

**TESINA PER L'ESAME DI STATO  
A.S. 2014/2015**

*Comunicazione e Divulgazione Scientifica*

di *Ginevra Merluzzi*

**DINAMICA DEL VOLO SPAZIALE: LE TEORIE ALLA BASE DEI VIAGGI NELLO SPAZIO**

Il presente contributo, elaborato dalla studentessa **Ginevra Merluzzi** dell'Istituto di Istruzione Superiore "Via Silvestri" di Roma, è connesso alle attività scientifiche e laboratoriali svolte durante lo "**Stage a Tor Vergata**" - promosso dal Piano nazionale Lauree Scientifiche e tenuto presso i laboratori della Macroarea di Scienze MFN dell'**Università degli Studi di Roma Tor Vergata** in due fasi:

- Stage Estivo dal 16 al 20 Giugno 2014;
- Stage Invernale dal 2 al 6 febbraio 2015.

Le attività didattiche previste nel Programma dello Stage sono state realizzate in cinque gruppi di ricerca, guidati da docenti dell'Università di Roma Tor Vergata.


*Il responsabile scientifico del Modulo "Comunicazione e Divulgazione Scientifica"*

Prof.ssa Alessandra Celletti



*Il Direttore degli "Stage a Tor Vergata"*

Prof. Nicola Vittorio



# TESINA MATURITA' 2014/2015

## Dinamica del volo spaziale: le teorie alla base dei viaggi nello spazio.

### Prefazione

Ho preso parte allo Stage di due settimane organizzato dall' Università di Roma Tor Vergata come "studente-ricercatore" del modulo di Comunicazione e Divulgazione Scientifica. Il lavoro è stato suddiviso in due sessioni, una estiva, dal 16 al 20 Giugno 2014, ed una invernale, dal 2 al 6 Febbraio 2015. In entrambe le sessioni, a noi del modulo di Comunicazione Scientifica, è stato presentato un *case study*, un argomento scelto per il suo interesse scientifico, ma anche multidisciplinare. Dopo aver seguito delle lezioni frontali, tenute dalla Prof.ssa Alessandra Celletti, per comprendere a fondo la base scientifica che ci avrebbe permesso di proseguire nel lavoro, intorno al *case study* sono stati realizzati dei laboratori di comunicazione, nei quali siamo stati guidati dalla Dott.ssa Livia Giacomini, con lo scopo di creare un prodotto finale adatto alla divulgazione della scienza. Al termine dello Stage Estivo abbiamo realizzato un sito web e varie tipologie di testi sul *case study*. Al termine dello Stage Invernale abbiamo presentato due tipologie di filmati: un documentario ed un servizio destinato ad un telegiornale.

### I *case study*

I temi principali affrontati durante lo Stage sono stati quello della stabilità del nostro Sistema Solare e delle autostrade interplanetarie, e quello dei NEO (*near earth objects*) con la trattazione del problema delle collisioni di Asteroidi e dei detriti spaziali.

Per comprendere il concetto di "instabilità" del Sistema Solare è stato necessario avere idea di come nasce lo studio del moto dei corpi celesti e quali sono state le scoperte che hanno portato l' uomo a rendersi conto di tale instabilità. La nostra attenzione è stata dunque rivolta alla Meccanica Celeste e alle Teorie del Caos e delle Perturbazioni. Essendo rimasta affascinata dall' applicazione che tali teorie hanno nell' ambito del volo spaziale e dell' astrodinamica, ho deciso di approfondire tale argomento.



## La Meccanica Celeste nella comprensione del Sistema Solare

La Meccanica Celeste studia la dinamica degli oggetti del Sistema Solare e dei pianeti extrasolari, il suo scopo è quello di calcolare e predire il moto dei corpi celesti. Fin dall' antichità questa scienza ha affascinato l' uomo, e fu sempre, o quasi, accompagnata da una concezione geocentrica del mondo, formulata in prima istanza da Aristotele (384-321 a.C.) e canonizzata da Tolomeo (da qui la definizione di sistema Aristotelico-Tolomeico). In effetti noi non percepiamo alcun movimento della Terra ed è semplice comprendere come, prima di giungere alla Teoria della Relatività, fosse difficile concepire l' idea che il nostro pianeta sia in moto in un' orbita intorno al sole, oltretutto a grande velocità. Il Geocentrismo fu inoltre sostenuto attivamente dalla chiesa Cristiana, stando alla quale in esso si rivelerebbe la volontà di Dio, che pone l' uomo al centro dell' Universo. Proprio per tali circostanze l' affermazione del sistema eliocentrico incontrò molti ostacoli nel corso dei secoli. Fu Copernico, pubblicando il *De Revolutionibus orbium coelestium* nel 1543, a delineare un sistema nel quale la Terra e gli altri pianeti compiono un moto di rivoluzione intorno al Sole.

