Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

Relazione per la prova finale «Analisi della missione Voyager: obiettivi della missione e traiettorie delle sonde»

Tutor universitario: Prof. Giacomo Colombatti

Laureando: *Alessio Puglisi*

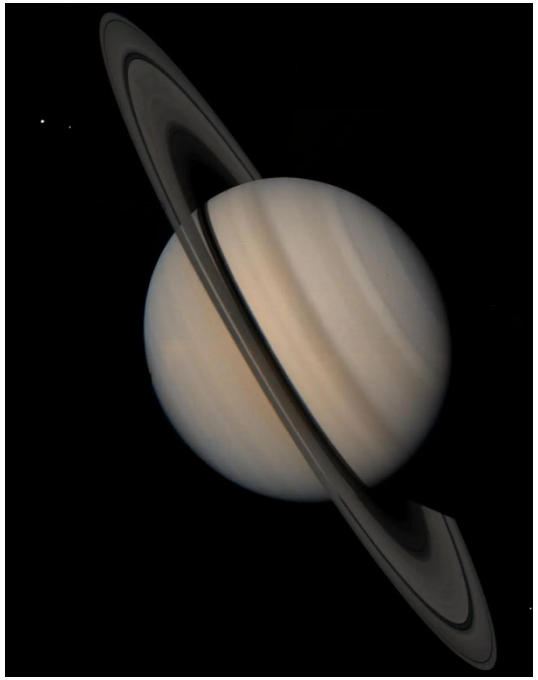
Padova, 12/09/2024

INTRODUZIONE: OBIETTIVI DELLA MISSIONE

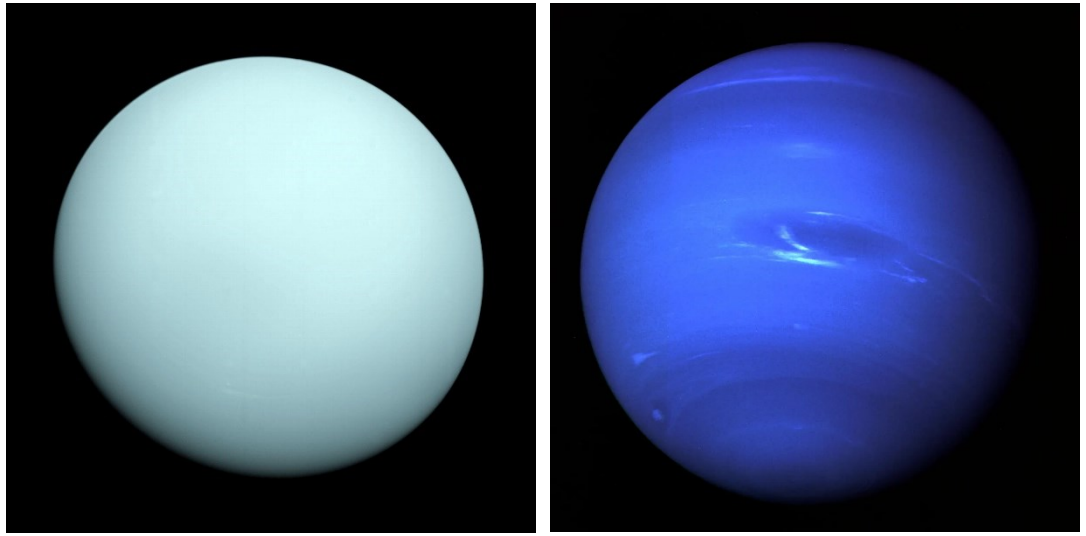
Obiettivo principale della missione: esplorare il sistema solare esterno raccogliendo dati e scattando foto ai pianeti giganti e ai loro relativi satelliti.

Estensione della missione principale: l'allineamento favorevole dei pianeti ha reso possibile il passaggio per i due giganti ghiacciati.

