

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

***Relazione per la prova finale
«La ISS: siti di lancio, raggiungimento
e orbita»***

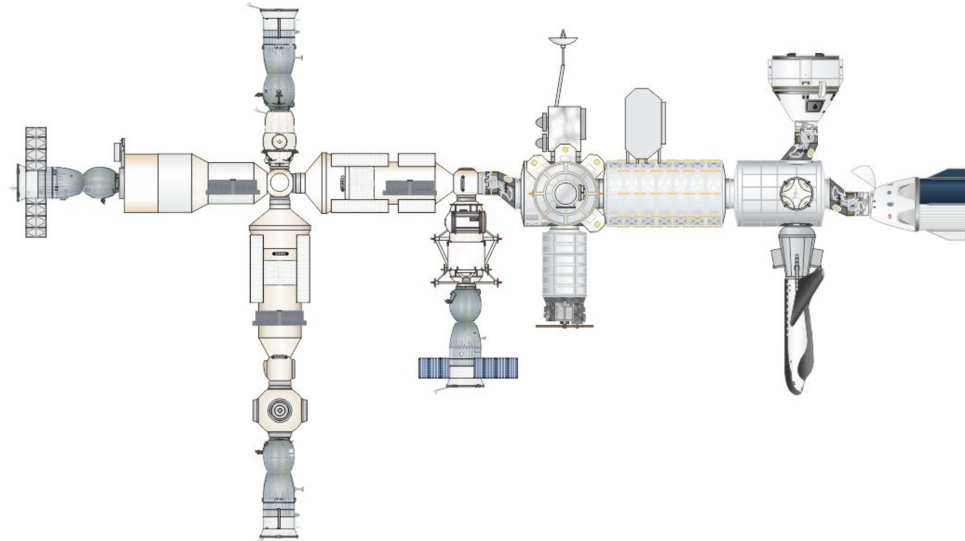
Tutor universitario: Prof. Bettanini Carlo

Laureando: *Nicolò Battistello*

Padova, 29/09/2023

ISS: laboratorio orbitante attorno al pianeta Terra a circa 400 km di altezza, volto a meglio comprendere l'interazione tra gli organismi viventi terrestri e lo spazio. Essa ospita equipaggi di astronauti provenienti dalle cinque più importanti agenzie spaziali mondiali dalla fine dell'anno 2000. La struttura consiste in una serie di moduli cilindrici collegati tra loro ed alimentati dall'energia solare. Gli esperimenti e le ricerche condotte sulla ISS riguardano la quasi totale assenza di gravità e la maggior intensità di radiazioni alle quali si è esposti a tale distanza dalla Terra.

In questo elaborato si tratteranno le migliori e più favorevoli condizioni per permettere a un equipaggio di raggiungere la ISS nel modo più sicuro ed efficiente possibile, nonché consentito dalle attuali tecnologie delle quali si è a disposizione.



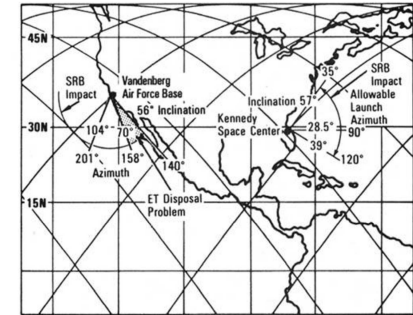
Cape Canaveral: in Florida, preferibile per la sua apertura verso le acque dell'Atlantico, garantisce maggior sicurezza e minor probabilità di impatto con zone popolate in caso di fallimento della missione. La sua bassa latitudine permette un notevole risparmio energetico nei lanci.

Vandenberg Space Force Base

Kodiak Island

Spazioporto di Kourou

Cosmodromo di Baikonur: sito di lancio russo, è stato il primo spazioporto costruito al mondo e rimane tuttora il più grande. Da qui vengono lanciate le capsule Soyuz. Nonostante Baikonur sia in Kazakistan, il centro di controllo missione si trova a Mosca, in Russia, perché durante la costruzione del cosmodromo entrambe le nazioni si trovavano sotto il governo dell'Unione Sovietica