### Orbite e perturbazioni

Keplero formulò, all' inizio del Seicento, 3 leggi che regolano il moto dei pianeti su orbite ellittiche intorno al Sole. Tali leggi possono essere oggi applicate a satelliti artificiali da lanciare, per esempio, in orbita intorno alla Terra. Le leggi di Keplero affermano che:

- I pianeti si muovono su ellissi di cui il Sole occupa uno dei due fuochi.
- I pianeti spazzano aree uguali in tempi uguali.
- Il quadrato del periodo di rivoluzione è proporzionale al cubo del semiasse maggiore dell' ellisse.

Sulla base della terza legge di Keplero Newton poté formulare la Legge della Gravitazione Universale. Notò infatti che i pianeti che orbitano a distanza maggiore dal Sole impiegano più tempo a percorrere l' orbita. Non solo. Anche la velocità di percorrenza è minore di quella di un pianeta più vicino al Sole. Fu così che Newton intuì che ciò che spingeva i pianeti nelle loro orbite diminuiva d' intensità con l' aumentare della distanza dal Sole.



Secondo la Legge di Gravitazione universale due corpi dotati di massa si attraggono reciprocamente con una forza tanto maggiore quanto più grande è il valore delle loro masse e inversamente proporzionale al quadrato della distanza che li separa. Il segno negativo indica che la forza è sempre attrattiva, la  $G$  è la costante di gravitazione universale, il cui valore è determinato sperimentalmente ed è pari a  $G = 6,67 \times 10^{-11} \frac{N \cdot m^2}{kg^2}$

$$F_{AB} = -G \frac{m_A m_B}{d_{AB}^2}$$

Una volta introdotta la Gravitazione si è dovuto rivedere il concetto di orbita prendendo in considerazione il fenomeno delle perturbazioni. Infatti le orbite risulterebbero perfettamente ellittiche solo se ogni corpo celeste fosse influenzato nella sua rivoluzione solo dal Sole (o comunque da un singolo corpo esterno). Ma in questo modo per ogni pianeta dovrebbe esistere una diversa equazione di Newton, e non è questo il caso. Ogni pianeta è perturbato nella sua orbita anche dagli altri pianeti, la cui massa, essendo notevolmente minore rispetto a quella del Sole, non provoca una forza tale da vincere quella attrattiva solare. Tuttavia, l'orbita del pianeta preso in considerazione viene perturbata dalla forza creata dagli altri pianeti, seppur limitatamente. Ne deriva che le orbite descritte da Keplero non corrispondono a quelle reali, che non sono ellissi perfette, ma risultano deformate, come "tirate" da più direzioni. E' però ora scientificamente dimostrabile che i pianeti si muovono su orbite ben distanti tra loro, le quali non si intersecano e subiscono una perturbazione così lieve, almeno in basse scale di tempo, da poter essere approssimabili ad ellissi di piccola eccentricità.

## Calcolare la distanza tra i pianeti

La III legge di Keplero ebbe un'importanza fondamentale: per la prima volta fu possibile calcolare le distanze dei vari pianeti dal Sole grazie alla relazione, espressa appunto dalla legge, tra il periodo di rivoluzione di un corpo e il semiasse maggiore della sua orbita.

Se infatti il quadrato del periodo  $P$  è proporzionale al cubo del semiasse maggiore  $a$ , allora:

- assumendo come unità: 1 UA, 1 anno terrestre.
- $P (\text{anni})^2 = a (\text{UA})^3 \rightarrow a (\text{UA}) = P (\text{anni})^{2/3}$

Di seguito riportiamo una tabella con le distanze planetarie calcolate con la III legge di Keplero e quelle calcolate dalla NASA.

