



KAN MAN ÅKA RAKA SPÅRET TILL **MERKURIUS**?

MÖJLIGA
OCH **OMÖJLIGA**
RESVÄGAR
I SOLSYSTEMET



MASA/JOHNS HOPKINS UNIVERSITY APPLIED PHYSICS LABORATORY/CARNEGIE INSTITUTION OF WASHINGTON

av *Magnus Thomasson*

Merkuriussonden Messenger (bilden) fick göra en lång resa under många år. Det är inte lätt att färdas till andra planeter, och om de ligger nära kan det vara knepigare än om de ligger långt bort.

Den 18 mars 2011 gick rymdsonden Messenger in i en bana runt planeten Merkurius. Det är den första rymdsonden som kretsar runt Merkurius, och den första som besöker planeten sedan Mariner 10 under 1974–75 flög förbi Merkurius tre gånger.

Varför har det tagit mer än 35 år sedan förra besöket hos Merkurius? Det är inte bara för att det är svårt att bygga en rymdsond som klarar den enorma hettan så nära solen, eller för att andra planeter kanske ansetts intressantare att besöka. Det är också svårt att ta sig till Merkurius, trots att det inte är så långt dit.

Avstånden i rymden är enorma, även inom vårt eget solsystem: om jorden vore stor som en ärt skulle Merkurius i samma skala befinna sig ungefär hundra meter bort, medan det vore en hel kilometer till Saturnus. Då borde det ju vara enklare att åka till Merkurius än till Saturnus, eller hur? Nej, riktigt så är det inte. Avståndet är inte det avgörande.

Man skulle kanske kunna tro att bara man får upp en rymdsond i rymden utanför jorden, så dras den automatiskt in mot solen av solens gravitation, och på vägen träffar den på Merkurius. Men så enkelt är det inte. Rymdsonden startar från jorden, och har därför också jordens hastighet runt solen (ungefär 30 km/s). För att sonden skall börja röra sig in mot solen, måste en del av den hastigheten bromsas bort. För en sond som skall till en yttre planet, t.ex. Saturnus, blir det tvärt om: hastigheten måste ökas för att sonden skall kunna kämpa sig bort från solen. *Hastigheten* en rymdsond har är alltså det viktiga, och därför behövs raketer.

Vad är en raket?

Raketer används för att lyfta upp satelliter och rymdsonder från jordytan, och för att ge dem rätt hastighet ute i rymden. Det är avgaserna från förbränningen av raketbränslet som strömmar ut bakåt genom raketmunstycket som ger själva raketens fart framåt. Det behövs ingen luft som raketavgaserna kan tryckas mot; raketer fungerar i rymdens vakuum.

En av raketpionjärerna, amerikanen Robert Goddard, hade förstått detta och föreslog redan 1920 att raketer kan skickas till månen. Men han förlöjligades av *New York Times*, som hävdade att raketer inte kan fungera ute i rymden och att professor Goddard inte förstod Newtons lagar. Vad ledarskribenten i *New York Times* inte hade förstått var, bl.a., principen om att ”rörelsemängden bevaras”: när en massa (raketavgaserna) kastas bakåt med en viss hastighet kommer en annan massa (själva raketerna) att få en hastighet framåt, så att den totala rörelsemängden inte ändras. Rörelsemängd är massa gånger hastighet. Hastighetens riktning, t.ex. framåt eller bakåt, måste tas med i beräkningen. (*New York Times* korrigerade sitt misstag 49 år senare.)

