quad (51)$$

Tloušťku materiálu jsem zanedbal, protože její vliv na teplotu je velice malý.

Zde je graf závislosti ustálené teploty plachty na vzdálenosti od Slunce:



V případě, že by vyzařování na obou stranách plachty nebylo stejné, mohl by jejich rozdíl ovlivňovat dráhu lodě. Tento fakt si ale kvůli jeho efektu dovoluji zanedbat.

## 13. Popis simulace

Vhledem k tomu, že matematika popisující komplikovaný let sluneční plachetnice, jejíž plachta se může libovolně natáčet, je velice složitá, použil jsem k určení parametrů trajektorií simulační program.

Diskrétní simulace spočívá v rozdělení času na malé kroky o velikosti  $dt$ , pro které dopočítávám změny poloh a rychlostí. Simulace je v mém případě prováděna v 2D prostoru..

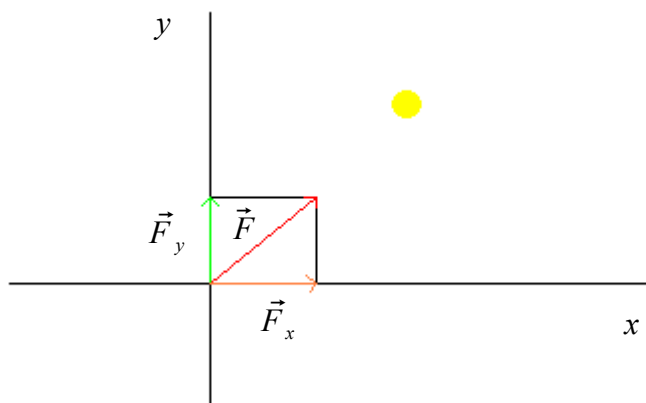
Na let plachetnice má vliv několik sil:

1. Gravitace (hmotných objektů, které jsou do simulace zahrnuty)
2. Tlak záření, které je přijímáno
3. Tlak odraženého záření

Vhledem k tomu, že používám 2D prostor, musím každou z těchto sil rozložit na 2 složky, složku v ose  $x$  a v ose  $y$ .

Princip toho rozdělení spočívá v jednoduchém použití goniometrie.

Zde je náskres:



Jsou na něm znázorněny obě osy, vektor gravitační síly, jeho rozklad a hvězda (žluté kolečko).

Předpokládejme, že střed hvězdy leží na souřadnicích  $[0 ; 0]$  a pozici objektu, pro který určuji sílu, definují souřadnice  $[x ; y]$  .

Velikost síly označím  $F$ . Složku rovnoběžnou s osou  $x$  označím  $\vec{F}_x$  . Složku rovnoběžnou s osou  $y$  označím  $\vec{F}_y$  .

Z Pythagorovy věty vyplývá:

$$F^2 = F_x^2 + F_y^2 \quad (52)$$

Je zřejmé, že:

$$F_x = F \frac{x}{\sqrt{(x^2 + y^2)}} \quad (53) \quad \text{a} \quad F_y = F \frac{y}{\sqrt{(x^2 + y^2)}} \quad (54).$$

V případě, že by vektor síly byl kolmý na zobrazený vektor ( (18)), pak:

$$F_x = F \frac{y}{\sqrt{(x^2 + y^2)}} \quad (55) \quad \text{a} \quad F_y = F \frac{x}{\sqrt{(x^2 + y^2)}} \quad (56).$$

Program zde zapíšeme v pseudokódu.

Zápis v pseudokódu:

*nastav počáteční parametry;*

*opakuji*

*t = t + dt;*

*urči gravitační sílu a rozlož ji do složek;*

*urči sílu, kterou působí dopadající fotony a rozlož ji do složek;*

*urči sílu, kterou působí odražené fotony a rozlož ji do složek;*

*F<sub>x</sub> = součet velikostí složek sil, které jsou rovnoběžné s osou x;*

*F<sub>y</sub> = součet velikostí složek sil, které jsou rovnoběžné s osou y;*

*a<sub>x</sub> = F<sub>x</sub> / m;*

*a<sub>y</sub> = F<sub>y</sub> / m;*

*v<sub>x</sub> = v<sub>x</sub> + a<sub>x</sub>.dt;*

*v<sub>y</sub> = v<sub>y</sub> + a<sub>y</sub>.dt;*

*x = x + v<sub>x</sub>.dt;*

*y = y + v<sub>y</sub>.dt;*

*zobraz polohu lodě;*

Struktura programu je opravdu velice jednoduchá a proto nepřikládám implementaci pro žádný konkrétní programovací jazyk.

Ve většině případů je žádoucí, aby byla trajektorie prosimulována ve všech místech stejně. V případě, že by byl program napsán podle pseudokódu, pohyb by byl při průletech blízko hvězdy velmi nepřesný.

To, že bude trajektorie všude stejně prosimulovaná zajistím změnou velikosti  $dt$  v závislosti na rychlosti plachetnice.

$$dt = dt_0 \frac{v_0}{v} \quad , \quad (\text{čím rychleji se loď pohybuje, tím menší je časový krok}) \quad (57)$$

kde  $dt_0$  je časový krok odpovídající rychlosti  $v_0$ .