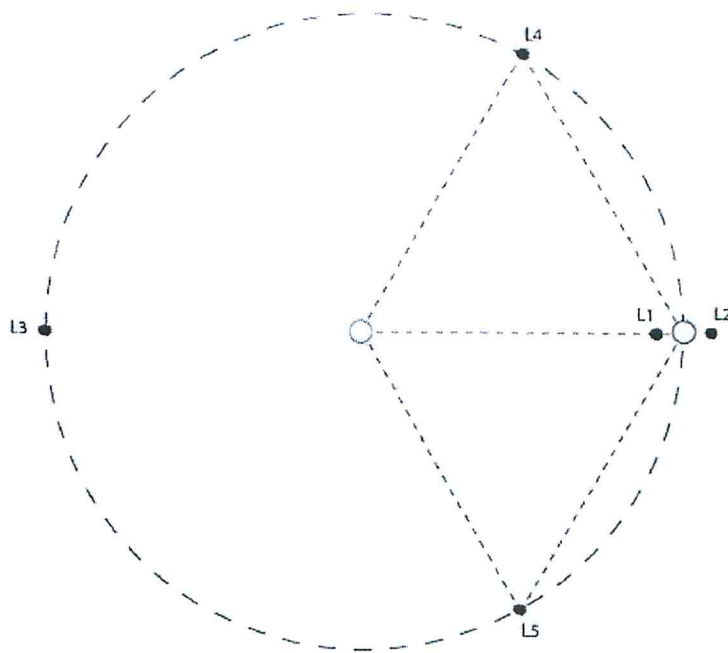
	Periodo (anni)	$a = P^{2/3}$ (UA)	a (UA) NASA
Mercurio	0.241	0.3870	0.38709927
Venere	0.615	0.7233	0.72333566
Terra	1	1	1
Marte	1.8808	1.5237	1.52371034
Giove	11.8626	5.2014	5.20288700
Saturno	29.4475	9.5360	9.53667594
Urano	84.0168	19.1827	19.18916464
Nettuno	164.7913	30.0577	30.06992276

### 3 corpi e il Caos

Fu Henri Poincaré ad assumersi il compito di studiare approfonditamente il problema dei 3 corpi, ovvero: come è possibile descrivere un sistema dinamico composto da 3 (o più) corpi, esprimendone le principali caratteristiche con equazioni matematiche? La soluzione di questo problema comporterebbe la possibilità di descrivere in dettaglio il moto del sistema e predirne lo stato futuro, così come di scoprirne quello passato. La risposta è "semplice": non si può. Poincaré constatò infatti che quando tre o più corpi interagiscono tra loro, subentra il caos. Matematicamente irrisolvibile, tale problema trova però una soluzione, seppur parziale, nello studio di casi specifici.

### Punti di equilibrio lagrangiani

Esaminando casi particolari del problema dei 3 corpi, Lagrange scoprì che questi possono muoversi mantenendo inalterata nel tempo la loro disposizione nello spazio. Solo due geometrie soddisfano questa condizione: o i tre corpi sono disposti in linea retta (punti collineari: L1, L2, L3) o sono posizionati ai vertici di un ideale triangolo equilatero (punti triangolari: L4, L5). Queste posizioni nello spazio sono definite "punti lagrangiani" di equilibrio e sono importanti nella dinamica del volo spaziale, in particolare sono utilizzati per opportune missioni spaziali.



### Orbite ad alone

Le orbite ad alone sono orbite periodiche, tridimensionali, situate nelle vicinanze dei punti collineari lagrangiani (L1, L2, L3). Una sonda, in un' orbita ad alone, si muove su di una traiettoria circolare situata attorno ad uno di questi punti. Queste orbite derivano dalla complessa interazione tra l' attrazione gravitazionale di due pianeti e l' accelerazione centrifuga della sonda stessa.

La sonda europea SOHO (*Solar Heliospheric Observatory*) è da più di dieci anni in orbita intorno al punto lagrangiano EL1 (lungo la congiungente Terra-Sole): la sua orbita ad alone permette di tenere costantemente il Sole sotto osservazione senza perdere il contatto con la Terra.