Space Shuttle Launch Sites

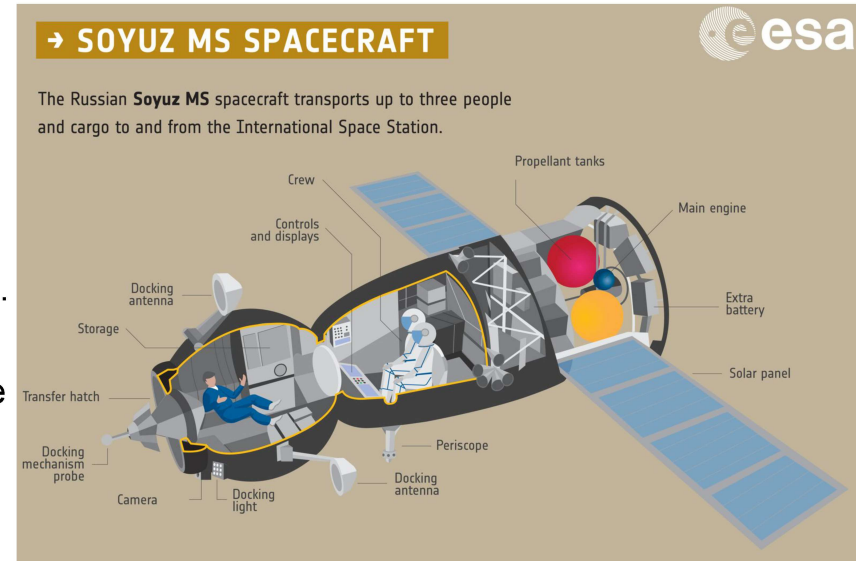


Due veicoli spaziali consentono agli astronauti di raggiungere la ISS:

1. Capsula **Crew Dragon**, più recente e moderna, lanciata dal razzo Falcon 9 della privata SpaceX.
2. Capsula **Soyuz**, lanciata dal razzo Soyuz alimentato da RP1. La durata del rendezvous varia da 6 ore (fast docking) a 2 giorni (slow docking).

Una capsula Soyuz è composta di 3 moduli:

1. **di servizio:** contiene celle a combustibile, taniche di carburante e ossigeno. Al suo esterno si trovano il sistema di propulsione e le ali dei pannelli solari.
2. **orbitale:** funge da stiva, accesso al vettore in rampa di lancio, accesso alla ISS. Ospita il sistema di docking.
3. **di rientro:** contiene i 3 sedili per l'equipaggio, i sistemi di supporto vitali (un dispositivo di rimozione di anidride carbonica e taniche di ossigeno), sacche contenenti materiale utile al rientro sulla Terra, il pannello degli strumenti con i sistemi di controllo dello spacecraft.



Razzo Soyuz: 3 stadi alimentati da 300 ton di RP1.

- 1° stadio: 20 motori principali fissi suddivisi sul corpo centrale e sui boosters laterali, 12 motori secondari più piccoli e mobili vengono utilizzati per orientare il razzo.
- 2° stadio: composto solamente dal corpo centrale.
- 3° stadio: incapsula la navicella Soyuz sulla cima. Una torre di espulsione consente di separare rapidamente l'equipaggio dal resto del veicolo spaziale in caso di emergenza.

Rampa di lancio: 4 strutture reggono il razzo e lo mantengono in posizione, 2 torri ombelicali garantiscono afflusso di energia elettrica e di carburante, 2 torri di servizio permettono l'accesso dall'esterno a diversi livelli.

T – 5 h: refuel.

T – 2.5 h: l'equipaggio accede al razzo tramite il modulo orbitale per poi spostarsi nel modulo di discesa.

T – 30 min: le torri di servizio vengono sganciate.

T – 15 min: il personale viene evacuato.

T – 35 s: la prima torre ombelicale viene rilasciata.

T – 15 s: la seconda torre ombelicale viene rilasciata.

T – 0 s: rilascio delle 4 strutture di supporto, decollo.

T + 20 s: una manovra di beccheggio orienta il razzo verso l'orbita prestabilita.

T + 45 s: l'altitudine raggiunta è di 11 km, la velocità 1460 km/h, la pressione sulla struttura è massima

T + 2 min: alla quota di 40 km si liberano la torre di espulsione e i 4 booster laterali ormai vuoti.

T + 5 min: il guscio protettivo per la capsula Soyuz e il 2° stadio vengono espulsi, la quota è di 170 km.

T + 9 min: spegnimento ed espulsione dell'ultimo motore (MECO, main engine cut off), estensione di antenne e pannelli solari.