Tyvärr är raketmotorer inte så effektiva: det behövs väldigt mycket raketbränsle för att åstadkomma den hastighet som krävs för att åka till en annan planet. Det beror inte på att raketmotorer är dåligt konstruerade (för det är de inte), utan på den bakomliggande fysiken. Konstantin Tsiolkovskij, en rysk skollärare, visade detta redan 1903. Formeln kallas för raketekvationen (se nedan). Med raketekvationen kan man t.ex. räkna ut att om man vill öka en

Raketekvationen

Raketekvationen beskriver hur mycket farten hos en raket har ökat, Δv , när en viss mängd bränsle har förbränts:

$$\Delta v = v_{ut} \ln \left(m_{före} / m_{efter} \right)$$

Fartökningen beror på hur fort avgaserna från raketerna strömmar ut ur raketmunstycket, v_{ut} , och på raketens totala massa m före och efter förbränningen. Bränslemassan är alltså $m_{före} - m_{efter}$.

Det som trasslar till livet för en raketkonstruktör är logaritmen i ekvationen (ln står för naturliga logaritmen). Man måste öka bränslemängden mycket för att få en liten ökning av farten. (Vid starten, när raketerna åker rakt upp, måste man också ta med effekten av jordens gravitation i ekvationen, vilket gör problemet ännu värre.)

AKTUELL RYMFART

rakets fart med 10 km/s (det är ungefär vad som krävs för åka till Saturnus), så går det typiskt åt trettio gånger mer raketbränsle än vad raket, bränsletanken och rymdsonden väger tillsammans. Dubbelt så stor hastighetsändring kräver mycket mer än dubbelt så mycket bränsle, eller att rymdsonden görs väldigt mycket mindre. Att klara sig med så små hastighetsändringar som möjligt är därför viktigt!

Raka spåret till planeten?

Vilken väg skall rymdsonden ta till en annan planet? Planeterna rör sig i nästan cirkulära banor runt solen, långsammare ju längre från solen de är. Närmsta vägen till en annan planet är "raka spåret": t.ex. rakt bort från solen till en yttre planet. Men detta är en närmast omöjlig väg, eftersom den skulle kräva en alltför stor hastighetsändring: dels måste jordens rörelse runt solen bromsas bort (30 km/s), dels måste rymdsonden ges en tillräckligt stor fart utåt (ytterligare tiotals km/s). Det skulle kräva enormt mycket raketbränsle, och en stor raket för att få plats med allt detta bränsle, och en gigantisk bärraket för att få allt att lyfta från jorden. Det går inte, helt enkelt (men sonden skulle komma fram snabbt!).

En omväg till Saturnus

En bättre väg än "raka spåret" till exempelvis Saturnus' bana är att dra nytta av att rymdsonden redan har jordens hastighet vid starten. Om man ökar på den hastigheten lagom mycket så går sonden ut i en större ellipsformad bana som precis når fram till Saturnusbanan. Hastighetsändringen som krävs är ca 10 km/s. Det är ganska mycket, men ändå mycket mindre än vad "raka spåret" hade krävt. Väl framme

krävs en ny hastighetsändring för att gå in i Saturnusbanan. En sådan ellipsformad bana, som tar en satellit eller rymdsond från en cirkelbana till en annan, kallas för en *Hohmannbana* efter den tyske forskaren Walter Hohmann som beskrev den redan 1925. Se bilden nedan.

Hur ofta kan man resa iväg?

Det gäller också att skicka iväg rymdsonden i rätt ögonblick, så att Saturnus finns på plats när rymdsonden kommer fram! Jorden och Saturnus måste alltså vara i rätt läge i förhållande till varandra vid starten. Missar man ett sådant tillfälle måste man vänta drygt ett år till nästa gång: ett varv runt solen för jorden, plus lite till för att hinna ifatt Saturnus som har hunnit flytta sig lite i sin bana. Saturnus tar hela 29 år på sig för ett varv runt solen, så den hinner inte så långt på ett år.

