



# *Giuseppe Colombo: un vero scienziato ed un maestro*

Anna M. Nobili

*Dipartimento di Fisica "E. Fermi", Università di Pisa*

*L'eredità scientifica di Giuseppe "Bepi" Colombo*

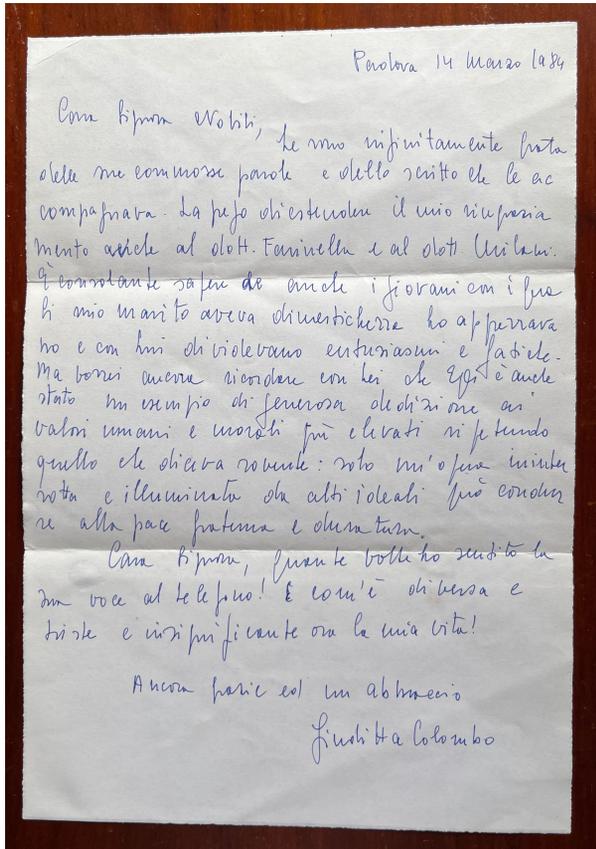
*Padova 26-27 Settembre 2024*



*Leggiamo le parole di chi lo conosceva meglio di tutti...*



## ... sua moglie Giuditta



*“È consolante sapere che anche i giovani con i quali mio marito aveva dimestichezza lo apprezzavano e con lui dividevano entusiasmi e fatiche.”*

*“Ma vorrei ancora ricordare con lei che Egli è anche stato un esempio di generosa dedizione ai valori umani e morali più elevati ripetendo quello che diceva sovente: solo un'opera ininterrotta e illuminata da alti ideali può condurre alla pace fraterna e duratura.”*

P. Farinella, A. Milani, A.N.:

*Un pioniere italiano della esplorazione spaziale  
L'Astronomia, Aprile 1984*

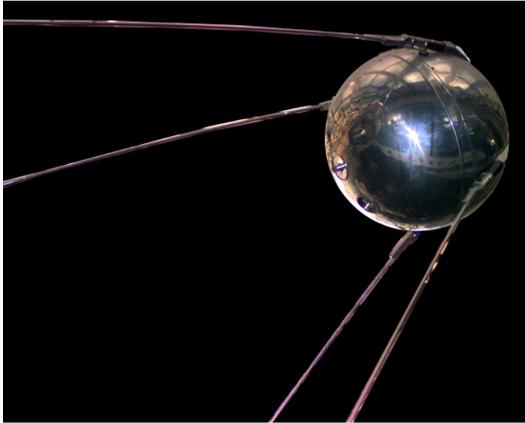
*Giuseppe Colombo - A remembrance  
in "Stability of the Solar System and its Minor Natural and Artificial Bodies"  
NATO advanced Study Institute, Cortina, August 1984 (Dedicated to Colombo)*



*Cominciamo da dove lui amava cominciare:  
4 ottobre 1957, il lancio dello Sputnik*



# Il primo satellite artificiale (sovietico) in orbita attorno alla Terra



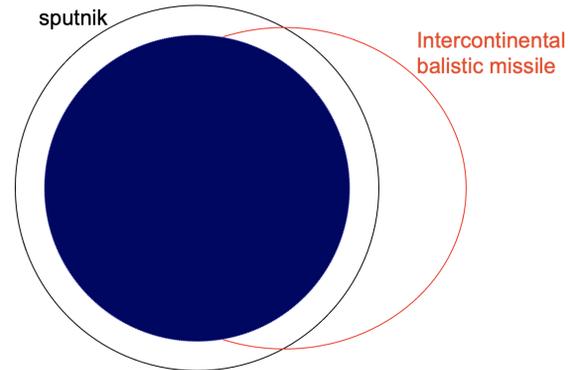
*Piccolo:* massa  $\sim 80$  kg, diametro  $\sim 58$  cm,  
potenza 1 W