Nonostante sia tecnicamente possibile lanciare la capsula Soyuz in qualsiasi momento, è più efficiente farlo subito dopo il passaggio della ISS sopra Baikonur, per consentire un fast docking.

$$\cos(\alpha) = -\cos(\gamma) \cos(\beta) + \sin(\gamma) \sin(\beta) \cos(\hat{BC})$$

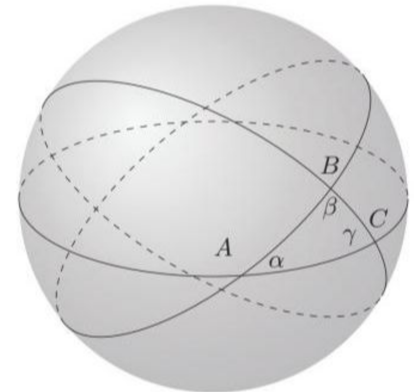
\hat{BC} è sotteso rispetto al centro della Terra, l'angolo γ è retto, α è l'inclinazione

$$\cos(i) = \sin(\theta) \cos(lat) \longrightarrow \theta = 63.205^\circ$$

Considerando un'altitudine media dell'ISS pari a 400 km, la precessione del nodo ascendente è pari a:

$$\dot{\Omega} = -\frac{3}{2} \frac{\sqrt{\mu} J_2 R^2}{(1-e^2)^2 a^{7/2}} \cos(i) \longrightarrow \dot{\Omega} = -1.009 \cdot 10^{-6} \text{ rad/s} \longrightarrow \dot{\Omega} = -0.321^\circ/T$$

$$\Delta\lambda = -23.524^\circ \longrightarrow \Delta\Omega = \pm \frac{\Delta\lambda}{2} = \pm 11.762^\circ \text{ (nel peggiore dei casi)}$$



Rendezvous: sequenza di manovre eseguite per regolare l'approccio tra l'inseguitore che esegue le manovre, ed il target. Viene effettuato in 3 manovre separate da orbite intermedie.

La prima manovra colloca la Soyuz in un'orbita circolare di commissioning situata ad un'altezza di 200 km.

La seconda manovra è un trasferimento di Hohmann che permette di trasferirsi da una prima orbita circolare ad una seconda orbita circolare, complanare alla prima e con fuoco coincidente. La Soyuz usa i suoi motori prima per lasciare l'orbita di commissioning, poi per regolare la velocità in modo tale da restare sulla nuova orbita di phasing.

La terza manovra è un trasferimento biellittico che porta la Soyuz dall'orbita di phasing all'orbita della ISS. Si rende necessaria in quanto il trasferimento di Hohmann non fornirebbe né la corretta altitudine né la corretta velocità per il rendezvous. Richiede 3 impulsi e quindi un consumo di carburante più elevato rispetto al trasferimento di Hohmann: i primi 2 per portare la Soyuz all'orbita della ISS, l'ultimo per regolare nuovamente la velocità in modo da mantenere l'orbita raggiunta.

Il trasferimento di Hohmann si articola in due passaggi:

1. La Soyuz si inserisce nell'orbita ellittica di trasferimento intermedia grazie ad un primo impulso allineato alla direzione del moto nell'orbita di commissioning.
2. All'apocentro dell'orbita di trasferimento un secondo impulso inserisce la navicella Soyuz nell'orbita di phasing a 300 km di altezza.

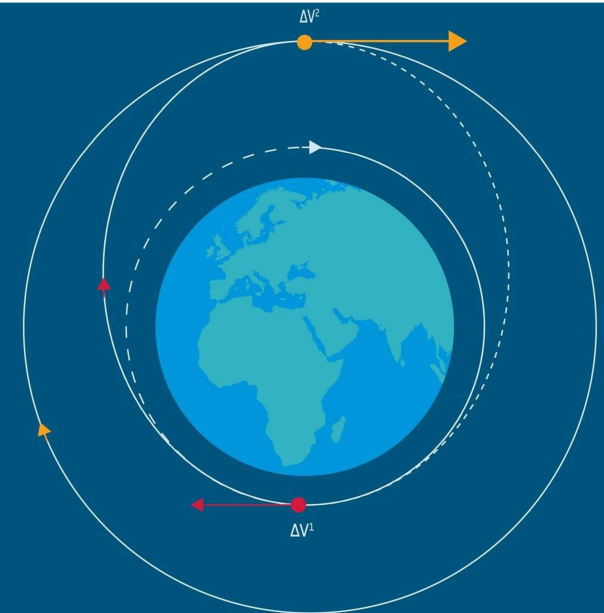
L'orbita di phasing si trova 100 km al di sotto dell'orbita della ISS ed ha lo scopo di ridurre l'angolo tra i due veicoli nelle loro rispettive orbite. L'angolo di phasing se tenuto sotto i 20° consente di ridurre notevolmente i tempi di rendezvous.