Mars rör sig fortare och gör ett varv på knappt två år. Det betyder att jorden och Mars är i rätt läge för att skicka en rymdsond till Mars mer sällan. Efter två år är jorden tillbaka till ursprungsläget för andra gången, medan Mars har hunnit lite mer än ett varv. Jorden behöver ett par månader till för att komma ikapp. Det visar sig att rymdsonder kan skickas till Mars med knappt 26 månaders mellanrum. Det stämmer bra med uppskjutningsdatum för de senaste Marssonderna:

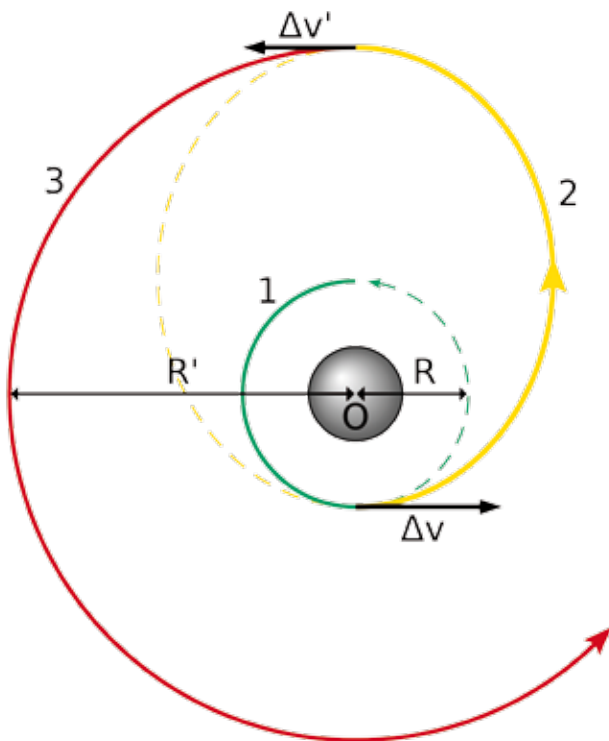
- Mars Odyssey (NASA): 7 april 2001
- Mars Express (ESA): 2 juni 2003
- Spirit (NASA): 10 juni 2003
- Opportunity (NASA): 7 juli 2003
- Mars Reconnaissance Orbiter (NASA): 12 augusti 2005
- Phoenix (NASA): 4 augusti 2007

Merkurius eller Saturnus: vilken är svårast att åka till?

Låt oss återgå till rubrikens fråga: varför är det så svårt att åka till Merkurius? Vi kan jämföra med att åka till Saturnus. En bra uppskattning av svårigheterna får vi genom att räkna ut hastighetsändringarna i en Hohmannbana och bortse från bl.a. planeternas gravitation och att deras banor är lite elliptiska. Att åka till Merkurius kräver en total hastighetsändring på drygt 17 km/s, medan en resa till Saturnus klarar sig med knappt 16 km/s. Ganska lika, alltså, men faktiskt lite mer för att resa till Merkurius trots att den ligger så mycket närmare jorden!

En Hohmannbana används för att flytta en rymdfarkost från en cirkelbana till en annan. Den gröna cirkeln (1) kan t.ex. vara en låghöjdsbana för en satellit runt jorden i mitten, den gula ellipsbanan (2) en s.k. "geostationary transfer orbit" (en sorts Hohmannbana) som för satelliten till (3) den röda cirkulära geostationära banan, där t.ex. TV-satelliter befinner sig. Hastighetsändringar ("delta-v-månövrar") krävs i början och slutet av Hohmannbanan. Hohmannbanor används också av rymdsonder, t.ex. från jordens bana till Mars bana (då är solen i mitten av figuren).

DIAGRAM: LEAFNODE/H. BARTOWIAK/WIKIMEDIA COMMONS



Den här beräkningen är förenklad och tar inte hänsyn till exakt hur rymdsonderna placeras i bana runt planeterna. Men den visar att närheten till Merkurius inte gör det lättare att åka dit än till Saturnus. Det finns också en massa andra svårigheter, som är mycket olika för de två planeterna. Vid Merkurius är det t.ex. mycket varmt, och rymdsonden måste skyddas mot värmen, medan det är mycket kallt vid Saturnus.