### La dinamica del volo spaziale

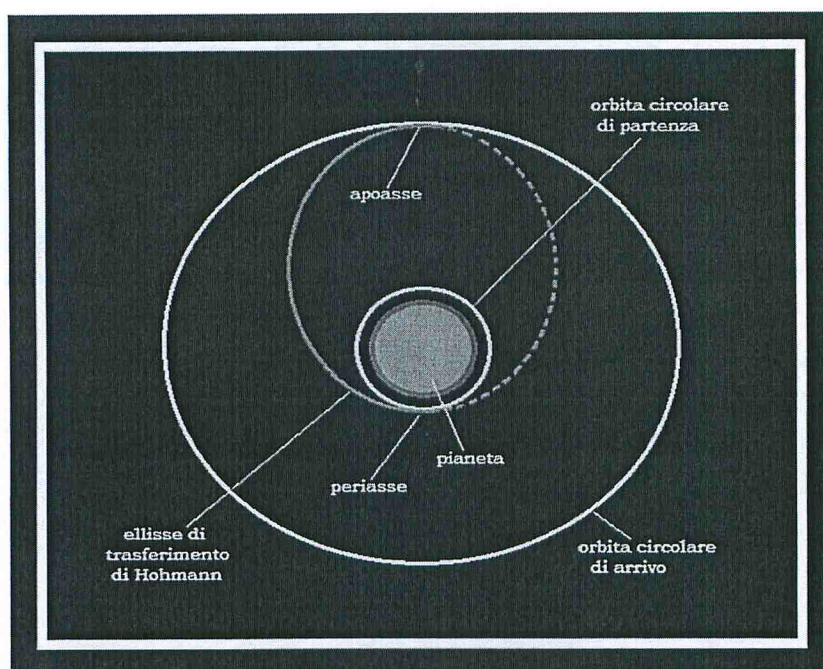
La dinamica del volo spaziale nasce con lo scopo di trovare un punto di incontro tra le leggi della Meccanica Celeste e quelle " terrene " che decidono il profilo di una missione spaziale. Il primo risultato raggiunto in quest' ambito è stato quello di comprendere a fondo gli effetti delle perturbazioni, fino ad arrivare a provarli per controllare la traiettoria, e l' orbita, di un oggetto nello spazio.

Il problema del volo interplanetario venne affrontato all' inizio del ventesimo secolo da Walter Hohmann (1880-1945), che per primo descrisse come progettare un viaggio verso Venere o Marte. Fu immediatamente riscontrato che, in missioni di



questo tipo, la quantità di propellente necessaria per portare a termine il viaggio è enorme. Per ovviare a tale problema, Hohmann elaborò una procedura di trasferimento tra due orbite che necessitava soltanto di due manovre orbitali.

La sonda, inizialmente sull'orbita circolare interna, è immessa grazie ad un impulso su un'ellisse (la traiettoria di trasferimento) il cui apocentro corrisponde al raggio dell'orbita che si vuole raggiungere. La seconda manovra immette la sonda sull'orbita circolare di arrivo. Se la seconda manovra non viene effettuata allora la sonda, invece di immettersi sull'orbita circolare, continua il suo cammino su quella di trasferimento, tornando indietro. Avviene dunque un *fly-by*. Quando invece l'incontro è duraturo si ha un *rendez-vous*.



([www.kerbalspaceprogram.it/8-guide/58-lezioni-di-meccanica-orbitale-manovre-alla-hohmann](http://www.kerbalspaceprogram.it/8-guide/58-lezioni-di-meccanica-orbitale-manovre-alla-hohmann))

## In viaggio verso la Luna

Hiten è una mini-sonda giapponese che nel 1990 sfiora ripetutamente la Luna. L'importanza della sua missione risiede nell'aver utilizzato, per raggiungere il nostro satellite, una traiettoria completamente diversa da quelle note fino ad allora ed utilizzate anche nelle missioni Apollo: le ellissi di trasferimento di Hohmann. Hiten metteva in pratica quelli che erano stati i metodi sviluppati per lo studio del problema dei 3 corpi, ovvero: sfruttava le regioni caotiche associate ai punti lagrangiani collineari (in particolare L1) per controllare la traiettoria della sonda senza dispendio di carburante. In un primo momento la sonda si avvicina al punto lagrangiano tra la Terra e il Sole, quattro volte più



lontano della Luna, poi però entra in orbita circumlunare a seguito di lievi manovre effettuate per correggerne saltuariamente la rotta.

Questo nuovo tipo di traiettoria viene definito con la sigla WSB, *weak stability boundary*, a sottolineare la possibilità di sfruttare le regioni instabili presenti al confine tra i domini gravitazionali della Terra, della Luna e del Sole.

Bisogna tuttavia notare come il guadagno in termini di prezzo che queste traiettorie offrono è controbilanciato da un sensibile aumento del tempo di trasferimento. In compenso vi è la possibilità per la sonda di trasportare più materiale, seppur più lentamente.

