

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale
Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale «La fionda gravitazionale»

Tutor universitario: Prof. Colombatti Giacomo

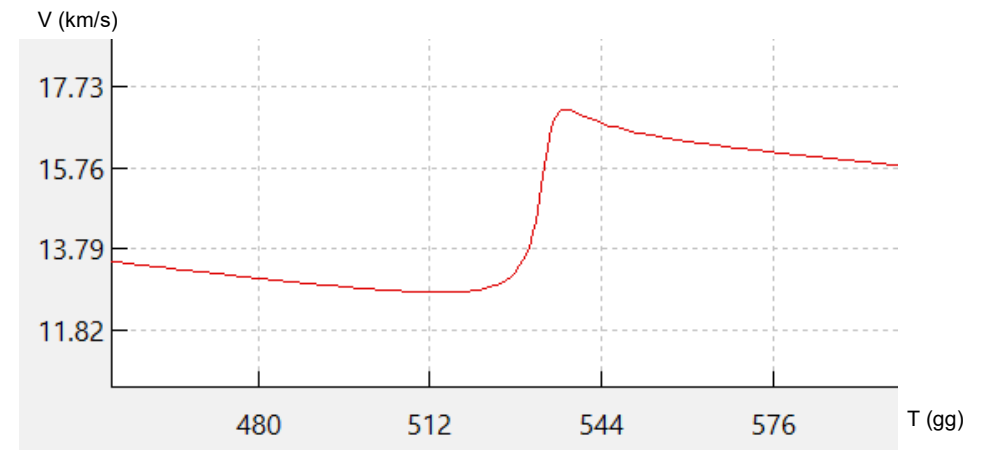
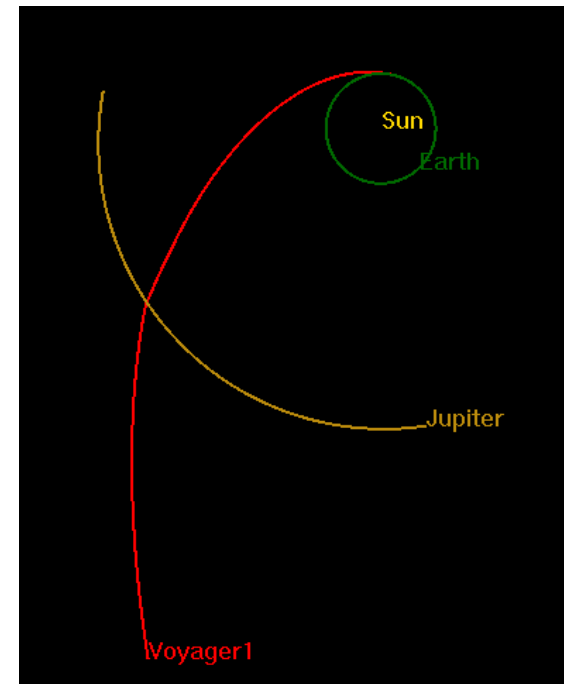
Laureando: *Sargenti Jonathan 2004395*

Padova, 21/09/2023

La fionda gravitazionale è una tecnica di volo spaziale che sfrutta l'attrazione gravitazionale di un pianeta per alterare la **traiettoria** e la **velocità** di un velivolo.

Utilizzata principalmente per viaggi verso i pianeti più esterni, permette di ridurre:

- quantità di propellente necessario per le manovre
- tempo di trasferimento

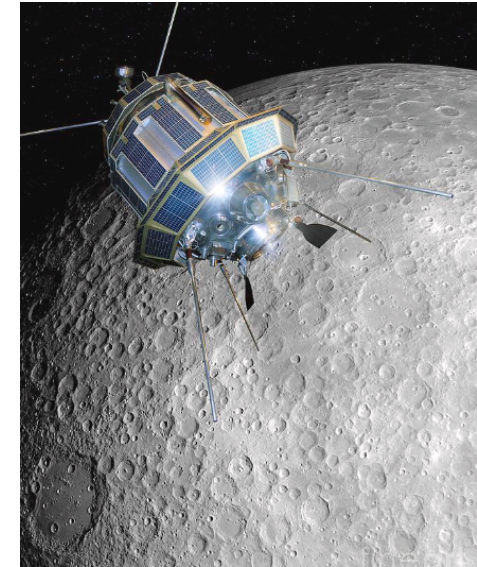


La presentazione è divisa in più parti:

- Descrizione della tecnica, con spiegazione del funzionamento e confronto con altri metodi di trasferimento
- Analisi con metodi semplificativi per il calcolo degli effetti sulla traiettoria del velivolo
- Esempi di missioni spaziali servitesi della fionda gravitazionale per raggiungere il proprio obiettivo

Nei primi anni Sessanta, il matematico statunitense Michael Minovitch dimostrò che la spinta gravitazionale di un pianeta poteva essere sfruttata per la propulsione di un velivolo.

Le prime sonde che subirono l'effetto fionda furono la sonda sovietica Luna 3 nel 1959 e la Pioneer 10, americana, che riuscì, grazie alla spinta di Giove, a superare la velocità di fuga del sistema solare.



Luna 3



Pioneer 10

Il velivolo deve effettuare un **flyby** ravvicinato del pianeta: il campo gravitazionale produrrà una variazione della velocità e della direzione tra i punti di entrata e uscita della sfera di influenza.

Lo scambio di energia coinvolge sia il velivolo che il pianeta, ma sarà impercettibile per quest'ultimo a causa della vasta differenza di massa.

VANTAGGI

- risparmio di carburante
- riduzione del tempo di viaggio
- possibilità di raggiungere destinazioni altrimenti proibitive

LIMITAZIONI

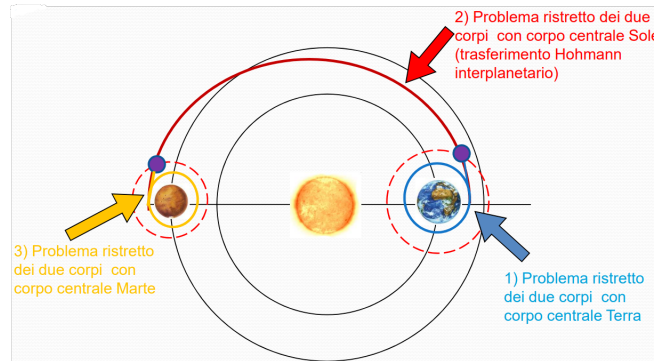
- massa disponibile per ricevere la spinta
- atmosfera del pianeta

Il trasferimento di Hohmann è il metodo più semplice per inviare un velivolo da un pianeta a un altro: prevede l'utilizzo di un'orbita ellittica in cui i due pianeti coincidono con il perielio e l'afelio, rispettivamente punti di minima e massima distanza dal fuoco.

ii.unipd.it

Metodo delle Patched Conics

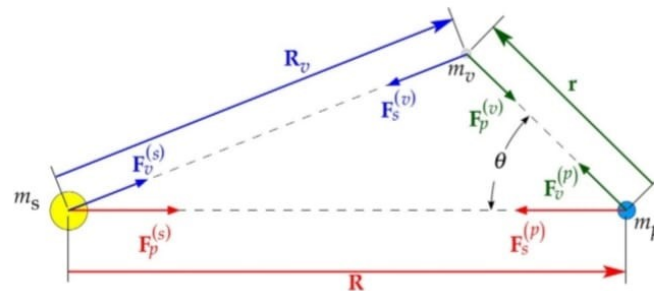
Questo metodo prevede la riduzione del problema all'analisi di singoli problemi dei due corpi introducendo il concetto di sfera di influenza.