Att slungas iväg av gravitationen

Även om det inte är omöjligt att bygga raketer som skickar rymdsonder till Merkurius eller Saturnus i Hohmannbanor vore det bra om det gick att spara bränsle; då kan själva rymdsonden göras större och bättre med fler vetenskapliga experiment. Tricket är att svänga förbi en annan planet för att öka farten (eller minska, om det är det man vill). Exempelvis skulle en rymdsond till Saturnus kunna svänga förbi Jupiter på vägen för att få lite extra skjuts. En bonus är att det kan vara kul att ta en koll på Jupiter när man ändå är i närheten.

En fråga om perspektiv

Att få fart bortåt av en planets gravitation kan tyckas paradoxalt: gravitationen drar ju till sig saker! Men den kan alltså också fungera som en slunga, som slänger iväg rymdsonden med högre fart än den hade från början.

Låt oss ta en rymdsond till Saturnus som exempel för att förstå ungefär vad som händer. Rymdsonden placeras först i en Hohmannbana som tar den till Jupiter. Jupiter rör sig snabbare än rymdsonden och hinner upp den. (Jupi-

ter har tillräcklig fart för att gå i en cirkelbana runt solen, medan rymdsonden med sin lägre fart skulle falla tillbaka in mot solen och jorden, om det inte vore för Jupiters gravitation.) När rymdsonden är nära Jupiter, drar Jupiters gravitation med sig sonden en bit, och ger den större fart. Jupiter klarar inte av att fånga in sonden helt, utan släpper till sist greppet. Rymdsonden far nu iväg med större hastighet, ut mot Saturnus.

Matematiskt kan man se det hela som en fråga om perspektiv: att se banan från solen eller från planeten. I förhållande till Jupiter ändrar rymdsonden bara riktning, men i förhållande till solen ändras också dess fart (se faktaruta).

Varifrån kommer energin?

Högre hastighet för rymdsonden betyder att den vunnit rörelseenergi. Energi kan inte skapas ur ingenting, så något annat måste ha förlorat energi. Det har Jupiter gjort: planeten rör sig lite långsammare efter mötet med rymdsonden. Men eftersom Jupiter väger ungefär en miljon miljard miljarder gånger mer än rymdsonden, så förlorar den så lite i hastighet att det är helt omöjligt att mäta.

Exempel: Cassini, Messenger och Ulysses

Många rymdsonder har utnyttjat ”gravitationella slungor” på sina färder genom solsystemet. Ofta är banorna komplicerade, med flera möten med planeter för att öka eller minska hastigheten, eller för att ändra riktning på banan.

Cassini är ett bra exempel. Sonden sköts upp i oktober 1997, passerade Venus, sedan jorden, sedan Venus igen, och så Jupiter för att nå fram till Saturnus i juli 2004. Hela

Gravitationella slungor

I vårt exempel färdas en rymdsond i en Hohmannbana till Jupiter, som slungar iväg sonden vidare mot Saturnus.

Under större delen av färden till Jupiter kan man helt försumma Jupiters gravitation: sonden går i en stor ellipsbana runt solen, som ju dominerar solsystemets gravitation. Men när den närmar sig Jupiter blir Jupiters gravitation starkare än solens, och nu kan vi tänka oss att sonden är i en bana runt Jupiter i stället. Vi byter alltså perspektiv. Banan är en s.k. hyperbel: en öppen kurva som kommer långt bortifrån, böjer av runt Jupiter, och sedan försvinner mot oändligheten. Sondens hastighet är densamma på väg in mot planeten som på väg ut från den, men dess riktning ändras. Sett från solen ändras också farten.

För att förstå vad som händer antar vi att rymdsonden gör en 180-graders-sväng runt Jupiter (det är inte riktigt rätt, men nästan), se figuren. Sett från Jupiter har sonden en viss hastighet u på ett visst avstånd. På väg in är hastigheten riktad åt höger, och på väg ut åt vänster. Sett från solen måste vi också ta hänsyn till Jupiters hastighet, som är v och riktad åt vänster. Före svängen runt Jupiter är sondens hastighet sett från solen $v-u$. Efteråt är hastigheten $v+u$. Hastighetsändringen är alltså $2u$. I praktiken kan hastighetsändringen bli flera km/s, vilket är mycket!