*Orbita bassa:* periodo  $\sim 90$  minuti,  
inclinazione  $\sim 65^\circ$

*Totalmente innocuo!*

*E doveva essere uno spettacolo quando si riusciva  
a vederlo ad occhio nudo ritornare puntuale...*

**Il peccato originale della ricerca spaziale!**



$$E = -\frac{GM_{\oplus}}{2a}$$

$G$  costante di gravitazione universale  
 $M_{\oplus}$  massa della Terra,  $a$  semiasse maggiore

L'energia (per unità di massa) di qualunque oggetto in orbita attorno alla Terra dipende **solo** dal suo semiasse maggiore  $\Downarrow$

***Lo stesso razzo che aveva lanciato lo Sputnik avrebbe potuto lanciare una testata nucleare (di massa simile) su Washington!!!***



# Le reazioni di tre protagonisti d'eccezione

*"Per quanti di noi (scienziati, n.d.a) ricordano il trauma nazionale che fu per tutti gli americani il lancio dello Sputnik il 4 ottobre 1957 non c'è alcun dubbio che gli usi militari dello spazio hanno anche fornito i più potenti incentivi ai nostri (degli scienziati, n.d.a) sforzi successivi."*

**James Van Allen (n. 1914, USA), Gennaio 1986**

*"Non ero un esperto di Meccanica Celeste, e non parlavo inglese, ma decisi immediatamente di mettermi a studiare la Meccanica Celeste e di imparare l'inglese"*

**Giuseppe Colombo (n. 1920, Italia), 4 ottobre 1957**

*"Bliss was it in that dawn to be alive  
But to be young was very Heaven!" (dal poeta William Wordsworth)"*

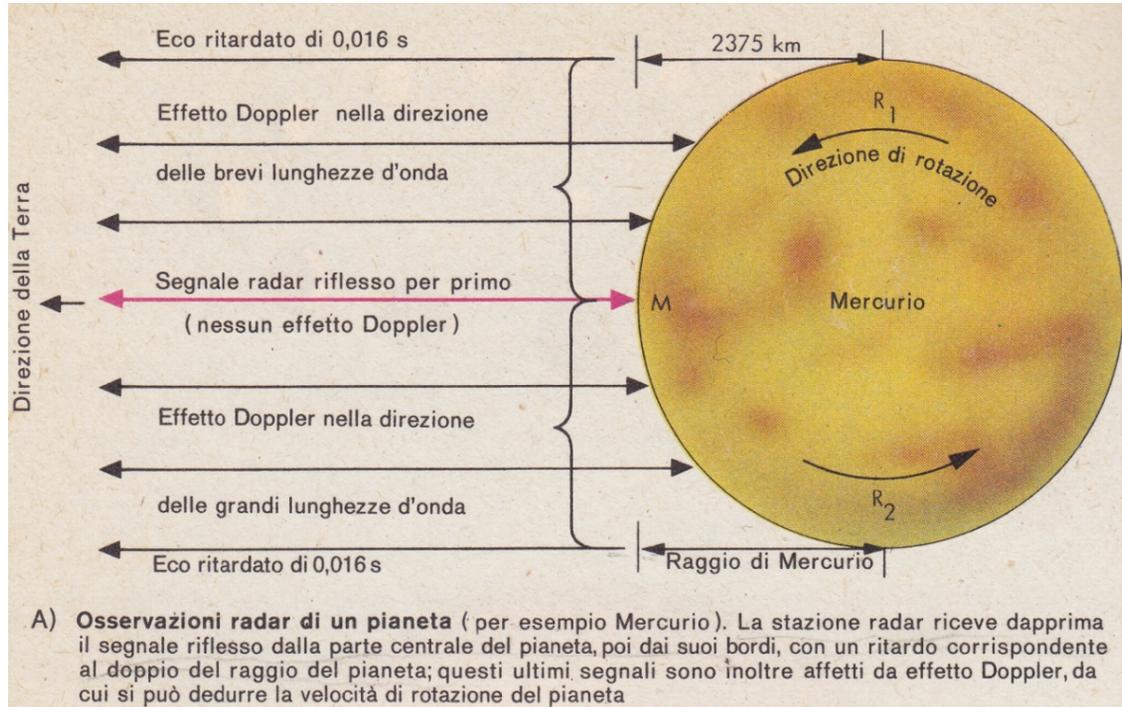
**Desmond King-Hele, scienziato e poeta (n. 1927, UK), 1983**



