

# Sæt sejl



I en ikke alt for fjern fremtid vil rumfartøjer med gigantiske ultratynde sejl måske kunne bruges til rejser i Solsystemet – ja, endog til de nærmeste stjerner.

En kunstners opfattelse af IKAROS på vej fra Jorden til Venus.

Figur: JAXA



Michael Linden-Vørnle, astrofysiker og chefkonsulent,

DTU Space  
mykal@space.dtu.dk

Kometers haler vender altid væk fra Solen. Det Kinspirerede for omkring 400 år siden matematikeren og astronomen Johannes Kepler til at foreslå, at den vind, der øjensynligt blæser komethalerne væk fra Solen, også kan bruges til at drive fartøjer med sejl af sted gennem rummet. Mange år senere – i 1924 – beskrev den visionære lettiske forsker og raket-ingeniør Fridrikh A. Tsander for første gang konceptet “solsejl”, og i vore dage er rumfartøjer drevet på denne måde ikke længere blot en strøtanke. De er på dagsordenen som et seriøst alternativ til konventionelle raketter, når vi taler om rejser i Solsystemet og måske den eneste rentable mulighed for at rejse til de nærmeste stjerner – i hvert fald inden for en overskuelig tidshorison.

## Raketter med akilleshæl

Problemet med nutidens rumfartøjer er, at de alle er født med en akilleshæl, der er umulig at komme udenom: de medbringer selv deres brændstof. For at rejse langt på en overskuelig mængde tid skal rumskibet hurtigt have en så høj hastighed som overhovedet muligt. Den nødvendige acceleration koster dyrt i brændstof, også selvom vi udstyrer rumskibet med en mere effektiv motortype end den kemiske raket.

Mere fart kræver mere brændstof, så der kan accelereres i længere tid. Ved at hælde mere brændstof på bliver rumskibet imidlertid tungere og dermed vanskeligere at accelerere. Den eneste kur er at tanke

# mod stjernerne

endnu mere brændstof, men det løser jo ikke problemet – tværtimod. Kuren og ikke sygdommen ender med at tage livet af patienten. Problemet er i virkeligheden større end som så. Det er nemlig ikke nok at kunne accelerere til en høj hastighed. Der skal også være brændstof til at bremse rumskibet ved ankomsten til rejsemålet samt til hjemrejsens acceleration og opbremsning.

## Det “raketløse rumskib”

Rumskibe, der slæber rundt på deres eget brændstof, er derfor som udgangspunkt ikke et godt koncept til interplanetariske rejser – for slet ikke at tale om rejser til stjernerne. Det er netop her solsejlene kommer ind i billedet som det “raketløse rumskib”. Her er det ikke den kemiske energi bundet i raketbrændstoffet, der giver fremdriften, men derimod en ydre kilde, som vi alle jævnlige føler på vores egen krop – Solens lys.

I Jordens afstand fra Solen, altså ca. 150 millioner km, påvirker sollyset med en kraft på 9 Newton pr. kvadratkilometer. Tættere på Solen vil påvirkningen være større, mens den falder med en stigende afstand fra vor stjerne. Det er således ikke – som mange fejlagtigt tror – solvinden, der kan fylde et solsejl. Denne konstante strøm af elektrisk ladede partikler fra Solen er så tynd, at den i sammenligning med sollyset kun er årsag til en meget beskedne kraftpåvirkning på ca. 0,1 %. Ønskes en større kraftpåvirkning end den Solens lys kvit og frit leverer, så kan laserlys eller mikrobølgestråling fx afsendt her fra Jorden eller fra en rumbaseret platform også skubbe på.

## Solsejlet er en realitet

Store sejl i rummet, der skubbes af sted af Solens lys, og en laser på Jorden eller i rummet lyder i de fleste ører måske mest som science fiction. Ikke desto mindre så vi i 2010 det første solsejl på rejse i

rummet – nærmere bestemt på fra Jorden til Venus. Sejlet var et japansk projekt ved navn IKAROS, der er en forkortelse for Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun.

IKAROS blev sendt ud i rummet den 20. maj 2010 sammen med venussonden Akatsuki. Den 3. juni begyndte det japanske rumagentur (JAXA) den trinvise udfoldning af sejlet og den 10. juni blev det bekræftet, at udfoldningen var forløbet efter planen. Sejlet var ca. 14 meter på hver led og kun 0,0075 mm tykt, hvilket er tyndere end et menneskehår. Solceller placeret på sejlet leverede strøm til IKAROS.