Sfera di Influenza

La sfera di influenza è definita come luogo dei punti per cui $\frac{p_s}{a_p} < \frac{P_p}{A_s}$, quindi la distanza limite dal pianeta è

$$r_{sol} = R \left(\frac{m_p}{m_s} \right)^{2/5}$$



Pianeta	Δv (km/s)	Δm (%)	T
Mercurio	13.18	98.98	105.5 d
Venere	6.65	89.57	146 d
Marte	5.58	84.98	259 d
Giove	23.9	99.97	2,7 y
Saturno	18	99.78	6 y
Urano	14.65	99.3	16 y
Nettuno	15.4	99.47	30.6 y
Plutone	11.5	98	45.56 y

Variazione della velocità

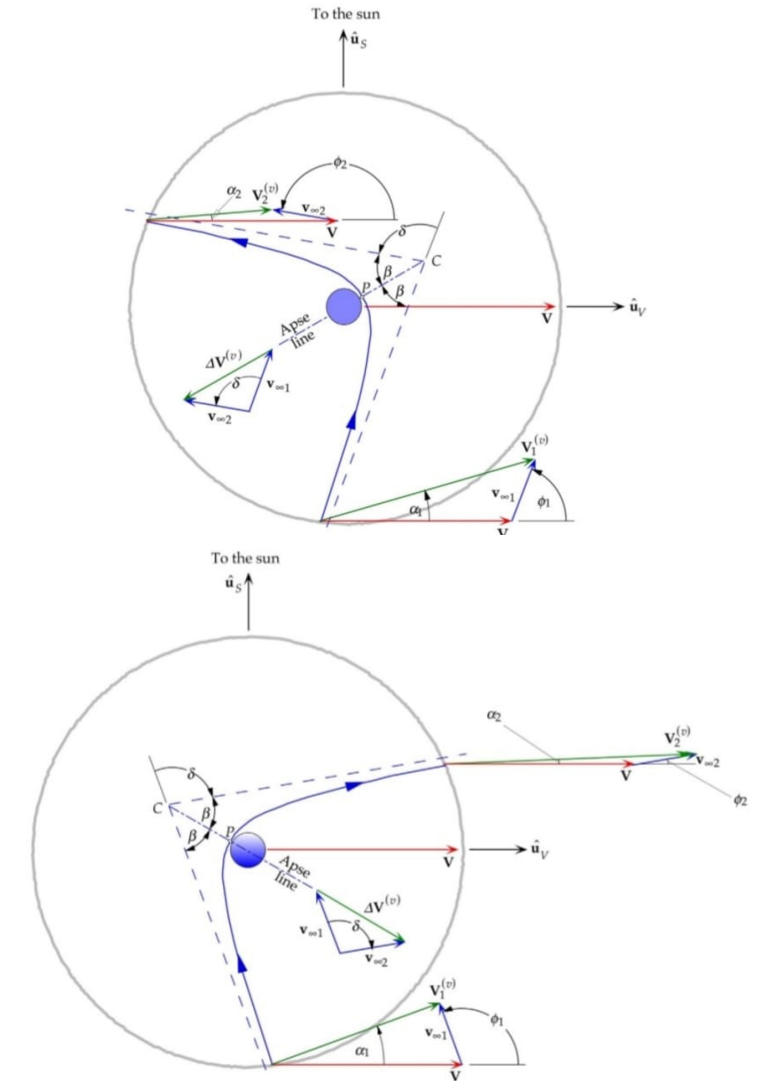
La variazione della velocità eliocentrica corrisponde a quella della velocità di fuga dal pianeta: $v_{\infty 1}$ e $v_{\infty 2}$ hanno stesso modulo, ma all'uscita della SOI il vettore è ruotato di un angolo δ . Sommando vettorialmente la velocità del pianeta, si otterranno due effetti opposti:

- Flyby anteriore: la componente del vettore ΔV lungo la direzione della velocità del pianeta è negativa \rightarrow decelerazione
- Flyby posteriore: la componente del vettore ΔV lungo la direzione della velocità del pianeta è positiva \rightarrow accelerazione