## 14. Výsledky simulací

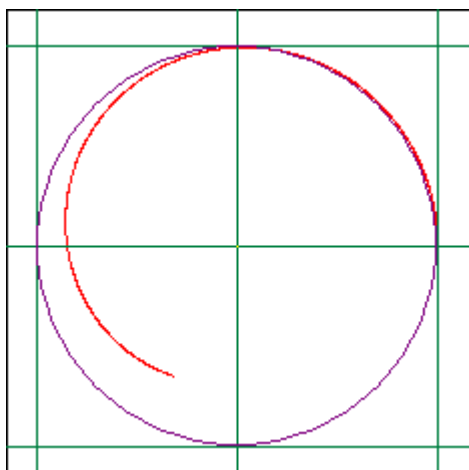
Nejdříve budu simulovat let sluneční plachetnice z oběžné dráhy Země na Venuši ve vzdálenosti 0,7233315 AU od Slunce. Sonda vybavená sluneční plachtou ponese vědecké vybavení o hmotnosti 100 kg.

Tloušťka plachty je 1 mikrometr.  
Hustota materiálu plachty je  $5000 \text{ kg m}^{-3}$ .  
Odrazivost plachty je 98%.

Plachta bude mít plochu  $10\,000 \text{ m}^2$ .

Z těchto údajů vyplývá, že  $\Theta = 15 \text{ gm}^{-2}$ . (použiji vztah (23))

Trajektorie pak vypadá takto:



(zelený čtverec má stranu délky 1 AU a Slunce je ve středu fialových kružnic)

Cesta na Venuši trvala v tomto případě 0,62 roku, což je 7 měsíců a 13 dnů. Loď přilétla na oběžnou dráhu Venuše rychlostí  $35,33 \text{ km s}^{-1}$ . Tato rychlost je trochu vyšší než kruhová oběžná rychlost v této vzdálenosti, proto je možné navést sondu na stabilní orbitální dráhu s malou excentricitou. To je ale v případě, že dosáhne Venuše zbytečně, protože loď přejde na její oběžnou dráhu.

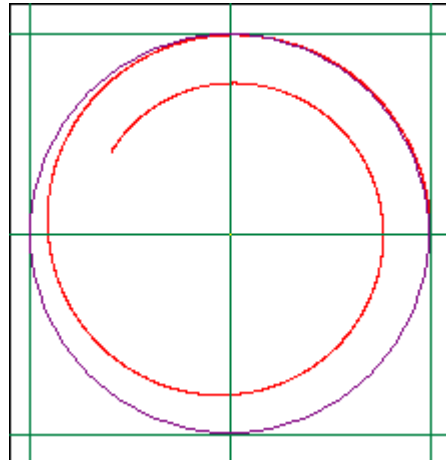
Sonda dosáhla Venuše za delší dobu, než mnohem těžší sonda vybavená raketovým motorem.

Když zvýším hmotnost přístrojů na palubě sondy na 200 kg, zatížení stoupne na  $\Theta = 25 \text{ gm}^{-2}$ .

Sonda dosáhne oběžné dráhy Venuše po 1,13 roce, což je 13 měsíců a 18 dnů. Koncová rychlost je  $34 \text{ km s}^{-1}$ .

V obou případech by byly parametry plachty nerealizovatelné s dnešními technologiemi. Hlavním problémem je rozměr plachty. To ale neplatí o tloušťce a hustotě materiálu. Obě hodnoty jsem volil tak, aby s realizací nebyl problém.

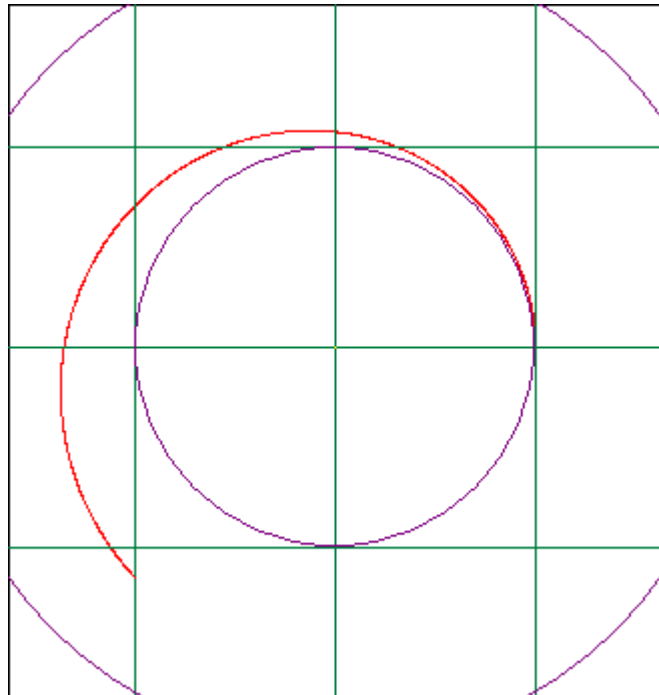
Trajektorie pro  $\Theta = 25 \text{ gm}^{-2}$  :



Simulace prokázaly, že je výhodnější použít klasický raketový pohon pro misi tohoto typu. Výhodou použití sluneční plachty pro tento let je fakt, že nepotřebuje dodávat energii.

