

Titolo: **Una soluzione analitica al problema dello swing-by**

Candidata: Miriam Falletta

Relatore: Prof. Giacomo Tommei

Abstract

Nel 1770 si verificò il passaggio ravvicinato a 0.0146 AU dalla Terra di una cometa, denominata D/Lexell in onore dell'astronomo che ne calcolò per primo l'orbita. Lo studio e l'osservazione della cometa, che è il primo NEO (Near Earth Object) conosciuto, resero evidente la possibilità di incontri ravvicinati di oggetti con la Terra e mostrarono come le perturbazioni gravitazionali nelle vicinanze di un pianeta possano modificare l'orbita di tali oggetti in modo significativo.

Dalla fine del diciottesimo secolo a oggi, il problema degli incontri ravvicinati di oggetti con pianeti del Sistema Solare è stato centrale sia in Meccanica Celeste che successivamente in Astrodinamica. Gli incontri ravvicinati, infatti, oltre ad essere importanti per gli effetti sulle orbite di corpi naturali quali asteroidi o comete, con l'avvento dell'era spaziale sono diventati fondamentali per progettare delle missioni che altrimenti sarebbero pressoché irrealizzabili, a causa dell'elevata quantità di carburante necessaria. In questo senso, in Astrodinamica si parla di *swing-by*, anche noto come *gravity assist* o *effetto fionda*, cioè la tecnica usata dalle sonde spaziali che sfrutta la spinta gravitazionale fornita dall'incontro con un oggetto molto più pesante, ad esempio un pianeta, al fine di modificare la velocità e i parametri orbitali della sonda, ottenendo così l'orbita post-incontro desiderata. Dall'inizio degli anni '70, le traiettorie interplanetarie vengono progettate in modo da usare uno o più gravity assist con pianeti. Un esempio degno di nota è la missione Ulysses, che al fine di studiare il Sole e l'eliosfera raggiunse un'inclinazione di 80° sull'eclittica grazie a uno swing-by con Giove.

Lo scopo di questa tesi è presentare delle espressioni analitiche per le condizioni iniziali dell'incontro (quindi i valori iniziali degli elementi orbitali angolari) in modo da ottenere l'orbita post-incontro desiderata, cioè con valori fissati di semiasse maggiore, eccentricità e inclinazione.

Per fare questo è necessario studiare il moto di un oggetto nelle vicinanze di un pianeta, il che in generale è abbastanza complicato, a causa delle perturbazioni gravitazionali presenti; tuttavia, se la velocità planetocentrica del corpo è abbastanza alta, cosicché la durata dell'incontro è estremamente breve e l'orbita planetocentrica è iperbolica, l'incontro può essere modellizzato attraverso la teoria di Öpik, che si basa sulla sovrapposizione di due diversi problemi dei due corpi. In poche parole, finché pianeta e corpo minore sono abbastanza lontani si considera il corpo su un'orbita eliocentrica ellittica, dopodiché, durante l'incontro, ovvero dentro la *sfera di influenza* del pianeta, si considera la particella su un'orbita planetocentrica che è quindi iperbolica.

Il primo capitolo di questa tesi è interamente dedicato alla teoria di Öpik, che viene presentata sia nella sua formulazione classica ([3]) che in quella estesa, elaborata da Valsecchi et al. in [7]. La teoria classica ha due importanti limiti: considera soltanto il caso in cui le orbite eliocentriche di pianeta e particella si intersecano e non tiene conto delle connessioni tra incontri successivi. La formulazione estesa supera queste limitazioni e consente di descrivere analiticamente il moto del corpo minore e di derivare delle espressioni per i parametri dell'orbita post-incontro.

Nel secondo capitolo, seguendo Valsecchi et al. [9], presenteremo una trattazione analitica che, partendo da un'orbita con valori fissati di a, e, i , permetta di ricavare delle espressioni analitiche per i valori iniziali pre-incontro degli elementi angolari ω, Ω, f in modo da ottenere l'orbita desiderata attraverso uno swing-by.

Nel terzo capitolo, infine, mostreremo un esempio di applicazione a una serie di incontri della sonda della missione spaziale JUICE con Callisto, volti a cambiare l'inclinazione dell'orbita della sonda.

Riferimenti bibliografici

- [1] Alessi, E.M., Modenini D.: Dispense del corso SPACECRAFT ORBITAL DYNAMICS AND CONTROL. Università di Bologna (2015)
- [2] Milani, A., Chesley, S.R., Chodas, P.W., Valsecchi, G.B.: *Asteroid Close Approaches: Analysis and Potential Impact Detection*. In *Asteroids III*, W. F. Bottke Jr., A. Cellino, P. Paolicchi, R. P. Binzel (eds), University of Arizona Press, Tucson, pp. 55-69 (2002)
- [3] Öpik, E.J.: *Interplanetary Encounters*. (Elsevier, New York 1976)
- [4] Serra D.: Dispense del corso di Elementi di Meccanica Celeste della prof.ssa A.M. Nobili (2012)
- [5] Tommei, G.: *Tesi di Laurea*. Università di Pisa (2002)
- [6] Valsecchi, G.B.: Close encounters in Öpik's theory. In *Singularities in gravitational systems. Application to Chaotic Transport in the Solar System*, ed. by Cl. Froeschlé, D. Benest (Springer, Berlin Heidelberg New York 2002) pp. 145-178
- [7] Valsecchi, G.B., Milani, A., Gronchi, G.F., Chesley, S.R.: *Resonant returns to close approaches: analytical theory*. A&A 408, 1179 (2003)
- [8] Valsecchi, G.B.: *Geometric Conditions for Quasi-Collisions in Öpik's Theory*, Lect. Notes Phys. 682, 145-158 (2006)
- [9] Valsecchi, G.B., Alessi, E.M., Rossi, A.: *An analytical solution for the swing-by problem*. Celest. Mech. Dynam. Astron. 123, 151 (2015)