Parametri orbitali

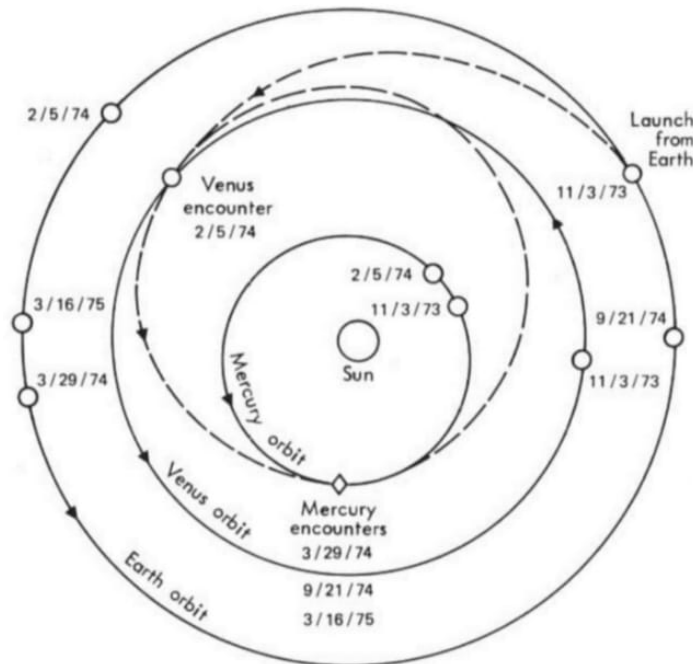
Conoscendo eccentricità, momento angolare e anomalia vera dell'orbita eliocentrica precedente al sorvolo è possibile ricavare la velocità iniziale e, dunque, l'eccesso iperbolico in entrata \rightarrow l'eccesso iperbolico in uscita \rightarrow la velocità eliocentrica finale.

Ottenute le componenti radiale e trasversale, si ricavano i nuovi parametri orbitali.



Il Jet Propulsion Laboratory scoprì, con l'aiuto di Giuseppe Colombo, l'opportunità di una traiettoria Terra-Venere-Mercurio per il 1970 e il 1973: Mariner 10 venne lanciato il 3/11/1973.

Con la traiettoria suggerita da Colombo, la sonda raggiunse Mercurio con un'orbita di periodo circa doppio di quello di rivoluzione del pianeta, permettendo altri due sorvoli.



Il secondo e il terzo sorvolo hanno permesso di scattare circa altre 300 fotografie di Mercurio, anche se l'emisfero illuminato era quasi lo stesso del primo incontro, perciò parte del pianeta è rimasto inosservato.

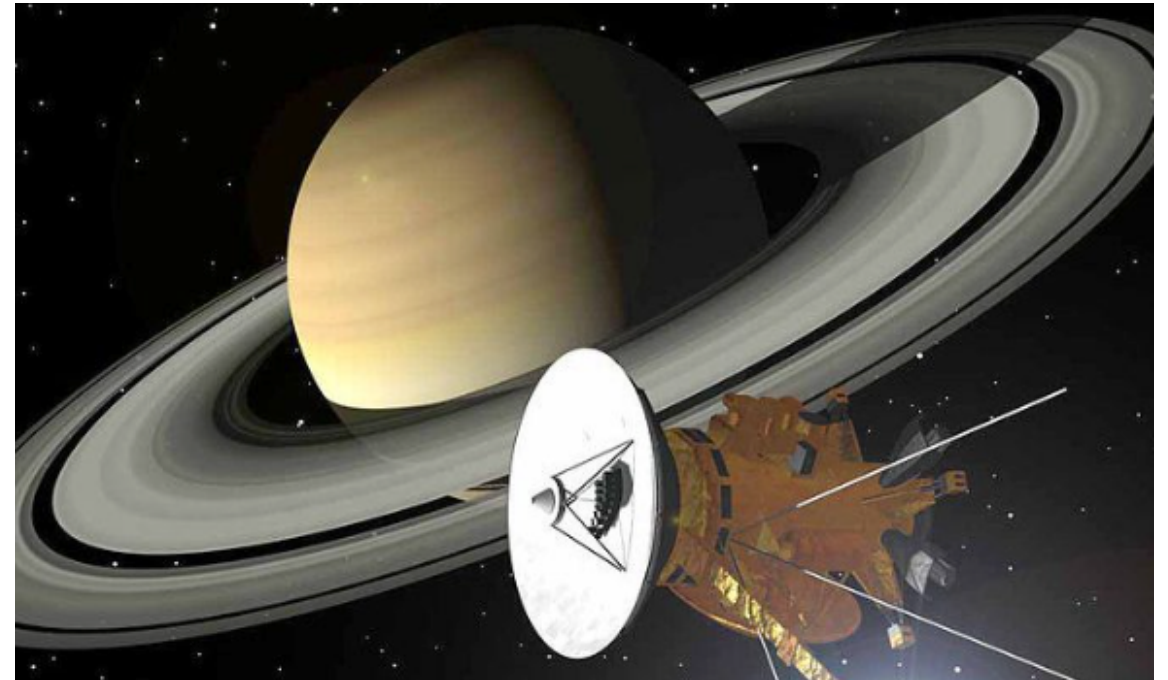
L'obiettivo principale della missione prevedeva lo studio di ambiente, atmosfera e superficie dei due pianeti.