Voyager 1:
Giove e i due satelliti Io (a sinistra) ed Europa



Voyager 1:
Saturno e le sue lune (in alto a sinistra)



Voyager 2:
I giganti ghiacciati Urano (a sinistra) e Nettuno

OBIETTIVI DEL LAVORO

Limiti tecnologici ⇨

- Vincoli sulla spinta massima
- Utilizzo di molto propellente

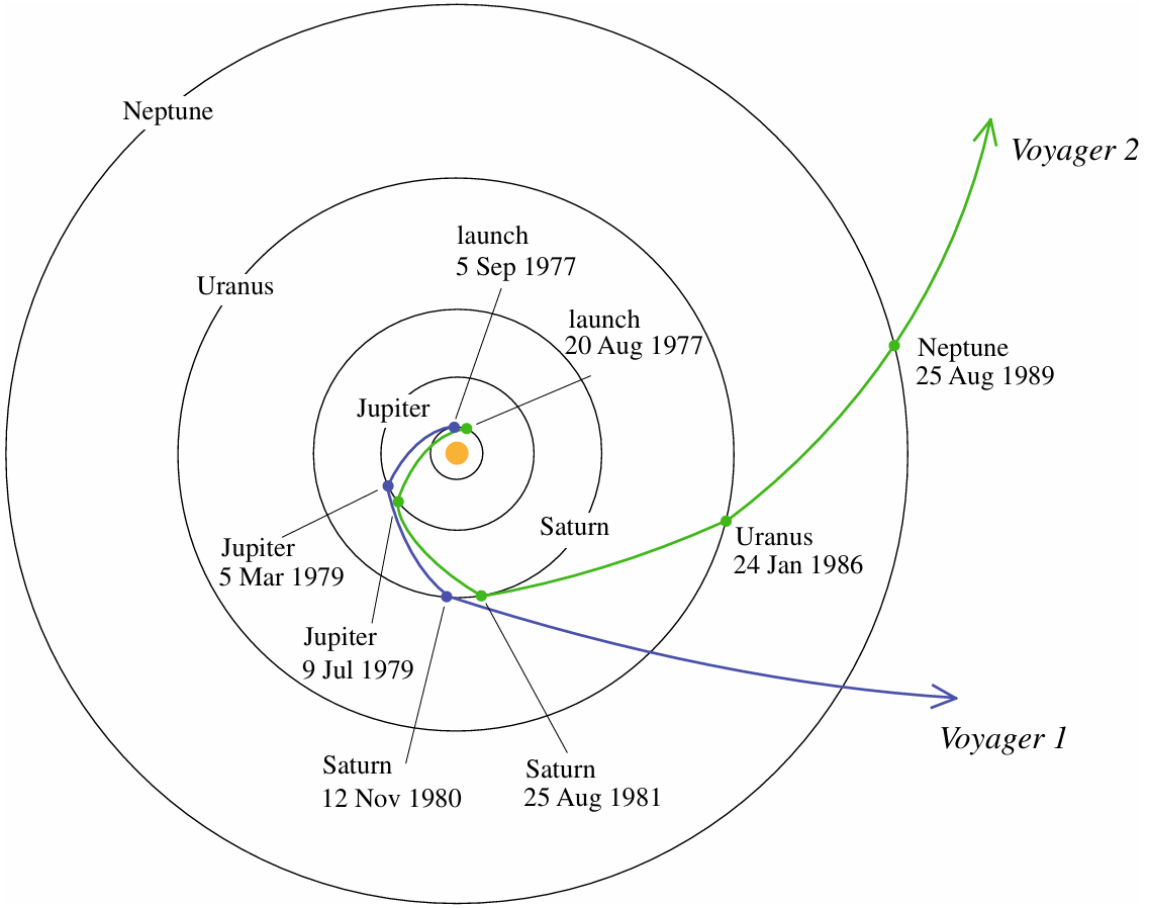
Obiettivo: analizzare la traiettoria delle sonde Voyager 1 e Voyager 2 per capire come sia stato possibile raggiungere i pianeti più esterni del sistema solare.