Målinger viste, at sejlets hastighed langsomt blev øget, pga. det pres som sollyset laver. Fremdriften svarede nøje til den forventede værdi. Japanerne har også succesfuldt gennemført manøvrer med sejlet ved at ændre sejlets vinkel i forhold til det indkommende sollys.

## Næste solsejl på vej

Selvom IKAROS således har banet vejen for at bruge solsejl som fremdriftsmiddel i rummet, er der helt klart brug for flere konkrete erfaringer med konceptet for at gøre solsejlet til en anvendelig teknologi. Heldigvis er næste solsejlsmission lige om hjørnet i form af NASA's Sunjammer-projekt. Sunjammer bliver det hidtil største solsejl i rummet med en sidelængde på 38 meter og et samlet areal 1208 kvadratmeter – ca. syv gange større end IKAROS' effektive areal.

Sunjammer skal på samme måde som IKAROS demonstrere udfoldning, fremdrift og navigation. Målet er en position ca. 1,8 millioner km fra Jorden, hvor Sunjammer skal holde øje med rumvejret, der skabes af Solens aktivitet. Den primære funktion er dog selve afprøvningen af solsejlskonceptet. Sunjammer skal efter planen sendes ud i rummet i november næste år.

## Mislykket forsøg

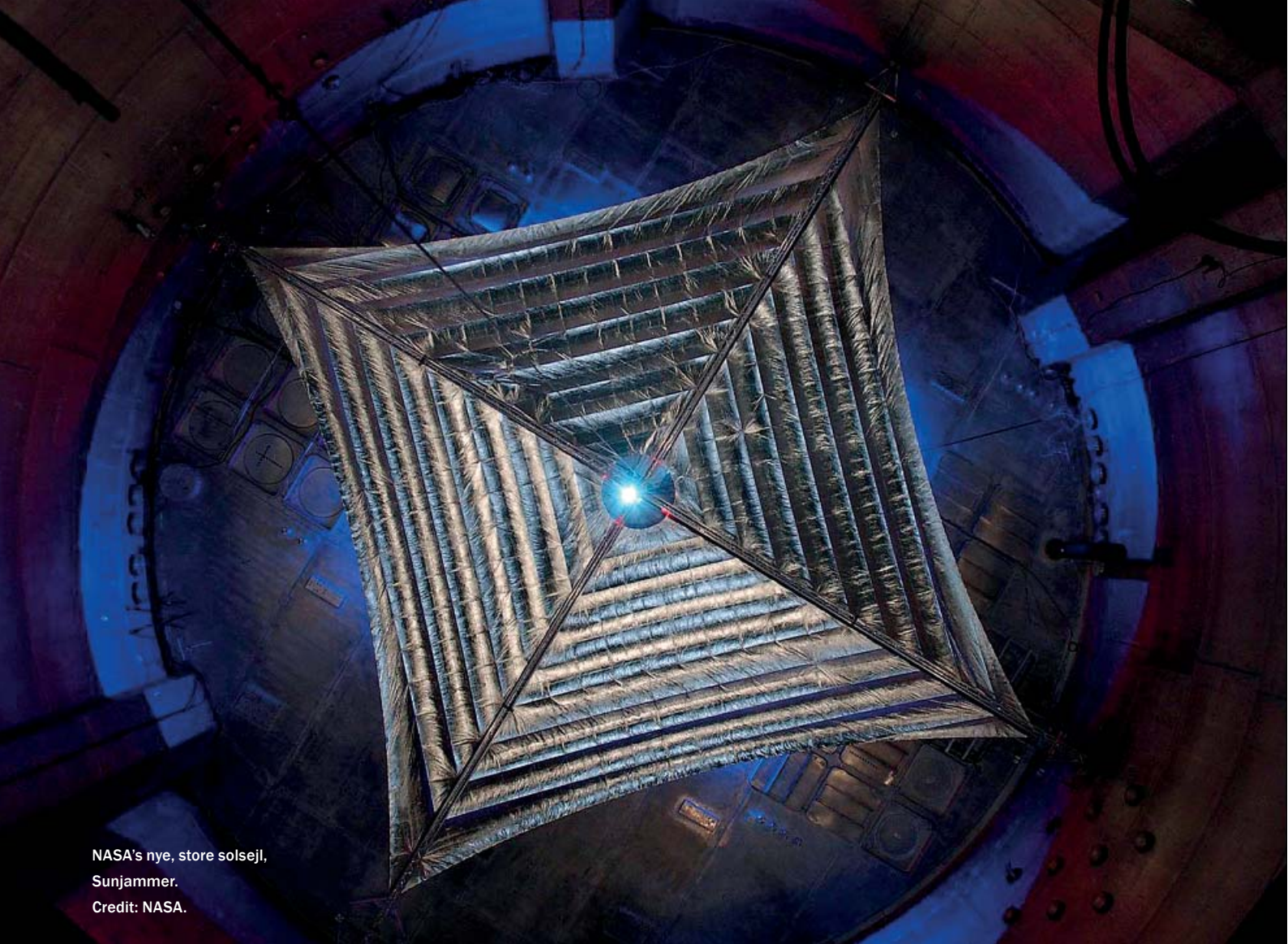
Det første forsøg på at få et fritflyvende solsejl ud i rummet blev gjort i juni 2005, men slog fejl. Her blev solsejlsmissionen Cosmos 1 opsendt med et ombygget atommissil fra en neddykket russisk ubåd. Problemer med raketten førte dog til, at Cosmos 1 gik tabt. Cosmos 1 var et privat projekt ledet af interesseorganisation The Planetary Society. Organisationen har dog ikke opgivet at sejle med Solens lys og er nu i gang med et nyt solsejlsprojekt ved navn LightSail-1.