Mariner 10 fu il primo velivolo a visitare Mercurio e a servirsi del gravity assist per raggiungere un secondo pianeta.

Composta dall'orbiter Cassini e dal lander Huygens, è stata una missione congiunta NASA/ESA/ASI ideata per trasportare il lander verso Titano e orbitare attorno a Saturno per studiare il pianeta e i suoi anelli e satelliti.

Obiettivi:

- Studiare la struttura degli anelli
- Determinare la composizione delle superfici dei satelliti
- Studiare atmosfera e magnetosfera di Saturno
- Studiare la composizione interna della superficie di Titano

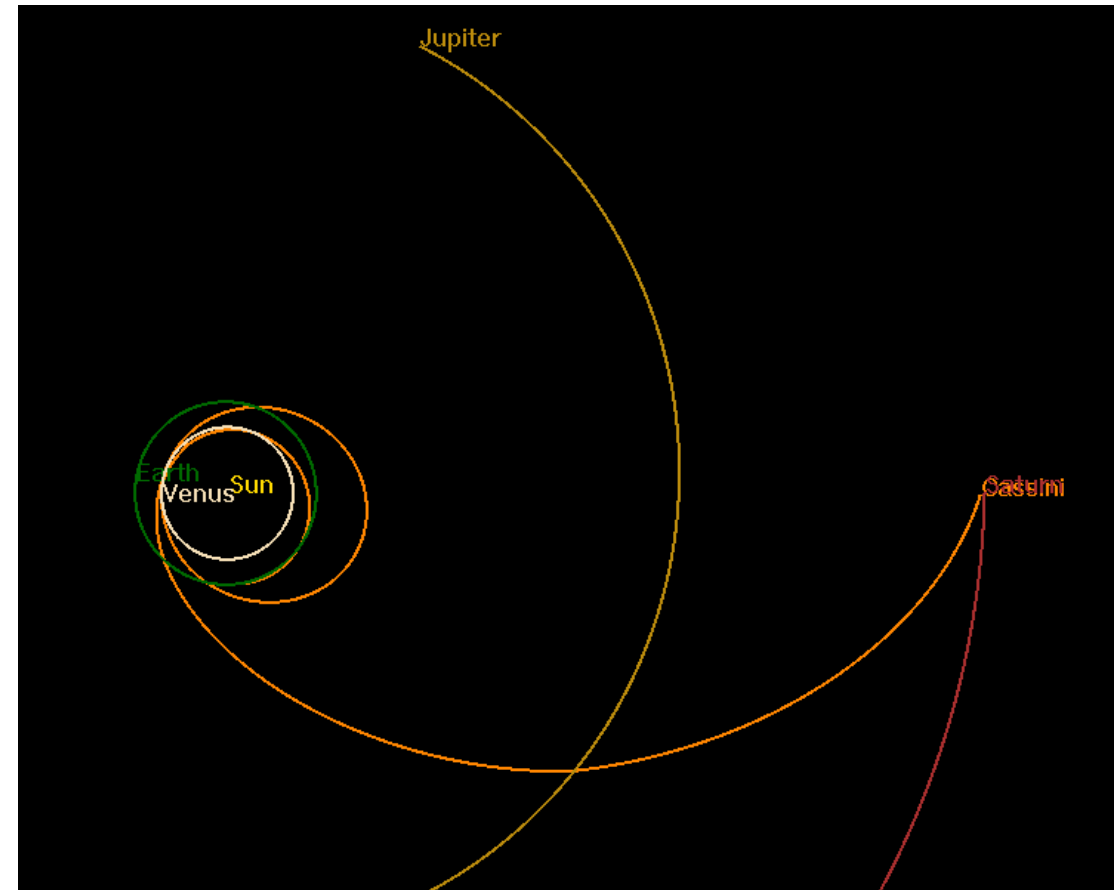


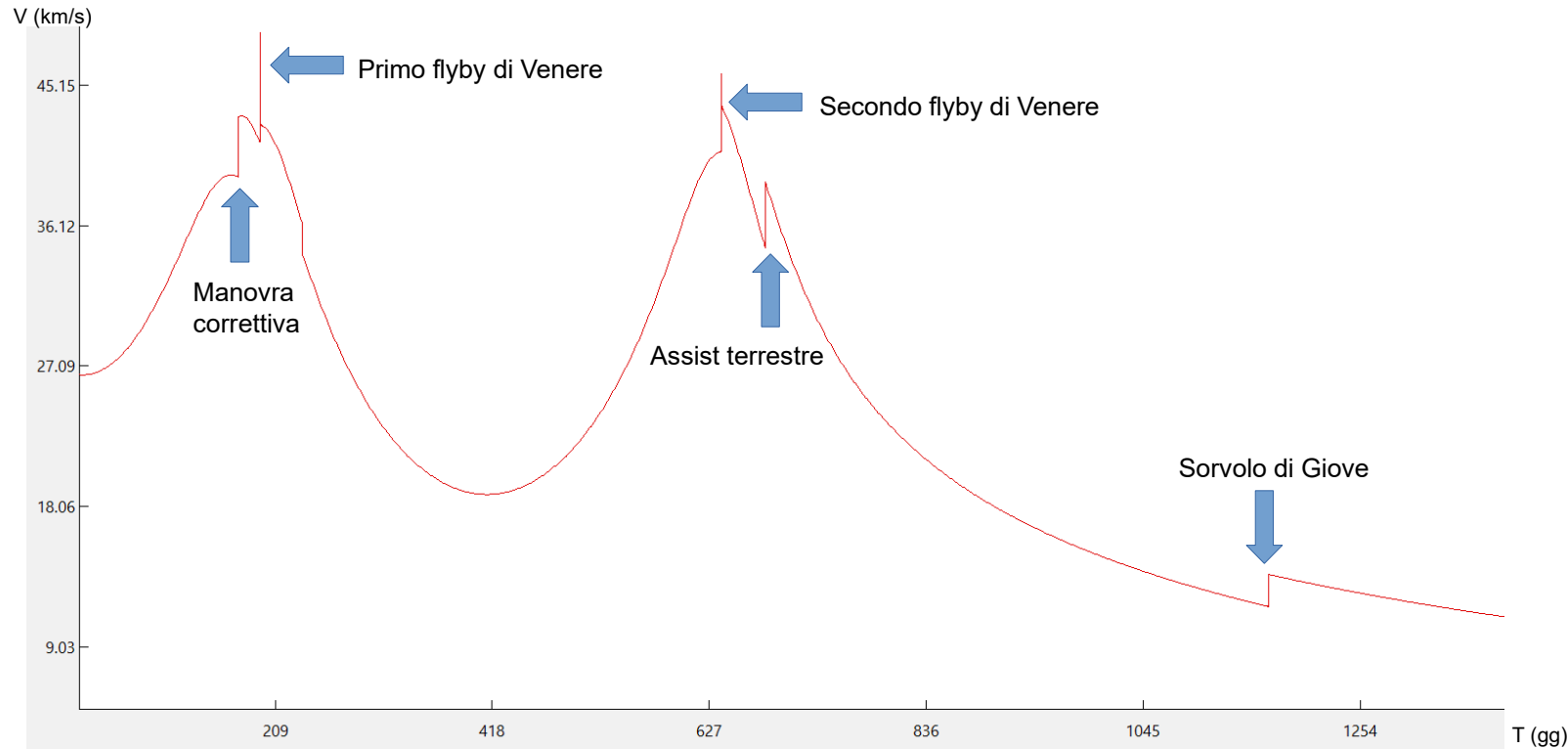
Il viaggio

Cassini percorse una traiettoria *VVEJGA* (Venus-Venus-Earth-Jupiter Gravity Assist) effettuando due flyby di Venere, uno della Terra e uno di Giove.

Data di lancio: 15/10/1997

- 1) Otto mesi dopo il lancio, Cassini incontra Venere, ottenendo una spinta di 7 km/s
- 2) Il secondo sorvolo avviene circa un anno dopo
- 3) Il flyby della Terra invia la sonda verso Giove
- 4) L'ultimo assist permette di aggiustare la traiettoria verso Saturno, raggiunto dopo 7 anni dalla partenza