⇩

Gravity assist:

Sfruttare l'attrazione gravitazionale dei pianeti, durante i flyby, per ottenere un incremento di velocità delle sonde

A ONCE-IN-A-LIFETIME ALIGNMENT



Piano di riferimento: eclittica terrestre del 1950

Parametri orbitali della sonda ***Voyager 1***: (www.nasa.gov)

- $a = semiasse\ maggiore\ [km]$
- $e = eccentricità$
- $i = inclinazione\ [deg]$
- $OM = longit.\ nodo\ ascendente\ [deg]$
- $o = argomento\ del\ perielio\ [deg]$
- $M = anomalia\ media\ [deg]$

EARTH INJECTION TO JUPITER
Epoch = 9/8/77 09:08:17 ET
a = 745,761,000
e = .797783
i = 1.032182
OM = -17.565509
o = -.767558
M = .304932

JUPITER-CENTERED
Epoch = 3/5/79 12:05:26
a = -1,092,356
e = 1.318976
i = 3.979134
OM = 119.454908
o = -62.062795

JUPITER TO SATURN
Epoch = 4/24/79 07:33:03
a = -593,237,000
e = 2.302740
i = 2.481580
OM = 112.975465
o = -1.527299
M = 19.156329

SATURN-CENTERED
Epoch = 11/12/80 23:46:30
a = -166,152
e = 2.107561
i = 65.893904
OM = -167.106611
o = -58.836017

POST-SATURN
Epoch = 1/1/91 00:00
a = -480,926,000
e = 3.724716
i = 35.762854
OM = 178.197845
o = -21.671355
M = 688.967795

Fuoriuscita dall'eclittica

Analisi di un trasferimento ellittico

Analisi di un flyby iperbolico

Analisi di un trasferimento iperbolico

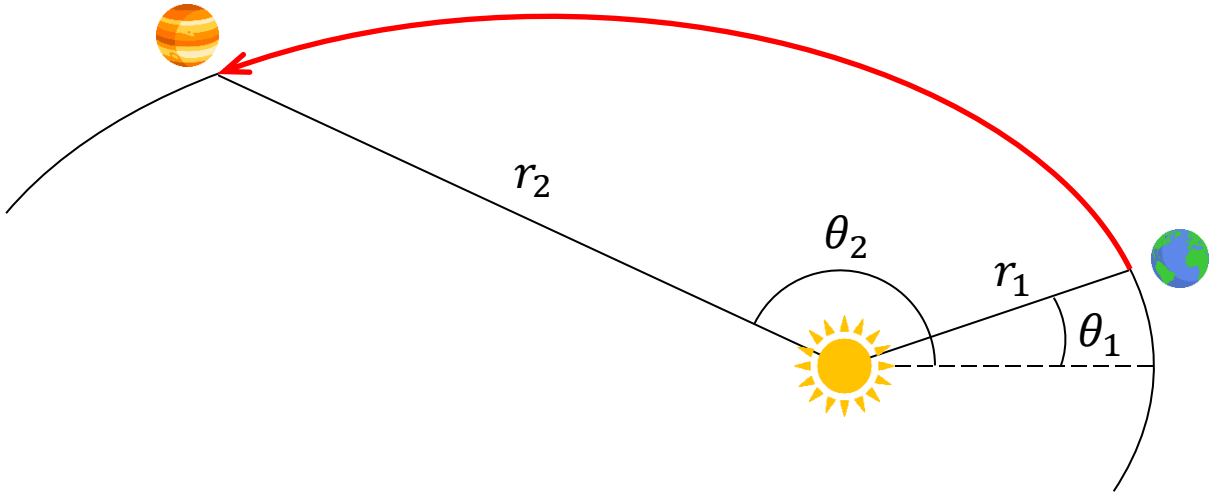
Scripts utilizzati per l'analisi delle traiettorie:

Fogli di calcolo.zip

ANALISI ORBITALE: TRASFERIMENTO ELLITTICO

EARTH INJECTION TO JUPITER
Epoch = 9/8/77 09:08:17 ET
a = 745,761,000
e = .797783
M = .304932

JUPITER-CENTERED
Epoch = 3/5/79 12:05:26 ET



Eq. dinamica
Eq. tempo

$\theta_1 = 4{,}49°$ $\quad \theta_2 = 145{,}27°$

$r_1 = 1{,}51 \cdot 10^8\ km$ $\quad r_2 = 7{,}87 \cdot 10^8\ km$

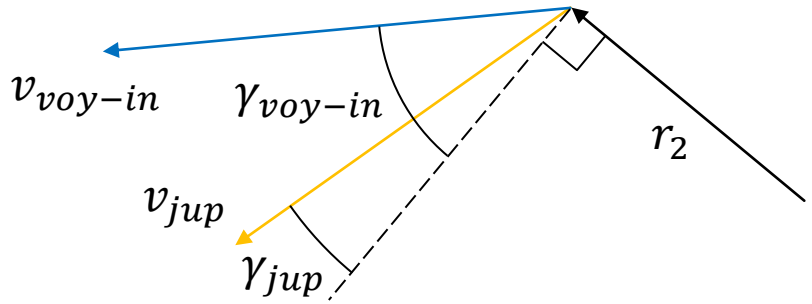
$v_1 = 39{,}75\ km/s$ $\quad v_2 = 12{,}62\ km/s$

$t_2 - t_1 \simeq 543\ d$
(dal perielio)

Valori all'arrivo su Giove:

$v_{voy-in} = v_2 = 12{,}62\ km/s$ $\quad \gamma_{voy-in} = 52{,}85°$

$v_{jup} = 12{,}83\ km/s$ $\quad \gamma_{jup} = 2{,}58°$

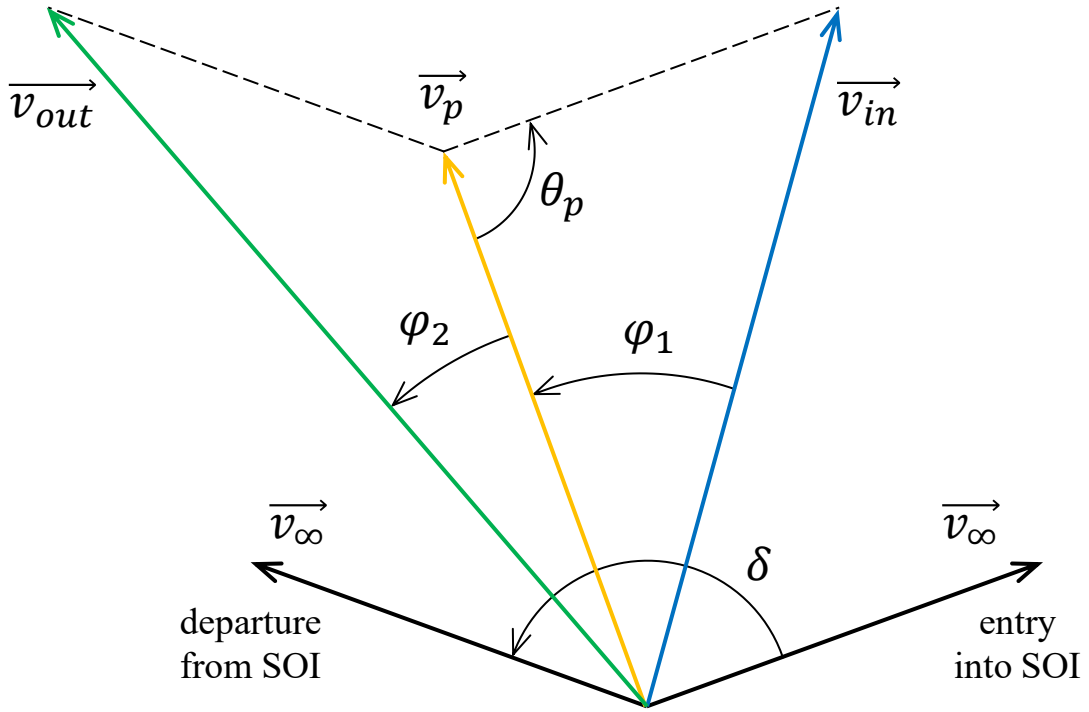


ANALISI ORBITALE: GRAVITY ASSIST

Approssimazioni

Durata flyby $\propto 2 \div 4\ mesi$ $\ll$ Periodo orbitale $> 12\ anni$ $\Rightarrow$ Durante il flyby $\overrightarrow{v_p} \approx costante$ $\Rightarrow$ **Sistema di riferimento inerziale**