## Lille sejl til rumskrot

I november 2010 sendte NASA et lille eksperimentelt solsejl ved navn NanoSail-D i kredsløb om Jorden. Sejlet, der foldede sig ud i januar 2011, kredsedde om Jorden i 240 dage inden det brændte op i atmosfæren.

NanoSail-D var en demonstration af, at solsejl kan anvendes til at bremse udtjente satellitter, så de kan brænde op i Jordens atmosfære.





NASA's nye, store solsejl, Sunjammer.  
Credit: NASA.

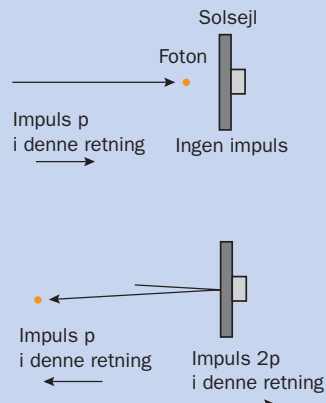
## Solsejl – lidt grundlæggende teori

Lyspartikler (fotoner) har ingen masse, men hvordan kan de så skubbe til et solsejl? Det kan de, fordi de har impuls,  $p$ , der afhænger af deres energi:

$$p = \frac{E}{c},$$

hvor  $c$  er lysets hastighed ( $3,0 \cdot 10^8$  m/s) og  $E$  er energien. For fotoner med en frekvens,  $f$ , er energien givet ved  $E = h \cdot f$ , hvor  $h$  er Plancks konstant ( $6,63 \cdot 10^{-34}$  J·s).

Når fotoner rammer et solsejl og bliver reflekteret, har vi følgende situation:



Før refleksionen har fotonerne impulsen  $p$ , men bagefter har de impulsen  $-p$ . På grund af impulsbevarelse vil sejlet efter refleksionen have impulsen  $2 \cdot p$ . Her antager vi, at sejlet er et perfekt spejl med 100% refleksion.

Fra Newtons 2. lov har vi, at kraft,  $F$ , er ændringen af impuls pr. tidsenhed. Da ændringen i energi pr. tidsenhed er effekt,  $P$ , kan vi skrive:

$$F = 2 \cdot \left(\frac{P}{c}\right) \cdot A,$$

hvor  $I = \frac{P}{A}$  er intensiteten af strålingen i W/m<sup>2</sup>. Da tryk er kraft pr. areal er trykket fra strålingen altså  $2 \cdot \left(\frac{I}{c}\right)$ .

I Jordens afstand fra Solen er intensiteten af sollyset ca. 1360 W/m<sup>2</sup>. Det giver en påvirkning på 9,1 μN/m<sup>2</sup> eller godt 9 newton pr. km<sup>2</sup>.

For at beregne tidsforbruget for at accelerere et solsejl til en given hastighed skal der dog tages højde for 1) at sollysets intensitet aftager med afstanden fra Solen og 2) at der kan være andre kræfter, som virker på sejlet – fx tyngdekraften fra Jorden, hvis rejsen starter i lav jordbane. Netop for at modvirke sollysets aftagende intensitet kan en kraftig laser hjælpe med at skubbe til sejlet.