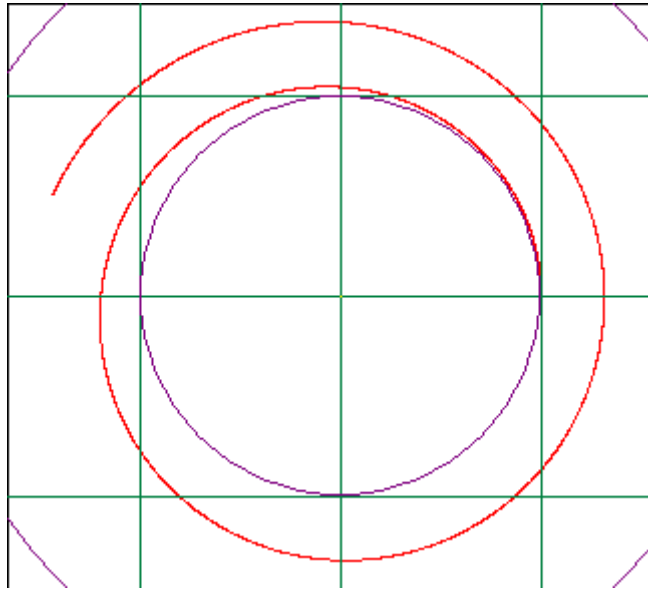
Zde jsou výsledky simulací pro let k Marsu ve vzdálenosti 1,5237 AU od Slunce se stejnými loděmi jako k Venuši.

$$\Theta = 15 \text{ gm}^{-2}$$



Po této trajektorii dosáhne plachetnice oběžné dráhy Marsu za 0,8378 roku, což je 10 měsíců a 2 dny. Loď protne dráhu Marsu rychlostí  $22,7 \text{ km s}^{-1}$ .

Druhá simulace letu na Mars:  $\Theta = 25 \text{ gm}^{-2}$

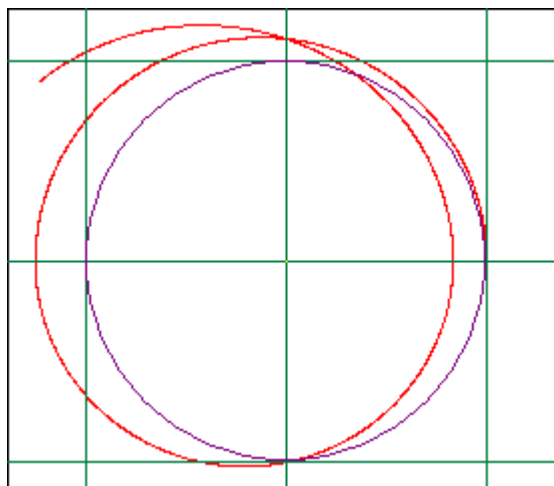


Po této trajektorii trvá cesta k oběžné dráze Marsu 2,02 roku, což je 24 měsíců a 8 dnů. Konečná rychlost je  $23,88 \text{ km s}^{-1}$ .

Předkládám též výsledek simulace letu na Mars se stejnými loděmi, ale s využitím techniky protahováním trajektorie s konstantní polohou apsidní přímky.

Let s využitím techniky zvyšování excentricity oběžné dráhy :

$$\Theta = 15 \text{ gm}^{-2}$$

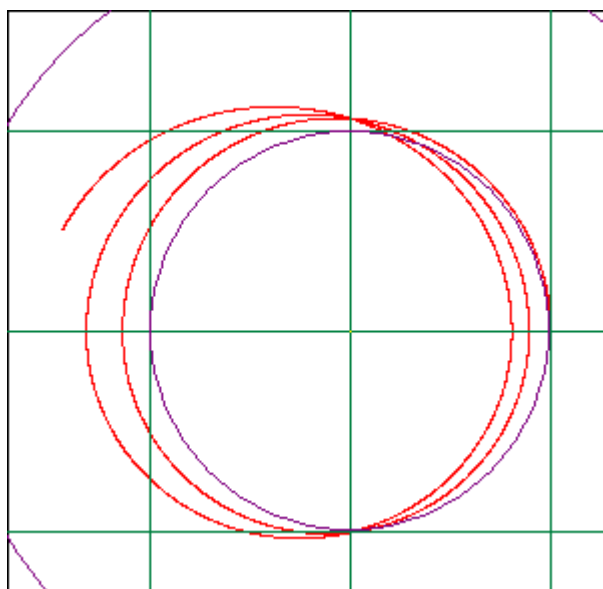


Čas letu je 1,6372 roku, což je 19 měsíců a 19 dnů.

Simulace pro vyšší zatížení plachty:

$$\Theta = 25 \text{ gm}^{-2}$$

Cesta trvá 2,763 let, což je 33 měsíců a 5 dnů.

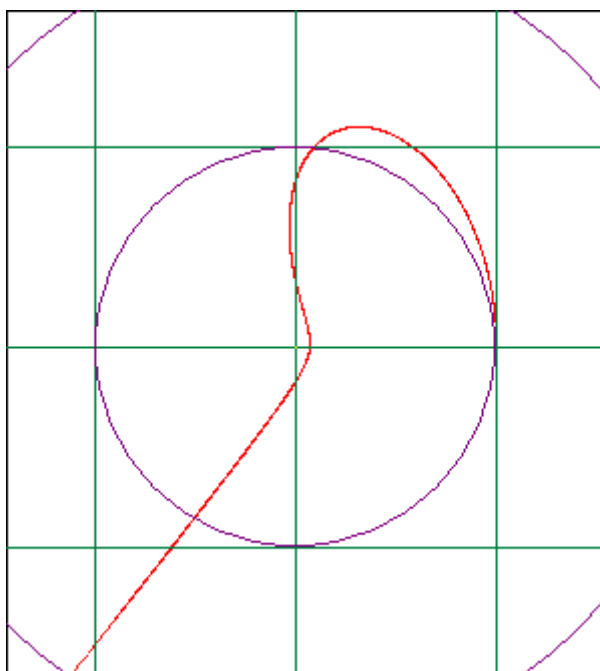


I při simulaci cesty na Mars se ukázalo, že konvenční přístup je a po několik desetiletí ještě bude výhodnějším než užití sluneční plachty.

Na všech obrázcích výše odpovídá velikost strany čtverce 1 AU a Slunce je ve středu fialových kružnic. Trajektorie plachetnice je červená.