$\Delta i < 1 \div 2\ deg$ $\Rightarrow$ $\overrightarrow{v_{in}}, \overrightarrow{v_p}, \overrightarrow{v_{out}}$ **sullo stesso piano**



$$\varphi_1 = \gamma_{in} - \gamma_p$$

$$v_\infty = \sqrt{{v_{in}}^2 + {v_p}^2 - 2 v_{in} v_p \cos\varphi_1}$$

$$\theta_p = arccos\left(\frac{{v_\infty}^2 + {v_p}^2 - {v_{in}}^2}{2 v_\infty v_p}\right)$$

$$v_{out} = \sqrt{{v_\infty}^2 + {v_p}^2 - 2 v_\infty v_p \cos(\theta_p + \delta)}$$

$$\varphi_2 = arccos\left(\frac{{v_{out}}^2 + {v_p}^2 - {v_\infty}^2}{2 v_{out} v_p}\right)$$

Teorema dei coseni

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2$$

ANALISI ORBITALE: FLYBY

JUPITER-CENTERED
Epoch = 3/5/79 12:05:26 ET
a = -1,092,356
e = 1.318976
(al perigiovio)

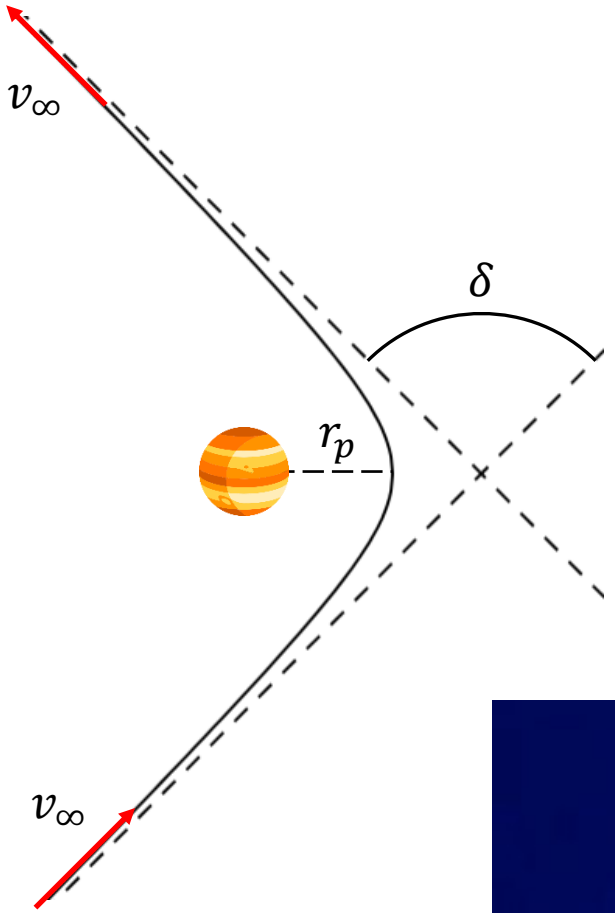
Eq. dinamica
Eq. tempo

$\left(\left|\overrightarrow{v_{voy-in}} - \overrightarrow{v_{jup}}\right| = 10{,}81\ km/s\right)$

$v_\infty = 10{,}77\ km/s$

$\delta = 98{,}61°$ $\quad t \simeq 99\ d$

$r_p = 348435\ km$



Risultati del gravity assist:

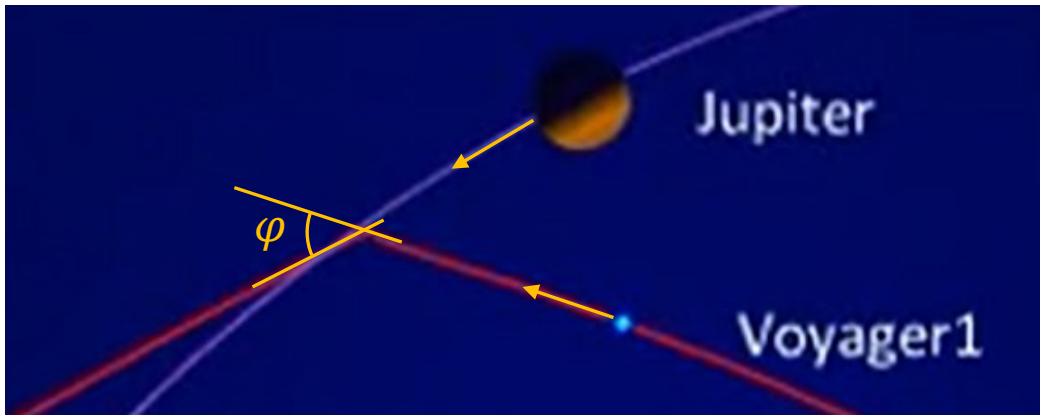
$\Delta v_{voy} = 10{,}71\ km/s$

$v_{out} = 23{,}33\ km/s$

$v_{fuga} = 18{,}03\ km/s$

$\varphi = 42{,}27°$

$\Delta i = 1{,}45°$



ANALISI ORBITALE: TRASFERIMENTO IPERBOLICO

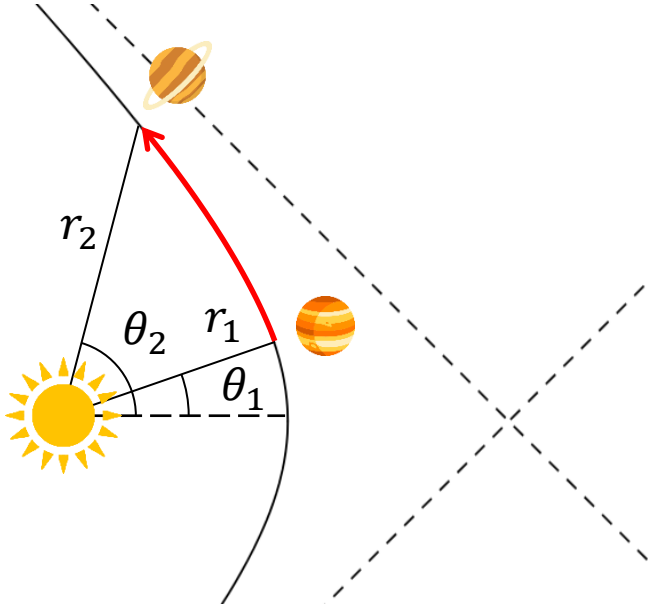
JUPITER TO SATURN
Epoch = 4/24/79 07:33:03 ET
a = -593,237,000
e = 2.302740
M = 19.156329