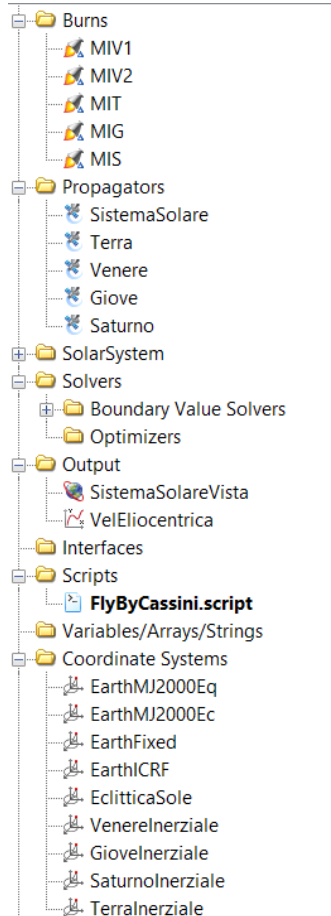




Le discontinuità nell'andamento della velocità eliocentrica corrispondono, oltre alle manovre per correggere la traiettoria, agli effetti della fionda gravitazionale.

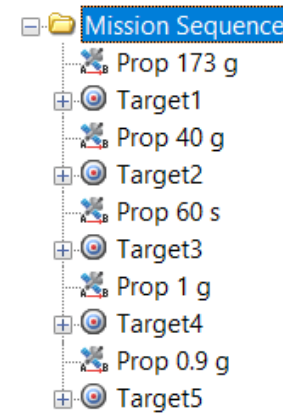
- Il primo incontro con Venere porta a un aumento di 7 km/s
- Il secondo e terzo assist conferiscono entrambi un incremento di circa 5 km/s
- Il sorvolo di Giove comporta una spinta di 2 km/s

L'immagine raffigurante il viaggio di Cassini-Huygens e i grafici dell'andamento della velocità sono stati ottenuti mediante l'utilizzo di GMAT.