HOHMANN TRANSFER

The Hohmann transfer is a two-burn manoeuvre that transfers the Soyuz from one orbit to another.

ΔV^1 The first burn takes the spacecraft out of the insertion orbit to climb up to the phasing orbit.

ΔV^2 The second burn adjusts the Soyuz's speed to stay in the phasing orbit.



La non esatta ripetizione della traccia a terra può comportare una manovra di cambio del piano orbitale.

1. $\Delta\Omega = 0$: la ISS transita esattamente sopra Baikonur. Sia $R_T = 6378.14 \text{ km}$:

orbita di commissioning: $h_1 = 200 \text{ km}$ $r_1 = R_T + h_1 = 6578.14 \text{ km}$ $v_1 = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} = 7.784 \text{ km/s}$

orbita di phasing: $h_2 = 300 \text{ km}$ $r_2 = R_T + h_2 = 6678.14 \text{ km}$ $v_2 = \sqrt{\frac{\mu}{r_2}} = 7.726 \text{ km/s}$

orbita ellittica intermedia: $v_{1e} = \sqrt{\frac{2\mu \cdot r_2}{r_1 \cdot (r_1 + r_2)}} = 7.814 \text{ km/s}$ $v_{2e} = \sqrt{\frac{2\mu \cdot r_1}{r_2 \cdot (r_1 + r_2)}} = 7.696 \text{ km/s}$
(pericentro e apocentro)

impulso complessivo: $\Delta v = |v_{1e} - v_1| + |v_{2e} - v_2| = 0.0585 \text{ km/s}$

Dati la massa iniziale della capsula $M_i = 6730 \text{ kg}$ e l'impulso specifico della Dimetilidrazina Asimmetrica $I_{sp} = 330 \text{ s}$, il propellente utilizzato è pari a $\Delta M = M_i \left(1 - e^{-\frac{\Delta v}{I_{sp}g}}\right) = 120.525 \text{ kg}$

2. $\Delta\Omega = 11.762^\circ$: la ISS transita il più lontano possibile da Baikonur. Il parametro da modificare al fine di ottenere l'allineamento voluto tra le orbite è l'inclinazione dell'impulso β :
- $$\cos(\beta) = \cos^2(i) + \sin^2(i) \cos(\Delta\Omega) \longrightarrow \beta = 9.218^\circ$$

Ripartendo la manovra tra partenza e arrivo, le posizioni angolari sul piano dell'orbita dei due punti di manovra con riferimento al nodo ascendente sono: $ALA_2 = 90.746^\circ$ $ALA_1 = ALA_2 + 180^\circ = 271.746^\circ$

Siano P l'orbita di partenza, A quella di arrivo e H quella di Hohmann; inoltre i pedici 1 e 2 indicano i punti di partenza e arrivo. Allora si hanno:

$$v_{1,P} = \sqrt{\frac{\mu}{r_1}} = 7.784 \text{ km/s} \quad v_{2,A} = \sqrt{\frac{\mu}{r_2}} = 7.726 \text{ km/s} \quad v_{1,H} = \sqrt{\frac{\mu(1+e)}{r_1}} = 8.072 \text{ km/s} \quad v_{2,H} = \sqrt{\frac{\mu(1-e)}{r_2}} = 7.429 \text{ km/s}$$

dove $e = \frac{r_2 - r_1}{r_2 + r_1} = 0.0754$

L'impulso nel punto di arrivo sarà dato da due contributi relativi all'orbita di arrivo e di Hohmann:

$$\Delta v_2 = \sqrt{v_{2,H}^2 + v_{2,A}^2 - 2 \cdot v_{2,H} \cdot v_{2,A} \cos(\beta)} = 1.253 \text{ km/s}$$

Impulso complessivo: $\Delta v = v_{1,H} - v_{1,P} + \Delta v_2 = 1.541 \text{ km/s}$, non può essere garantito dal propellente del quale si è a disposizione in quanto $\Delta M = M_i \left(1 - e^{-\frac{\Delta v}{I_{sp}g}}\right) = 2547.663 \text{ kg}$

La terza ed ultima manovra porta la Soyuz da un raggio $r_P = R_T + 300 \text{ km} = 6678.14 \text{ km}$ ad un raggio $r_{ISS} = R_T + 400 \text{ km} = 6778.14 \text{ km}$. Il 1° impulso inserisce la Soyuz in una prima orbita ellittica. Il 2° impulso porta la capsula in una seconda orbita ellittica a partire dall'apogeo della prima. Il 3° impulso porta infine lo spacecraft nell'orbita della ISS modificando la seconda orbita ellittica in modo da renderla circolare.