Hertil kommer, at sejlet næppe vil være 100% reflekterende og sollyset måske ikke rammer vinkelret ind mod sejlet. En mere generel formulering af kraftpåvirkningen på sejlet er derfor:

$$F = (I/c) \cdot A \cdot (1 + r) \cdot \cos \nu,$$

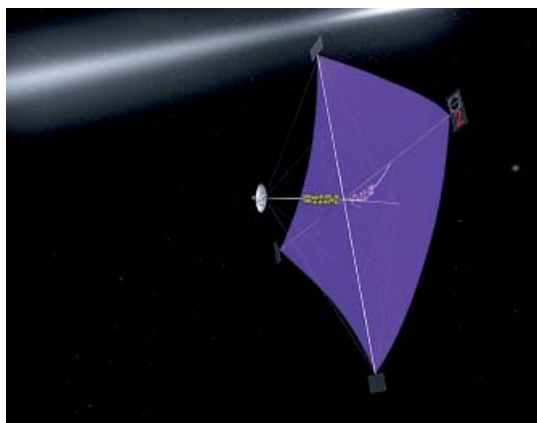
hvor  $r$  er sejlets refleksionsevne (hvor  $r = 1$  er et perfekt spejl med 100% refleksion), mens  $\nu$  er indfaldsvinklen af strålingen (hvor  $\nu = 0$  er vinkelret ind mod sejlets overflade).

## Ud af Solsystemet

Men hvad er så fremtidsperspektiverne for solsejl? Efter de indledende øvelser kan den første anvendelse være en rumsonde, der hurtigt kan bevæge sig ud af Solsystemet. På NASA's Marshall Space Flight Center i Huntsville i staten Alabama har forskerne i samarbejde med bl.a. NASA's Jet Propulsion Laboratory i Californien skitseret en rummission, hvor et 0,25 kvadratkilometer stort solsejl sender en ubemandet sonde af sted ud i rummet.

Sollyset vil accelerere sonden til en fart på 90 km/s – betydeligt hurtigere end det i dag er muligt med en konventionel raket. Med den fart vil sonden hurtigt kunne overhale den hidtil fjerneste menneskeskabte udsending, Voyager 1, der forlod Jorden i 1977. Hvis denne solsejlssonde var blevet afsendt i 2010, ville den allerede i 2018 overhale Voyager 1. Den ville således kun have brugt otte år på at tilbagelægge samme afstand som Voyager 1 skulle bruge 41 år på.

Med et meget større sejl og ekstra skub fra en uhyre kraftig laser vil en sonde kunne opnå en langt større hastighed – fx 30.000 km/s eller 10 % af lysets hastighed. Med den fart vil sonden i løbet af 43 år kunne flyve til den nærmeste stjerne, Proxima Centauri, der ligger i en afstand på 4,3 lysår. Herefter vil sondens billeder og målinger sendt som radiosignaler være 4,3 år om at nå tilbage til Jorden.



NASA overvejer at anvende solsejl til at sende en rumsonde ud af Solsystemet. Med et sejl af ultratynd kulfiber, der er ca. en halv kilometer stort på hver led, vil sonden få en hastighed på 90 km/s. Med denne fart vil sonden i løbet af nogle få år kunne overhale den hidtil fjerneste menneskeskabte ting: rumsonden Voyager 1.

Credit: NASA / Marshall Space Flight Center

Et langt mere interessant rejsemål er den sol-lignende stjerne Epsilon Eridani, der ligger i en afstand på 10,8 lysår og som omkredsnes af mindst én planet. For at gennemføre rejsen på ca. samme tid som turen til Proxima Centauri, skal sejlet igen være større, og der skal skubbes betydeligt mere med laseren, så sonden kommer op på ca. 30 % af lysets hastighed. Det giver en rejsetid på 36 år samt 11 år for at få billeder og målinger sendt hjem.

Selvom interstellare rejser med solsejl stadig er science fiction, så er missioner som IKAROS og Sunjammer helt konkrete aktiviteter, der hjælper os med at gøre solsejl til science fact. ■

### Videre læsning:

IKAROS:  
[www.jaxa.jp/projects/sat/ikaros/index\\_e.html](http://www.jaxa.jp/projects/sat/ikaros/index_e.html)

Sunjammer:  
[www.nasa.gov/mission\\_pages/tdm/solarsail/solarsail\\_overview.html](http://www.nasa.gov/mission_pages/tdm/solarsail/solarsail_overview.html)

[www.sunjammermission.com](http://www.sunjammermission.com)