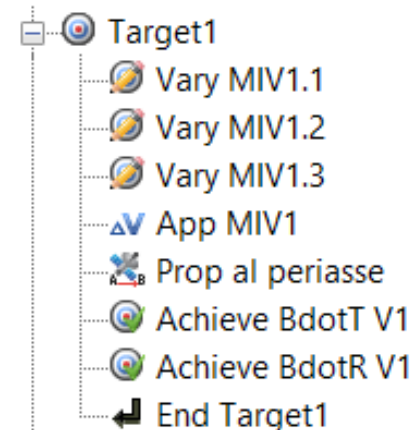


Nell'albero risorse si aggiungono:

- 5 manovre impulsive, una per ogni flyby
- 4 propagatori per i pianeti e uno per il sistema solare
- un grafico XY per la velocità eliocentrica
- 4 sistemi di coordinate inerziali per i pianeti e uno centrato sull'eclittica con il Sole come origine



Nella sequenza di missione si alternano i comandi *Propagate* e *Target*, ciascuno per ogni sorvolo.



Il comando Target prevede a sua volta un'ulteriore serie di comandi:

- 3 comandi *Vary* per le componenti delle manovre correttive
- 1 comando *Maneuver* per applicare l'impulso
- 1 comando *Propagate*
- 2 comandi *Achieve*, per raggiungere i requisiti di sorvolo imposti

Dunque, i benefici che si ottengono servendosi della fionda gravitazionale sono:

- Riduzione di costi e tempi di missione
- Risparmio di carburante

Esempi

La missione Cassini-Huygens raggiunse Saturno con una quantità di propellente pari al 55% della massa totale del velivolo, contro il 99.78% richiesto per un trasferimento di Hohmann, con un risparmio di circa 220.000 \$ solo per il carburante. Voyager 2 incontrò Nettuno solo dodici anni dopo la partenza, mentre ne avrebbe impiegati trenta con un volo diretto.

Si deve osservare che l'effetto principale dell'utilizzo di questa tecnica è stato l'**aumento** considerevole delle **conoscenze** acquisite del sistema solare, soprattutto dei dati riguardanti i pianeti più esterni.

Tra le più recenti, si può menzionare la missione JUICE (Jupiter Icy Moon Explorer) dell'Agenzia Spaziale Europea: partita il 14/04/2023, sfrutterà la spinta gravitazionale di Terra, Luna e Venere con un totale di 4 flyby per raggiungere Giove, con obiettivo principale lo studio del pianeta e di Ganimede, Europa e Callisto, le sue lune ghiacciate.

Fondamentale è stato il contributo italiano, in particolare dell'ASI e della comunità scientifica nazionale.

Cassini-Huygens, [Cassini-Huygens – Wikipedia](#), 04/08/2023.

Cassini Tour of Saturn and its Moons, [ESA Science & Technology - Cassini Tour of Saturn and its Moons](#), 01/09/2019.

Cenni alle orbite interplanetarie,

https://elearning.unipd.it/dii/pluginfile.php/308896/mod_resource/content/1/10%20-%20Cenni%20traiettorie%20interplanetarie.pdf,
12/08/2023.

Delta-v (astrodinamica), [Delta-v \(astrodinamica\) – Wikipedia](#), 23/01/2022.

Getting to Saturn, [ESA Science & Technology - Getting to Saturn](#), 01/09/2019.

Howard D. Curtis, 2021, *Orbital Mechanics for Engineering Students*, Elsevier, Amsterdam.

La tecnica del gravity assist o propulsione gravitazionale,

[La tecnica del gravity assist o propulsione gravitazionale – Rivista Periodica d'Osservazione Casuale \(scienzamagia.eu\)](#), 12/07/2017.

NASA Space Science Data Coordinate Archive, Mariner 10, [NASA - NSSDCA - Spacecraft - Details](#), 28/10/2022.

NASA Space Science Data Coordinate Archive, Cassini, [NASA - NSSDCA - Spacecraft - Details](#), 28/10/2022.

The Voyage of Mariner 10, [ch2 \(nasa.gov\)](#), 06/08/2004.

Tutorial: Mars B-Plane Targeting, [Chapter 8. Mars B-Plane Targeting \(sourceforge.net\)](#), 12/08/2023.