Hiten è stata seguita da numerose altre missioni e ora sembrerebbe essere giunta l'era di una nuova "corsa alla Luna". Tappa fondamentale di questo progetto è quella di costruire una base stabile sul nostro satellite. Per rendere possibile questo progetto la dinamica del volo spaziale è fondamentale. È infatti necessario studiare a fondo le traiettorie utilizzate per il trasferimento in primo luogo degli astronauti, oltre che di carichi materiali. E' ipotizzabile che le traiettorie più dispendiose in termini di carburante, e conseguentemente più veloci, continueranno ad essere utilizzate nel primo caso, per non esporre a lungo gli astronauti ai raggi cosmici o alle emissioni nocive dei "brillamenti solari". Le traiettorie WSB saranno probabilmente preferite nel caso di sonde "cargo", poiché permettono di massimizzare il carico trasportato.

Inoltre, i punti lagrangiani LL1 (punto lagrangiano lunare L1) e EL1 (punto lagrangiano L1 del sistema Terra-Sole) rappresenterebbero ottimi punti di stazionamento per moduli spaziali come stazioni di rifornimento in volo o sonde di emergenza. Un satellite per telecomunicazione situato in un'orbita ad alone attorno al punto LL2 (punto lagrangiano lunare L2) garantirebbe invece un contatto continuo da Terra con la "faccia nascosta" della Luna.

## Risonanze orbitali

Da un punto di vista matematico è possibile paragonare il moto orbitale di un pianeta ad un'oscillazione, in quanto la maggior parte dei corpi celesti viaggia su traiettorie chiuse che vengono ripercorse con frequenza regolare. Il periodo di tale "oscillazione" è il tempo impiegato dal pianeta per percorrere l'intera orbita. Se tra periodi orbitali di pianeti diversi si instaurano particolari relazioni, dette di risonanza, allora questi si trovano in accordo tra loro e le perturbazioni subite avranno caratteristiche particolari.



Prendiamo come esempio Saturno e due dei suoi satelliti: Mimas e Teti. Considerando due corpi alla volta, trascurando l' attrazione reciproca dei due satelliti, osserviamo come il periodo di rivoluzione di Teti sia il doppio di quello di Mimas. Di conseguenza, nel tempo impiegato da quest' ultimo satellite per compiere due giri attorno a Saturno, Teti ne compirà uno solo. Si dice che Mimas e Teti soddisfano una risonanza orbitale 1:2 e la conseguenza più immediata della presenza di una risonanza di questo tipo è che le geometrie relative tra i corpi celesti coinvolti si ripetono periodicamente.

Ristabilendo l' attrazione tra i due satelliti, la presenza della risonanza provoca la ripetizione di geometrie particolari anche tra i due satelliti, in questo caso la loro congiunzione periodica.

### **Bepi Colombo e la missione Mariner-Venere-Mercurio**

Giuseppe "Bepi" Colombo fu soprannominato "Meccanico del cielo", il suo nome è legato alla missione Mariner MVM del 1974. Colombo aveva scoperto l' accoppiamento tra rivoluzione e rotazione di Mercurio (il pianeta compie tre rotazioni intorno al proprio asse ogni due rivoluzioni intorno al Sole) e aveva constatato che il periodo dell' orbita della sonda Mariner MVM, dopo il *fly-by* (assistenza gravitazionale) di Mercurio sarebbe coinciso con il doppio del periodo di rivoluzione del pianeta stesso. Dunque Colombo suggerì di utilizzare tale risonanza (risonanza 1:2) per programmare molteplici sorvolamenti di Mercurio. In questo modo la sonda sorvolò il pianeta tre volte prima di esaurire il propellente.

### **Torniamo al punto... di partenza**

Nel 1957 un' orbita veniva percorsa per la prima volta da un oggetto costruito dall' uomo: lo Sputnik I, un satellite artificiale. La notevole differenza tra un satellite naturale ed uno artificiale sta nel poter, attraverso opportune manovre, modificare la traiettoria di quest' ultimo in base alle esigenze del momento. L' esplorazione della maggior parte del nostro Sistema Solare è stata resa possibile proprio dalla dinamica del volo spaziale, con la progettazione di missioni spaziali, e, principalmente, grazie all' utilizzo alternato della tecnica definita "assistenza gravitazionale" e dell' accensione dei sistemi propulsivi di bordo della sonda.

### **Assistenza Gravitazionale**

Quando una sonda sfiora un pianeta si verifica uno scambio d'impulso fra di essi. La sonda guadagna così velocità senza spendere un centesimo di carburante.

La sonda si muove con velocità  $v$  rispetto al pianeta e, per semplicità, segue un'orbita rettilinea. Un osservatore che si trova sul pianeta  $p$  vede la sonda arrivare a velocità  $v$  e quindi andarsene alla stessa velocità.