Opouštění gravitačního pole hvězdy může být provedeno mnoha způsoby, ale nejefektivnější z nich je H-reversal manévr, při němž se využívá velmi těsného průletu kolem ní.

Pro parametry  $\Theta = 2 \text{ gm}^{-2}$  ,  $E = 0,98$  ,  $\alpha = 125^\circ$  a Slunce vypadá trajektorie takto:



Sluneční plachetnice je po této trajektorii doslova vystřelena ze sluneční soustavy. Do vzdálenosti 100 AU se dostane při těchto parametrech za 4,1827 let. Rychlost v této vzdálenosti je  $132,4 \text{ km s}^{-1}$ . To je mnohem lepší výsledek než jakého lze dosáhnout gravitačními manévry u velkých planet.



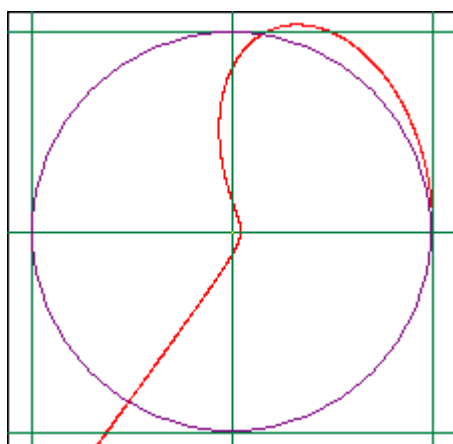
Do vzdálenosti jednoho světelného roku od Slunce se plachetnice dostane po této trajektorii za 2266 let.

Teplota plachty dosáhne při největším přiblížení ke Slunce hodnoty 452,42 K. Přepočítáno na stupně Celsia vychází teplota na 179,27°C.

K cestám mimo sluneční soustavu jsou plachetnice vhodnější než konvenční postupy. Jejich užití však brání velmi nesnadná realizovatelnost.

Když upravím úhel alfa na  $\alpha = 128^\circ$ , rychlost ve vzdálenosti jednoho světelného roku od Slunce se zvýší na 173 km s<sup>-1</sup>.

Urychlovací fáze:

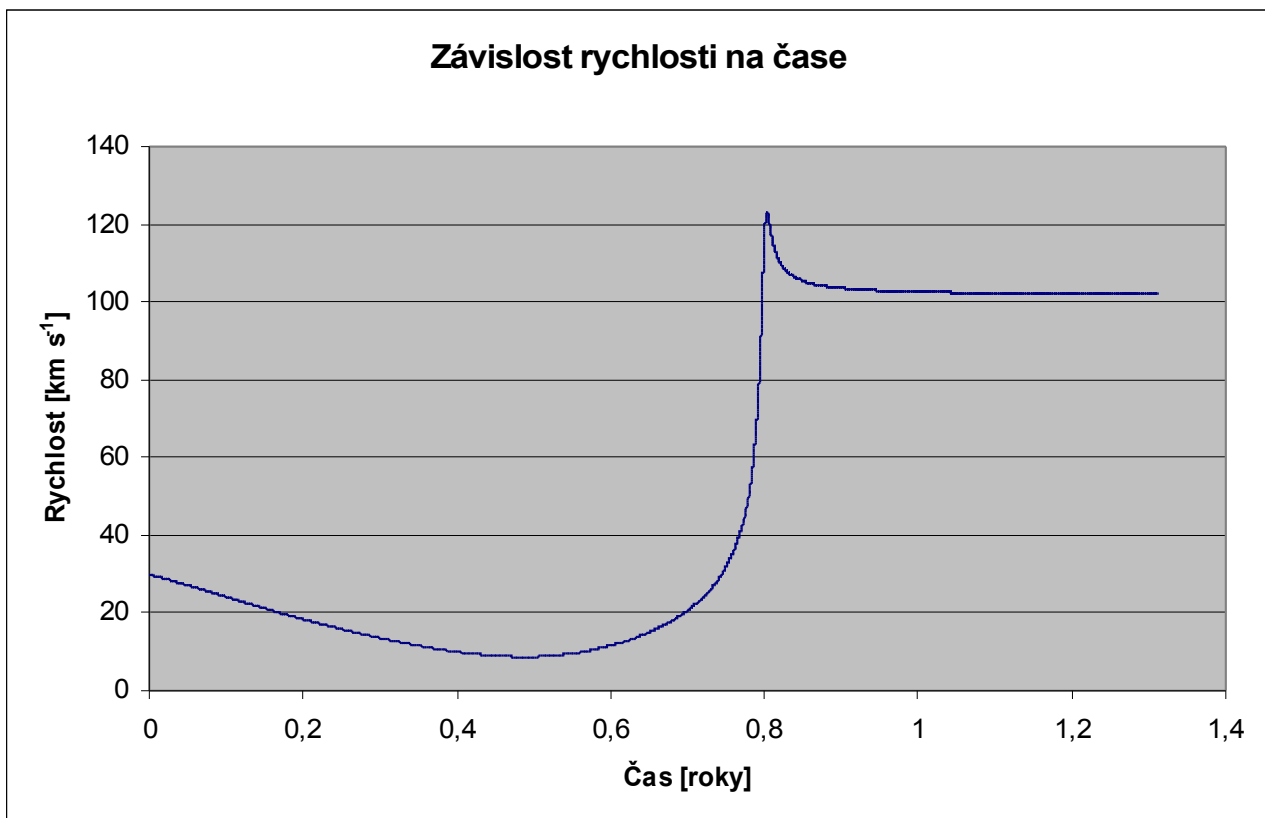
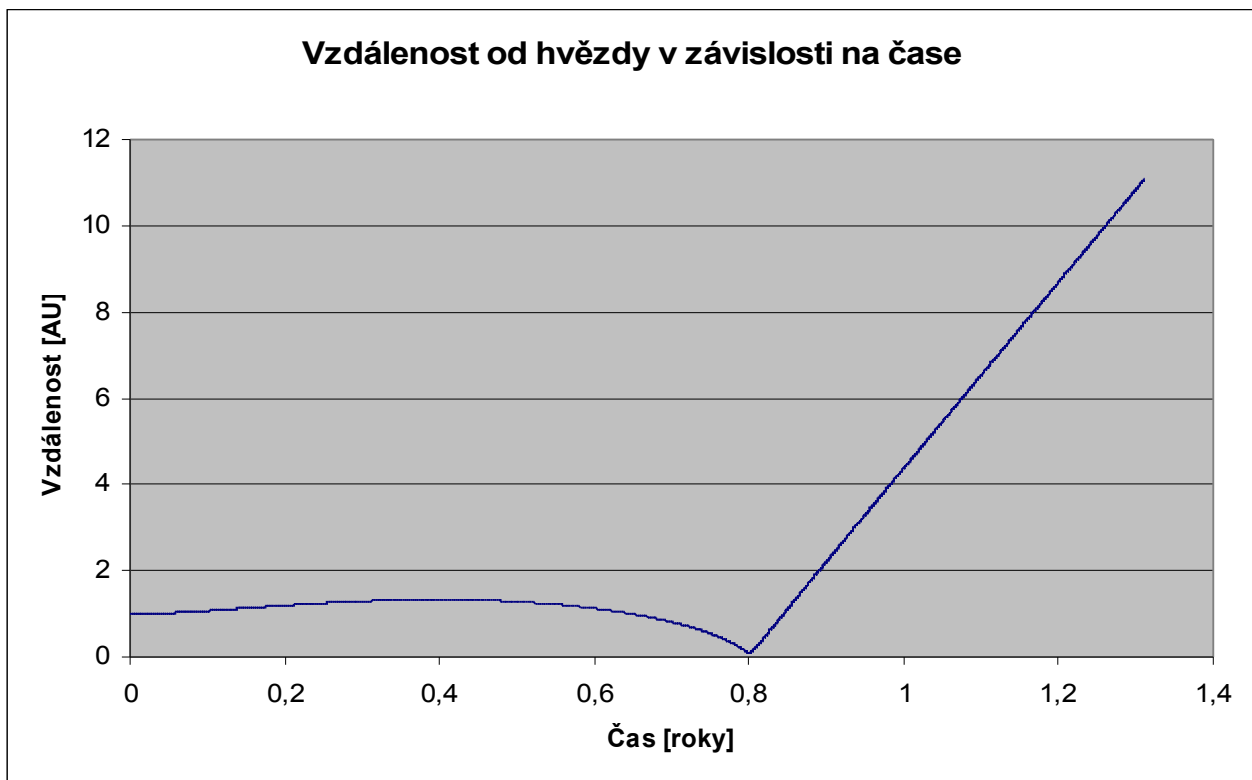