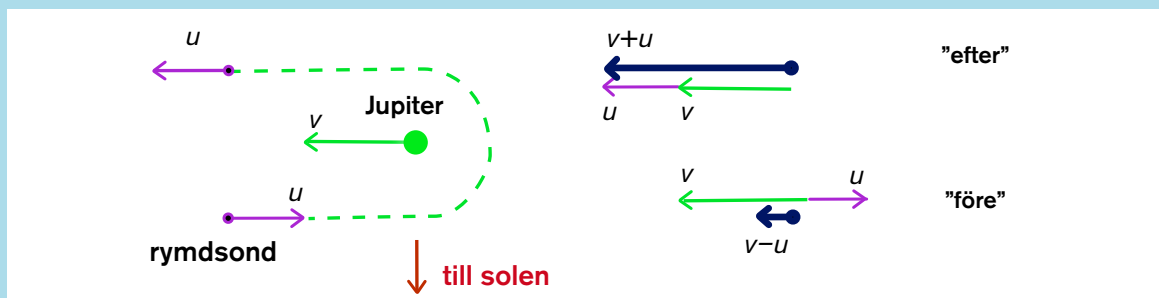


DIAGRAM: MAGNUS THOMASSEN

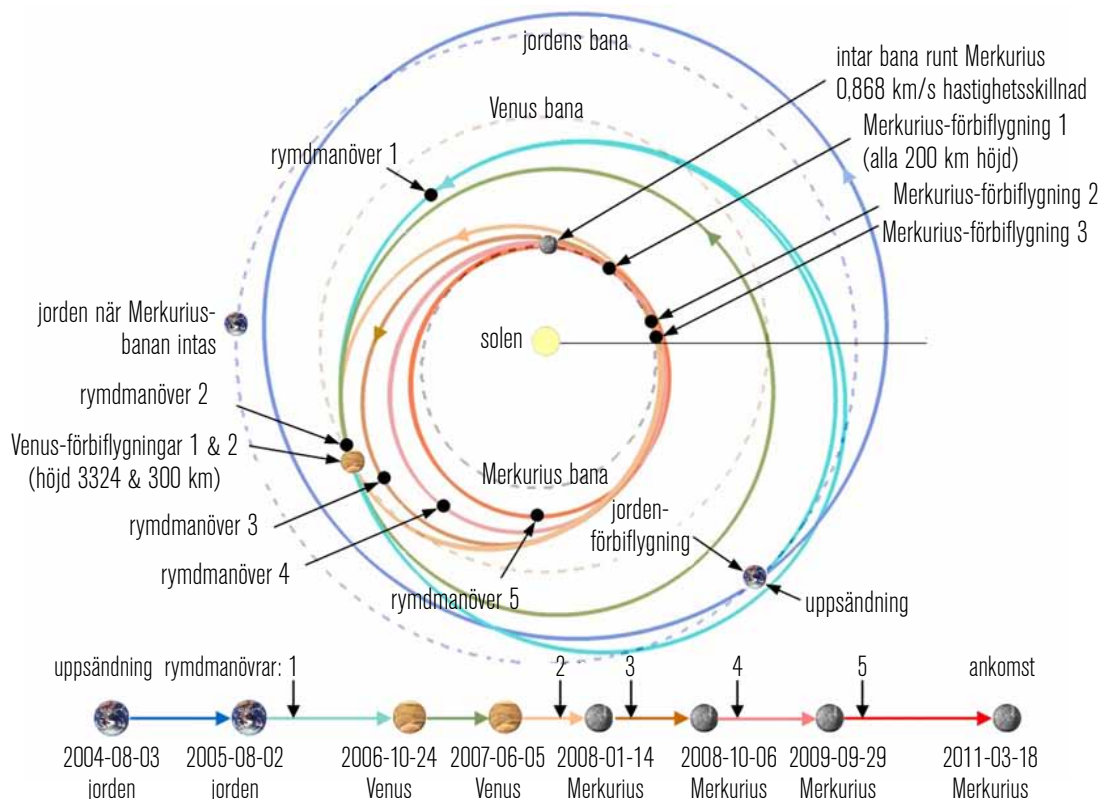


DIAGRAM: JHU/APL

Så åkte sonden Messenger från jorden till Merkurius. Banorna ses ovanifrån från ekliptikans nordpol.

färden tog 6,7 år, inte mycket längre än vad en färd i en Hohmannbana hade tagit.

Ett annat exempel är Messenger, som på sin färd till Merkurius passerade jorden en gång, Venus två gånger, och Merkurius själv tre gånger, innan den gick in i bana runt Merkurius i mars 2011 (se bilden ovan). Färden tog sju år, mycket längre än i en Hohmannbana.

Rymdsonden Ulysses använde sig av Jupiters gravitation för ett annat syfte. Ulysses' uppgift är att studera solens polarmråden, och den skulle placeras i en bana som tar den över solens poler. Därför måste dess banplan bytas: i stället för att färdas i planeternas plan skulle dess bana ändras till att bli ungefärligen vinkelrätt mot det. En sådan ändring vore i praktiken omöjlig att genomföra med en raket. I stället färdades Ulysses ut mot Jupiter men över Jupiters nordpol, och slungades nedåt och in i en bana som tog den in mot solen och över solens poler.

Framtiden?

Är Hohmannbanor och gravitationella slungor enda sättet att resa i solsystemet? Nej, det finns andra idéer och möjligheter.

En metod handlar om så kallade kaotiska interplanetära supermotorvägar. Då utnyttjar man på ett ännu listigare sätt planeternas gravitation för att hitta banor mellan dem som bara kräver mycket små knuffar av raketmotorer då och då. Men det tar lång tid att färdas sådana vägar.

Vanliga raketmotorer använder förbränning, alltså en