SATURN-CENTERED
Epoch = 11/12/80 23:46:30 ET

Eq. dinamica
Eq. tempo

Flyby su Saturno

$\Delta i = 33{,}28°$

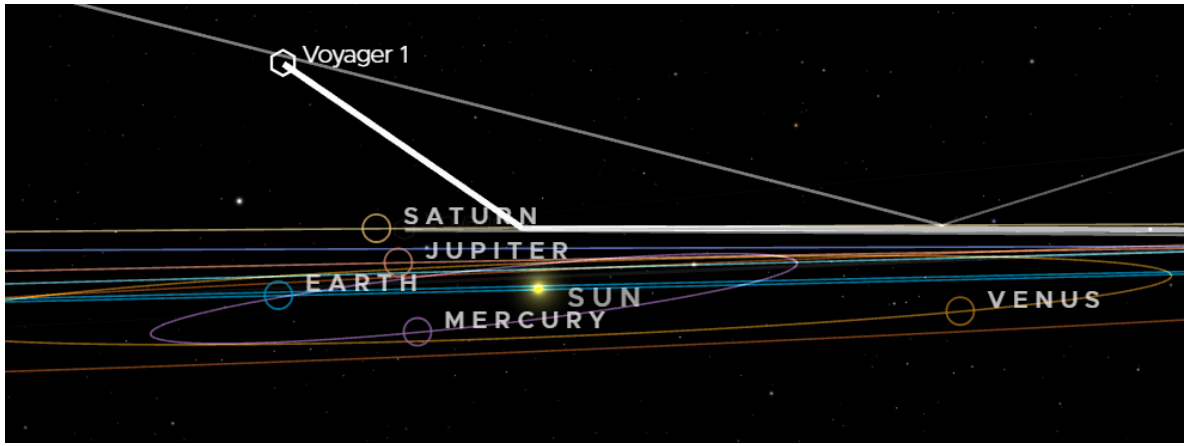


$\theta_1 = 22{,}57°$ $\quad \theta_2 = 70{,}13°$

$r_1 = 8{,}16 \cdot 10^8\ km$ $\quad r_2 = 1{,}43 \cdot 10^9\ km$

$v_1 = 23{,}43\ km/s \simeq v_{out}$ $\quad v_2 = 20{,}23\ km/s$

$t_2 - t_1 \simeq 569\ d$
(dal perielio)