*Per lui la prima sfida era spiegare ciò che esperimenti,  
telescopi e sonde ci rivelano*



# Misura del periodo di rotazione di Mercurio



Nel 1965 Il periodo di rotazione di Mercurio viene misurato via radar (usando l'effetto Doppler) e risulta esser di  $59 \pm 5$  giorni

*Pettingill & Dyce, Nature 1965*

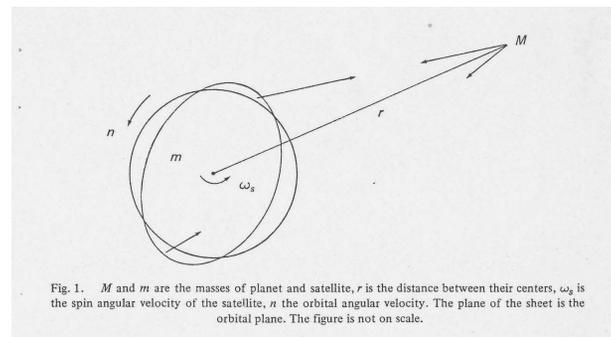


... ma la misura non torna con quanto ci si aspettava.



- Secondo Bessel (1813) Mercurio aveva un periodo di rotazione di circa 24 ore, come la Terra
- Nel 1889, dopo una lunga serie di osservazioni, Schiaparelli conclude che il periodo di rotazione di Mercurio è di 88 giorni, come quello orbitale (volge sempre la stessa faccia al Sole, come la Luna con la Terra: corotazione)

Schiaparelli, Astr. Nach 1889



$$T_{\text{attrito mareale}} \propto \frac{1}{Q} \frac{(\text{raggio del corpo})^5}{(\text{raggio orbitale})^6}$$

$Q$  (adimensionale) esprime la dissipazione per l'attrito della marea  
 ( $Q$  basso  $\leftrightarrow$  dissipazione alta)

Come l'attrito della marea terrestre sulla Luna l'aveva portata alla corotazione, così aveva fatto l'attrito della marea del Sole su Mercurio, grazie al suo piccolo raggio orbitale  
 ( $T_{\text{attrito mareale}} \propto 1/r^6$ )



# Allora la misura è sbagliata?



UNIVERSITÀ DI PISA

## Peale & Gold: Rotation of the Planet Mercury, Nature 1965

(proprio di seguito all'articolo che riportava il risultato della misura)

La loro analisi della evoluzione mareale di Mercurio porta ad un periodo di rotazione uguale a quello orbitale (88 giorni) e quindi concludono:

"The observed value of  $59 \pm 5$  differs markedly from this"

quindi secondo loro la misura è sbagliata.

*... ma forse è il loro modello che non tiene conto di tutti i dati del problema reale ...*

## Colombo: Rotational Period of the Planet Mercury, Nature 1965

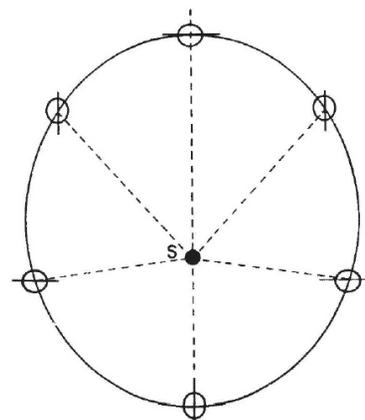


Fig. 1

*L'orbita di Mercurio è la più eccentrica del sistema solare (0.21) e siccome la coppia mareale va come  $1/r^6$ , la corotazione può avvenire al perielio ma non all'afelio, e quindi è possibile che la risonanza spin-orbita sia 3:2 anziché 1:1 (3 rotazioni su se stesso ogni 2 rivoluzioni attorno al Sole), ed è compatibile con la misura.*

La cattura in questa risonanza potrebbe essere dovuta a moti caotici

Correlo & Laskar, Nature 2004



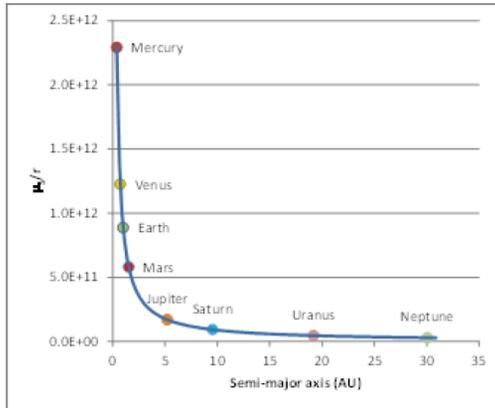
*... ma le idee possono anche dare un'impronta alla  
tecnologia spaziale ...*