kemisk reaktion som får fart på avgasmolekylerna. Det går åt mycket bränsle, och farten på molekylerna är inte så hög. En annan sorts raketmotor använder elektricitet: en elektrisk spänning sätter fart på elektriskt laddade partiklar (joner). Farten hos de laddade partiklarna kan bli mycket hög, den elektriska energin som krävs behöver man inte ta med sig utan den kan man samla in med solceller, och det går inte åt mycket bränsle. Sådana raketmotorer ger bara en liten knuff åt rymdsonden, men kan å andra sidan verka under lång tid, flera år (till skillnad mot vanliga raketer där det är frågan om minuter) och den sammanlagda effekten blir stor. Den svensktbyggda rymdsonden SMART-1 reste till månen med en elektrisk raketmotor. Färden dit tog drygt ett år.

En tredje metod är solsegel: med ett stort segel, flera kvadratkilometer kan behövas, kan en rymdsond få fart av solljuset och röra sig i en spiralbana ut mot de yttre planeterna, eller bromsas för att ta sig in mot Venus eller Merkurius. Det är solljuset som trycker på seglet; effekten av solvinden (som är laddade partiklar från solen) är obetydlig. Liksom med elektriska raketer är kraften inte stor, men den verkar under lång tid. Den här tekniken är ännu på experimentstadiet. Ett lyckat test gjordes 2010 med den japanska rymdsonden IKAROS.

Nästa stora europeiska rymdsondsprojekt, Bepi-Colombo som skall skickas iväg till Merkurius år 2014, kommer att utnyttja både gravitationella slungor och elektriska raketmotorer. ★

MAGNUS THOMASSON är docent vid Onsala rymdobservatorium och Institutionen för rymd- och geovetenskap, Chalmers tekniska högskola, Göteborg