Maximální teplota plachty bude během urychlovací fáze 586,34 K. Při přepočtu na stupně Celsia dojdou k hodnotě 313,19°C. To ještě není tak vysoká teplota, ale mohla by při realizaci tohoto projektu působit potíže.

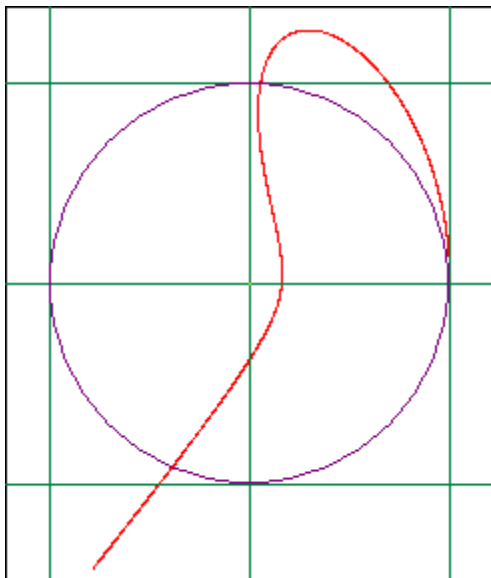
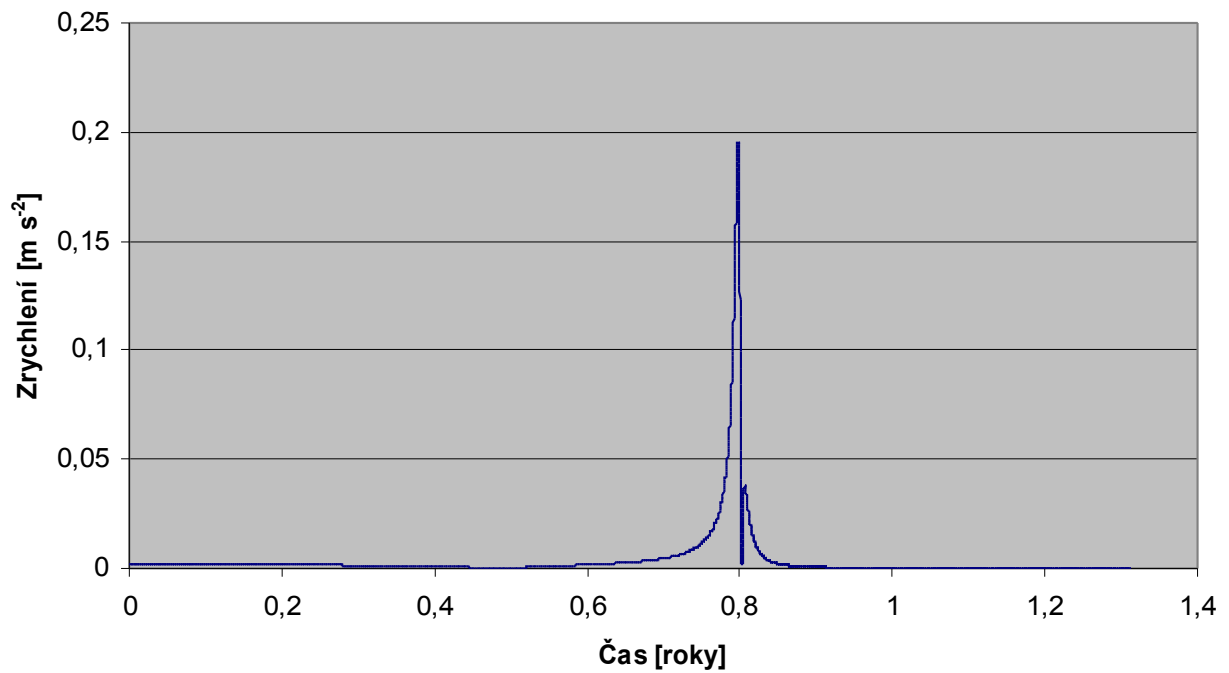
Provedené simulace prokázaly, že využití slunečních plachet jako pohonu je v dnešní době velmi nevýhodné. Sondy urychlované posledními stupni raket mohou dosahovat planet rychleji a efektivněji než lodě vybavené plachtou. Na druhou stranu pro lety mimo sluneční soustavu jsou konvenční postupy absolutně nevhodné.