La sonda viene accelerata dalla forza gravitazionale del pianeta per un certo tempo. Poi però, una volta aggirato il pianeta, essa viene rallentata dalla stessa forza per lo stesso periodo di tempo. La sonda, quindi, avrà la stessa velocità in modulo, ma con una direzione diversa. Cosa succede se si osserva l'urto tra la sonda e il pianeta nel sistema di riferimento del Sole, nel quale il pianeta non è fermo?

La sonda arriva con una velocità  $v$  rispetto al Sole e si perde nelle profondità dello spazio con una velocità  $v'$  (maggiore di  $v$ , sempre relativamente al Sole). Il pianeta si muove con velocità  $V$  rispetto al Sole.

Osservata dal pianeta, la sonda si avvicina a questo con velocità uguale a  $-(v + V)$  e, dopo l'urto, si allontanerà con velocità pari a  $+(v + V)$ .

Se osserviamo la stessa scena dal Sole, alla velocità della sonda dobbiamo sommare la velocità  $V$  del pianeta. Così, dopo l'incontro, la sonda si allontanerà ad una velocità pari a:

$$+ [(v + V) + V] = + v + 2V$$

Quindi, dopo l'incontro, definito anche *f/ly-by*, la velocità della sonda è aumentata, in valore assoluto, di due volte la velocità del pianeta, invertendo la direzione del moto.

Anche la velocità del pianeta varia, seppur di poco, perché il rapporto tra i cambiamenti di velocità della sonda e quello del pianeta è uguale al rapporto inverso delle loro masse, cioè molto grande:

$$(v' - v) / (V' - V) = M / m$$

## In conclusione...

Gli inizi dell'era spaziale furono caratterizzati da un susseguirsi a grande velocità di eventi di portata storica. Dopo due anni dalla messa in orbita del primo satellite intorno alla Terra, una sonda sfiorava la Luna. Due anni dopo una sonda passava nello spazio interplanetario e nell'aprile del 1961 Yuri Gagarin fu il primo uomo ad andare nello spazio. Otto anni dopo l'uomo sbarcava sulla Luna. Come mai poi questo grandioso slancio iniziale si è affievolito? Probabilmente a causa della mancata scoperta di un più efficace sistema di propulsione spaziale. Con i carburanti chimici in questo momento in uso non è possibile sollevare da Terra carichi necessari alla costruzione di grandi infrastrutture orbitanti, inoltre non offrono grande libertà nella scelta delle traiettorie da compiere. Solo le tecniche sviluppate dalla dinamica del volo spaziale per minimizzare il consumo di propellente hanno permesso alle sonde automatiche di visitare la maggior parte dei corpi celesti nel Sistema Solare.



## Mercury Messenger e propulsione elettrica

Nel 2011 la sonda Messenger (Mercury Messenger) effettuò un *rendez-vous* con Mercurio, seguita poi dalla missione BepiColombo. Due sonde orbitano quindi attorno al pianeta. Dal punto di vista tecnologico la novità fu rappresentata dall'uso della propulsione elettrica, che sfrutta l'accelerazione di particelle cariche per generare una spinta continua, anche se di minore intensità. Per la meccanica del volo spaziale questo significa dover abbandonare le orbite ellittiche per studiare il moto di una sonda "perturbata" dal motore continuamente acceso. Il prezzo da pagare, per compensare il risparmio in termini di energia, è l'aumento dei tempi di transizione.

Il sistema di propulsione ideale dovrebbe comprendere in sé i vantaggi della propulsione chimica, in termini di potenza della spinta, e di quella elettrica.

Utilizzare a scopo propulsivo l'immensa energia racchiusa nell'atomo appare forse al momento il campo di indagine più promettente, anche se i processi riguardanti fusione o fissione nucleare richiedono sempre, anche in ambito spaziale, un grande dose di prudenza.

## Bibliografia

"Ordine e caos nel sistema solare" di Alessandra Celletti e Ettore Perozzi. UTET libreria-Torino, 2007.

## Sitografia

[www.torinoscienza.it/glossario/assistenza\\_gravitazionale\\_5683.html](http://www.torinoscienza.it/glossario/assistenza_gravitazionale_5683.html)

[en.m.wikipedia/wiki/Halo\\_orbit](http://en.m.wikipedia/wiki/Halo_orbit)

[it.m.wikipedia.org/wiki/Giuseppe\\_Colombo\\_\(matematico\)](http://it.m.wikipedia.org/wiki/Giuseppe_Colombo_(matematico))

Ginevra Merluzzi