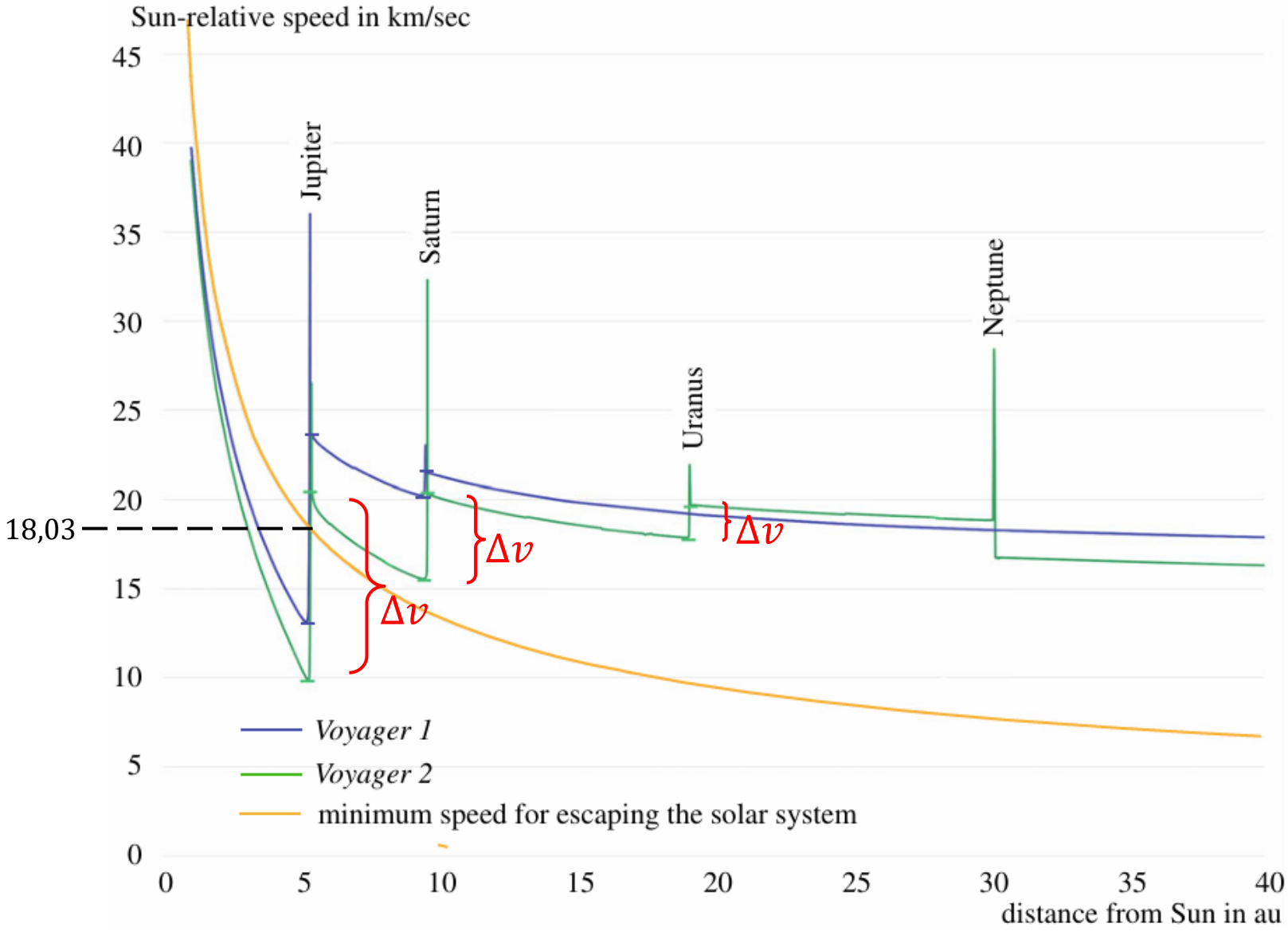


CONCLUSIONI: DATI RICAVATI

Trasferimenti	**Voyager 1**		**Voyager 2**			
	Terra-Giove	Giove-Saturno	Terra-Giove	Giove-Saturno	Saturno-Urano	Urano-Nettuno
Tipologia	Ellittico	Iperbolico	Ellittico	Iperbolico	Iperbolico	Iperbolico
$\theta_1\ [deg]$	4,49	22,57	−8,04	34,67	5,59	55,87
$\theta_2\ [deg]$	145,27	70,13	158,30	80,96	69,11	67,26
$r_1\ [km]$	$1{,}51 \cdot 10^8$	$8{,}16 \cdot 10^8$	$1{,}51 \cdot 10^8$	$8{,}36 \cdot 10^8$	$1{,}44 \cdot 10^9$	$3{,}44 \cdot 10^9$
$r_2\ [km]$	$7{,}87 \cdot 10^8$	$1{,}43 \cdot 10^9$	$7{,}91 \cdot 10^8$	$1{,}45 \cdot 10^9$	$2{,}87 \cdot 10^9$	$4{,}52 \cdot 10^9$
$v_1\ [km/s]$	39,75	23,43	38,96	19,42	20,33	19,32
$v_2\ [km/s]$	12,62	20,23	9,57	15,58	17,93	18,84
$t\ [days]$	543	569	685	711	1560	808

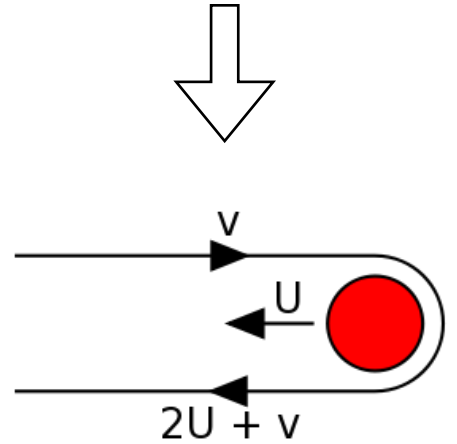
Flybys	**Voyager 1**	**Voyager 2**		
	Giove	Giove	Saturno	Urano
$v_{planet}\ [km/s]$	12,83	12,69	9,59	6,71
$\varphi\ [deg]$	42,27	24,56	45,93	17,29
$\Delta v_{voy}\ [km/s]$	10,71	9,92	4,68	1,73

CONCLUSIONI: OSSERVAZIONI



Δv dipende da:

- traiettoria
- $\Delta v_{max} = 2v_{planet}$



BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- Alexander J. Hahn. *Basic Calculus of Planetary Orbits and Interplanetary Flights. The missions of the Voyagers, Cassini, and Juno.* University of Notre Dame, 2020;
- NASA/JPL, *Voyager, Science Investigations,* https://science.nasa.gov/mission/voyager/science/ ;
- NASA/JPL, *Voyager, Hyperbolic Orbital Elements,* https://science.nasa.gov/mission/voyager/planetary-voyage#hyperbolic , agosto 2024;
- R. J. Cesarone. *A Gravity Assist Primer.* AIAA Student Journal, Volume 27, Number 1, 1989;
- NASA Science, *Solar System Exploration*, https://science.nasa.gov/solar-system/ .