Nyní podrobně rozeberu urychlovací fázi letu s parametry  $\Theta=2 \text{ gm}^{-2}$  ,  $E=0,9$  ,  $\alpha=120^\circ$  a Slunce při H-reversal manévru.

Zde jsou grafy zachycující vývoj vzdálenosti od Slunce, rychlosti a zrychlení v závislosti na čase:



### Závislost zrychlení na čase



Zrychlení během tohoto letu nepřekročilo v maximu ani hodnotu  $\frac{1}{4}g$ .

Velikost strany zeleného čtverce je 1 AU a Slunce leží ve středu fialových kružnic. Trajektorie odpovídá červené stopě.

## 15. Závěr

V této práci jsem se věnoval převážně základnímu fyzikálnímu popisu letu slunečních plachetnic a simulaci jejich pohybů. Zjistil jsem, že je nutné zatěžovat plachtu na m<sup>2</sup> velmi malými hmotnostmi, které se pohybují kolem několika gramů.

Velikost síly působící ve směru od Slunce je:

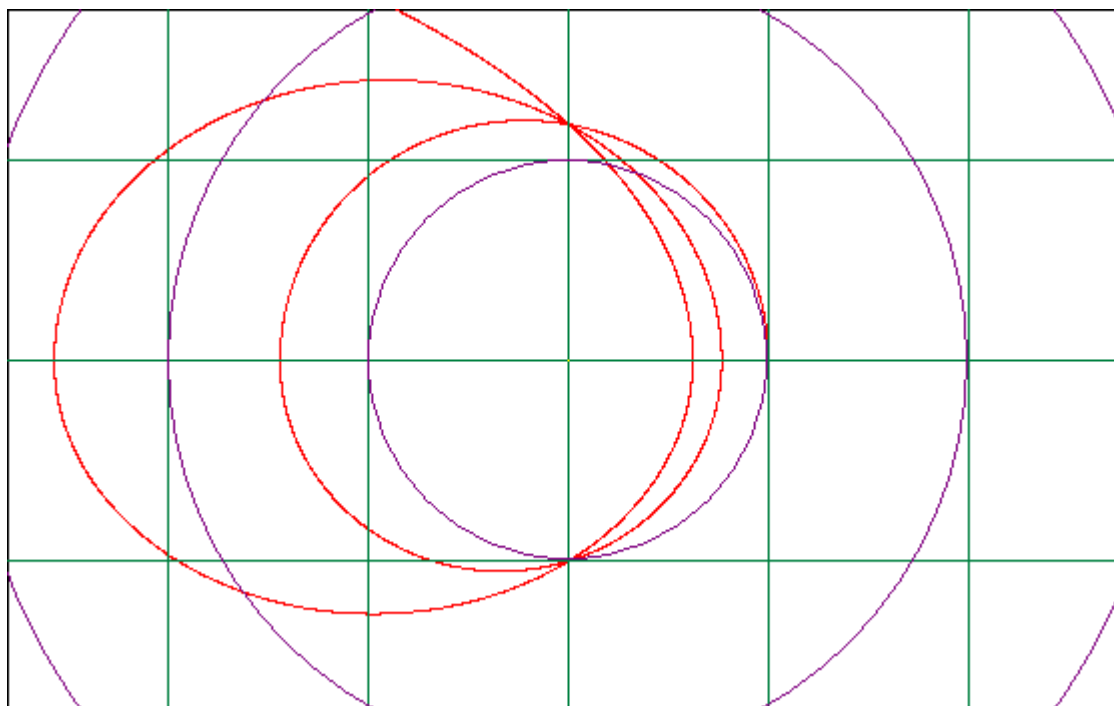
$$F_y = S_r \sin(\alpha) \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)} \cdot (1 - \cos(2\alpha)) \cdot \Xi \quad (\text{vztah (19)})$$

Velikost síly, jejíž vektor je kolmý na tento směr je:

$$F_x = \sin(2\alpha) \cdot \Xi S_r \sin(\alpha) \frac{L_s}{(4\pi l^2 c)} \quad (\text{vztah (18)})$$

Došel jsem k závěru, že dosahování cílů pomocí zvyšování excentricity oběžné dráhy je neefektivní.