Orbita di phasing: $T_P = 2\pi\sqrt{\frac{r_P^3}{\mu}} = 5431.18 \text{ s}$

$$\omega_P = \frac{2\pi}{T_P} = 1.157 \cdot 10^{-3} \text{ rad/s}$$



$$\omega_{rel} = \omega_P - \omega_{ISS} = 2.551 \cdot 10^{-5} \text{ rad/s}$$

Orbita della ISS: $T_{ISS} = 2\pi\sqrt{\frac{r_{ISS}^3}{\mu}} = 5553.63 \text{ s}$

$$\omega_{ISS} = \frac{2\pi}{T_{ISS}} = 1.131 \cdot 10^{-3} \text{ rad/s}$$

Orbita di supporto: per ipotesi $r_{supp} = \frac{r_P + r_{ISS}}{2} = \frac{6678.14 + 6778.14}{2} = 6728.14 \text{ km}$

Orbite ellittiche che sfruttano l'orbita di supporto:

$$a_{e1} = \frac{r_P + r_{supp}}{2} = 6703.14 \text{ km}$$

$$e_{e1} = \frac{r_{supp} - r_P}{r_{supp} + r_P} = 0.00373$$

$$a_{e2} = \frac{r_{ISS} + r_{supp}}{2} = 6753.14 \text{ km}$$

$$e_{e2} = \frac{r_{ISS} - r_{supp}}{r_{ISS} + r_{supp}} = 0.00370$$

Wait time massimo: $WT_{max} = \frac{2\pi}{\omega_{rel}} = 246332.96 \text{ s}$, circa 3 giorni.

Durante il tempo di manovra $\Delta t = \pi\sqrt{\frac{a_{e1}^3}{\mu}} + \pi\sqrt{\frac{a_{e2}^3}{\mu}} = 5492.32 \text{ s}$ l'anomalia coperta dalla ISS è pari a:

$$\theta_{ISS} = \omega_{ISS} \cdot \Delta t = 6.211 \text{ rad} = 355.911^\circ$$

Il **rientro** in Kazakistan dura solo 3.5 ore: la zona di atterraggio viene prima controllata da un team a terra per verificare che il terreno sia pianeggiante e lontano da zone abitate.

Undocking dal modulo Zvezda: sgancio dell'hard capture, posizionamento in un'orbita più bassa di quella della ISS (la variazione di velocità della capsula evita possibili collisioni con la stazione nonostante le orbite di target ed inseguitore si intersechino), un set di molle separa gli spacecrafts, un impulso di 15 s accelera la Soyuz fino a 2 km/s iniziando il de-orbit per portare la capsula nell'atmosfera. Un impulso troppo debole riporterebbe la capsula nello spazio, uno troppo forte comporterebbe un rientro troppo rapido nell'atmosfera e innalzamento delle temperature oltre i 2000°C. Per ottenere la giusta decelerazione il motore principale brucia per esattamente 4 min e 45 s.

La separazione dei 3 moduli avviene a 140 km grazie a bulloni esplosivi, ruotando prima di 90° per evitare impatti tra i moduli. La Soyuz è in grado di correggere il proprio assetto variando la portanza invertendo il suo verso di rotazione. A 10.5 km viene dispiegato il primo paracadute, il cui scopo è rallentare il modulo abbastanza da permettere la corretta apertura del paracadute principale. 2 km più in basso viene dispiegato il paracadute guida di apertura pari a 100 m², il quale rallenta la capsula fino a 22 km/h. A 70 cm da terra vengono accesi i 6 retrorazzi per far sì che la Soyuz atterri dolcemente.

Altitudine: compresa tra 370 km e 460 km, con un valore medio di circa 400 km. L'altitudine al pericentro è 413 km, all'apocentro è 422 km.

Inclinazione: 51.65°.