Zde je ukázka letu po takovéto trajektorii:



Jak jsem již zmínil, tato strategie spočívá v nastavování plachty přímo proti Slunci v periheliu, a tak, aby nebyla vůbec osvětlena v afeliu.

Vztah mezi periheliem a afeliem (vztah (44)):

$$r_a = \frac{(v_p r_p)}{\left(\kappa \frac{M_2}{(v_p r_p)} - \sqrt{\left(\kappa^2 \frac{M_2^2}{(v_p^2 r_p^2)} - 2\kappa \frac{M_2}{r_p} + v_p^2\right)}\right)}$$

Vztah mezi afeliem a periheliem (vztah (46)):

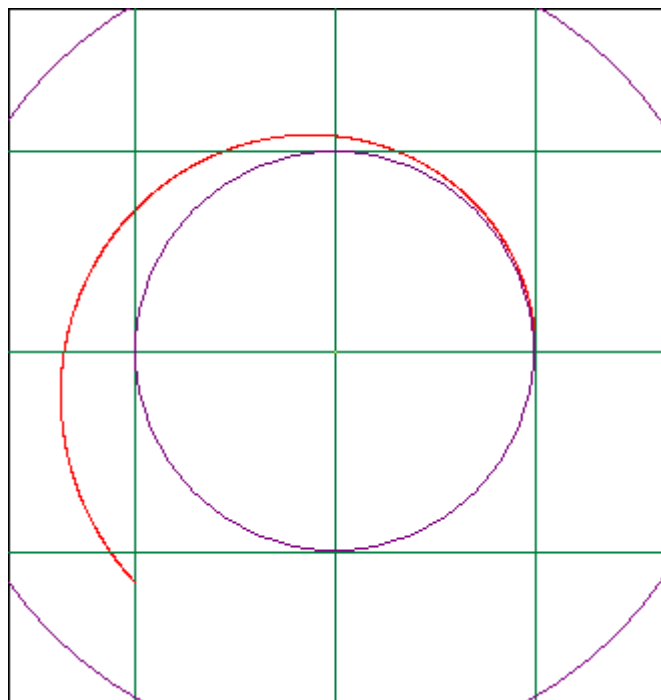
$$r_p = \frac{(v_a r_a)}{\left(\kappa \frac{M_2}{(v_a r_a)} + \sqrt{\left(\kappa^2 \frac{M_2^2}{(v_a^2 r_a^2)} - 2\kappa \frac{M_2}{r_a} + v_a^2\right)}\right)}$$

Do těchto vztahů musím ještě doplnit tuto substituci:

$$M_2 = M - \sin(\alpha) \frac{(L_S (1 - \cos(2\alpha)) \cdot \Xi)}{(4\pi c \Theta \kappa)} \quad (\text{vztah (30)})$$

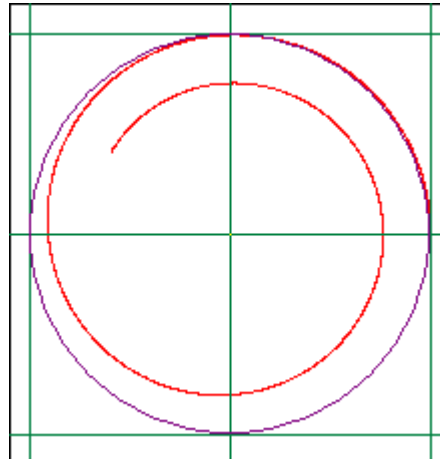
Mnohem lepší strategií je nastavit plachtu natočenou vůči spojnici hvězda – loď o úhel 45° nebo 135° (nebo úhel různý od 90° a 0°, podle toho jaké trajektorie potřebují dosáhnout). Trajektorie pak připomíná jakousi spirálu (ve skutečnosti o spirálu nejde).

Příklad zvyšování oběžné dráhy:



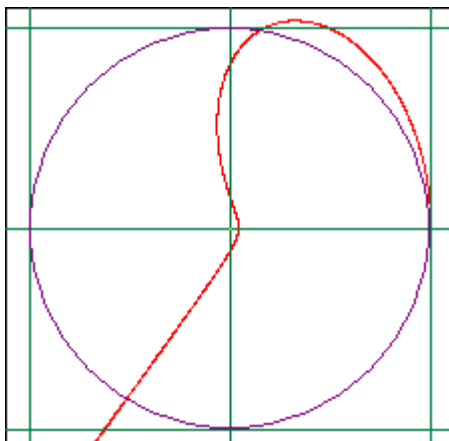
Strana zeleného čtverce má velikost 1 AU a Slunce leží ve středu fialových kružnic. Trajektorie plachetnice je reprezentována červenou stopou.

Příklad snižování oběžné dráhy:



Zjistil jsem, že pro dosahování cílů mimo sluneční soustavu a cílů ležících ve vzdálených okrajových částech sluneční soustavy je vhodnější použít takzvaný H-reversal manévr (nenašel jsem překlad). Ten spočívá v obrácení směru oběžného pohybu okolo hvězdy a v těsném průletu kolem ní. Během toho průletu získá sluneční plachetnice obrovskou rychlost a je vystřelena ze sluneční soustavy.

Ukázka H-reversal manévru pro plachetnici s parametry:  $\Theta = 2 \text{ gm}^{-2}$  ,  $E = 0,98$  ,  $\alpha = 128^\circ$  pohybující se zprvu po kruhové oběžné dráze ve vzdálenosti 1 AU od Slunce:



Ve vzdálenosti jednoho světelného roku bude mít sluneční plachetnice rychlost  $173 \text{ km s}^{-1}$ .

Její teplota během těsného průletu kolem Slunce dosáhne hodnoty  $313,19^\circ\text{C}$ . Tento fakt může působit problémy při realizaci.

Koncept slunečního plachtění má podle mého názoru obrovský potenciál pro budoucnost. V této práci jsem nicméně ověřil, že v dnešní době je jeho plné využití nerealizovatelné. Pro potřeby výzkumu planet sluneční soustavy je na stávající technologické úrovni ekonomicky výhodnější použití konvenčních metod. Dosahují cíle rychleji a jejich aplikace je jednodušší.

Na druhou stranu, pro cesty do vnějších částí sluneční soustavy a mimo ni, je tato technologie velmi vhodná. Sondy vybavené sluneční plachtou jsou schopné dosáhnout vzdálených cílů rychleji než sondy využívající gravitační manévry u velkých planet. Znovu zde ovšem narážíme na problém komplikované realizovatelnosti.

## 16. Zdroje informací

- [1] Vladimír Vanýsek, Základy astronomie a astrofyziky, Praha, Academia, 1980
- [2] Amatérská sluneční plachetnice?, [mek.kosmo.cz/novinky/clanky/knp2003/ah-sail.htm](http://mek.kosmo.cz/novinky/clanky/knp2003/ah-sail.htm)  
(24.3.2009)
- [3] Sluneční plachetnice, [mek.kosmo.cz/zaklady/rakety/solsail.htm](http://mek.kosmo.cz/zaklady/rakety/solsail.htm)  
(24.3.2009)
- [4] Jiří Hofman: Sluneční plachtění, [www.aldebaran.cz/bulletin/2005\\_35\\_pla.php](http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_35_pla.php)  
(24.3.2009)
- [5] Solar sail, [en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_sail](http://en.wikipedia.org/wiki/Solar_sail)  
(24.3.2009)
- [6] Solar Sailing, [www.planetary.org/programs/projects/solar\\_sailing/](http://www.planetary.org/programs/projects/solar_sailing/)  
(24.3.2009)
- [7] NanoSail-D Latest News, [www.nasa.gov/mission\\_pages/smallsats/nanosaild.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/smallsats/nanosaild.html)  
(24.3.2009)
- [8] Solar Sail, [http://www.tsinghua.edu.cn/docsn/lxx/mainpage/a/Web/index\\_files/Page567.htm](http://www.tsinghua.edu.cn/docsn/lxx/mainpage/a/Web/index_files/Page567.htm)  
(24.3.2009)
- [9] Szántó Ladislav, Maxwellovy rovnice a jejich názorné odvození, Praha, BEN – technická literatura, 2003
- [10] By Alan C. Elms, U.C. Davis, Projects: Solar Sailing, Solar Sails in Science Fiction, [www.planetary.org/programs/projects/innovative\\_technologies/solar\\_sailing/science\\_fiction.html](http://www.planetary.org/programs/projects/innovative_technologies/solar_sailing/science_fiction.html)  
(1.4.2009)
- [11] T. P. Cotter, En Encomium on Solar Sailing, <http://www.fas.org/sgp/othergov/doe/lanl/docs1/00390190.pdf>  
(5.4.2009)
- [12] A.C.Clark, The Wind from the Sun, USA, Harcourt Brace Jovanovich, 1972
- [13] Mariner 4, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/masterCatalog.do?sc=1964-077A>  
(5.4.2009)
- [14] The U3P, Solar Sails, <http://www.u3p.net/>  
(5.4.2009)
- [15] LSG (Liška Space Group), <http://mek.kosmo.cz/cz/lsg/index.htm#lsg>  
(5.4.2009)
- [16] Centre National d'Etudes Spatiales, <http://www.cnes.fr>  
(5.4.2009)
- [17] Speltra, Sylta 5, [http://www.esa.int/SPECIALS/Launchers\\_Access\\_to\\_Space/ASE5XQI4HNC\\_0.html](http://www.esa.int/SPECIALS/Launchers_Access_to_Space/ASE5XQI4HNC_0.html)  
(5.4.2009)
- [18] N.Shpakovsky, Space Mirror, <http://www.triz-journal.com/archives/2002/06/e/index.htm>  
(5.4.2009)
- [19] Space Topics: Private Missions, Cosmos 1, [http://www.planetary.org/explore/topics/space\\_missions/private\\_missions/cosmos1.html](http://www.planetary.org/explore/topics/space_missions/private_missions/cosmos1.html)  
(5.4.2009)
- [20] Cosmos 1: Sailing on sunlight, <http://news.bbc.co.uk/2/hi/science/nature/4104282.stm>  
(5.4.2009)

- [21] Dauna Coulter, NASA to Attempt Historic Solar Sail Deployment,  
[http://science.nasa.gov/headlines/y2008/26jun\\_nanosaild.htm](http://science.nasa.gov/headlines/y2008/26jun_nanosaild.htm)
- [22] M. Leipold, D Kassing, M. Eiden, L. Herbeck, Solar Sails for Space Exploration – The Development and Demonstration of Critical Technologies in Partnership,  
<http://esapub.esrin.esa.it/bulletin/bullet98/LEIPOLD.pdf>  
(5.4.2009)