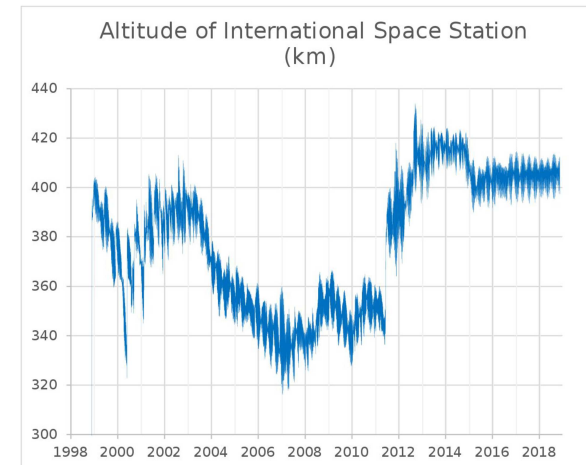
Eccentricità: 0.007, più circolare possibile.

Velocità media: 28000 km/h.

Periodo orbitale: circa 93 min, 15.5 orbite al giorno.

Tale orbita presenta la minima inclinazione necessaria per essere raggiunta dai moduli Soyuz in partenza da Baikonur senza dover sorvolare la Cina o dover far atterrare stadi esausti in aree densamente abitate.

La forza di gravità a 400 km è circa il 90% di quella misurata sulla Terra. La sensazione di assenza di peso è dovuta allo stato di caduta libera continua nel quale la ISS si trova. La stazione perde 2 km di altitudine al mese, corretti dai due motori principali sul modulo Zvezda con costi annui di circa 210 milioni di dollari e 7.5 tonnellate di propellente.



Nel 2031 è prevista la dismissione della ISS riportando la stazione nell'atmosfera e facendola precipitare nell'oceano. Un'altra possibilità tenuta in considerazione è quella di non dismettere completamente la stazione ma di riutilizzare alcuni suoi moduli per scopi differenti, sia in ambito terrestre che spaziale. I 3 miliardi di dollari annui investiti nella ISS verranno reimpiegati per riportare l'uomo sulla Luna tramite il programma Artemis e in futuro su Marte.

Le recenti tensioni tra Russia e Ucraina rendono improbabile una immediata collaborazione russa in un eventuale nuovo progetto di collaborazione internazionale. La NASA ha già avviato contratti con diverse compagnie private per la costruzione di nuove stazioni spaziali commerciali in orbita LEO. Il Lunar Gateway potrebbe vedere la luce già nei prossimi 10 anni: esso servirà da checkpoint per le missioni nello spazio profondo.

Oltre agli importanti risultati scientifici ottenuti dagli esperimenti condotti a bordo, la ISS ha permesso di placare in parte la “sete di spazio” del genere umano. Seppur i costi di manutenzione e gestione del programma siano stati estremamente elevati, la ISS rappresenta un capitolo nella storia delle missioni spaziali che non si sarebbe potuto saltare.

IMMAGINI:

- https://historicspacecraft.com/Diagrams/VV/ISS_VV_Diagram_Generator_App_Sample04.png
- <https://history.nasa.gov/shuttleoverview1988/p3.jpg>
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/49/Map_baikonur_cosmodrome.png
- https://www.esa.int/var/esa/storage/images/esa_multimedia/images/2018/06/soyuz_ms_spacecraft_infographic/17534_826-1-eng-GB/Soyuz_MS_spacecraft_infographic_pillars.png
- https://encrypted-tbn3.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcQhBnpa8VIYcToFcTK_KQtNvzc9P81WZ4fwL_-SEbOtz_JqHZx5
- https://blogs.esa.int/luca-parmitano/files/2019/07/Rendezvous_infographic.jpg
- https://blogs.esa.int/luca-parmitano/files/2019/07/Angle-and-transfers_infographic.jpg
- https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/d/d4/Altitude_of_International_Space_Station.svg/1200px-Altitude_of_International_Space_Station.svg.png

TESTO:

- [2017 Space Launch Statistics – Spaceflight101](#)
- [The Soyuz spacecraft](#)
- [Docking systems](#)
- [The Baikonur Cosmodrome: World's Oldest Space Launch Facility - Sometimes Interesting](#)
- [How Soyuz rides into orbit](#)
- [Here is how Soyuz returns to Earth](#)
- [Every Module of the International Space Station Explained \(2021 Edition\)](#)
- [International Space Station, facts and photos](#)
- [Launch Sites | NASA](#)
- [ESA - kernel \(20\)](#)
- [SpaceX - Dragon](#)
- [How Things Work: Soyuz-Station Docking | Air & Space Magazine| Smithsonian Magazine](#)