*Mariner 10: non solo si può arrivare a Mercurio, ma ci si  
può anche tornare più volte*



# Dove si poteva andare una volta usciti dal campo gravitazionale della Terra?

$$U = -\frac{GM_{\odot}}{r} \quad \left( E = -\frac{GM_{\odot}}{2a} \right)$$



Il potenziale gravitazionale dei pianeti nel campo del Sole è un'iperbole, e Mercurio è il più vicino al Sole, per cui la differenza di potenziale tra Mercurio e la Terra è la più alta. Bisogna disfarsi di circa il 60% dell'energia della Terra per raggiungere la sua orbita. Arrivare a Mercurio direttamente è un'impresa proibitiva

Alberto Anselmi, 2018 on the BepiColombo mission

## Il programma Mariner

Name	Int'l Desig.	Date	Site	Vehicle	Orbit	Mass(kg)
Mariner 1	none	7/22/62	ESMC Atlas Agena B	FTO	200	
Destroyed by range safety; Venus probe						
Mariner 2	1962-A[Rho]1	8/27/62	ESMC Atlas Agena B	Solar	201	
Venus flyby at 34745 km						
Mariner 3	1964-073A	11/5/64	ESMC Atlas Agena D	Solar	260	
Mars probe; launch fairing failure prevented Mars flyby						
Mariner 4	1964-077A	11/28/64	ESMC Atlas Agena D	Solar	260	
Mars probe						
Mariner 5	1967-060A	6/14/67	ESMC Atlas Agena D	Solar	244	
Venus flyby 10/19/67						
Mariner 6	1969-014A	2/24/69	ESMC Atlas Centaur	Solar	412	
Mars flyby 7/31/69; returned 75 images of Martian surface						
Mariner 7	1969-030A	3/27/69	ESMC Atlas Centaur	Solar	412	
Mars flyby 8/5/69; returned 126 images of Martian surface						
Mariner 8 (Mariner H)	none	5/8/71	ESMC Atlas Centaur	FTO	996	
2nd stage failure; intended Mars flyby						
Mariner 9	1971-051A	5/30/71	ESMC Atlas Centaur	Mars	974	
Entered Mars orbit 11/13/71						
Mariner 10	1973-085A	11/3/73	ESMC Atlas Centaur	Solar	526	
Venus flyby 2/5/74; Mercury flybys on 3/29/74, 9/21/74, 3/16/75						

... Mercurio era un caso disperato ... fino a Mariner 10



# Breve storia dell'effetto fionda (gravity assist) fino a Mariner 10

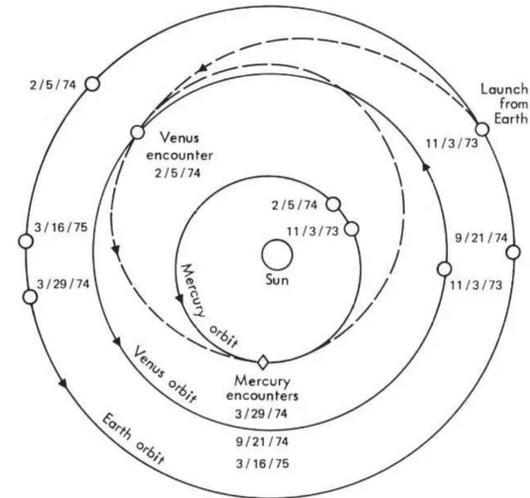
L'effetto era noto (a Tisserand) per le comete: quando passano vicine a Giove c'è un trasferimento di energia dal pianeta alla cometa

F. Tsander, sovietico (mentore di Korolev) ne scrive nel 1924-25

1959: primo uso del gravity assist per una sonda. I sovietici usano la Luna per cambiare l'inclinazione dell'orbita di Luna 3

Al JPL cominciano a farci dei conti nel 1961, e a fare sul serio nel 1965

*Colombo ci parlava di una brevissima lettera che aveva scritto alla NASA proponendo di usare Venere per andare a Mercurio facendo notare che l'orbita della sonda sarebbe stata vicina ad una risonanza 2/1 con Mercurio, per cui poteva tornare a visitarlo più volte*



*Colombo aveva notato che un'orbita ellittica con l'afelio alla distanza di Venere e il perielio alla distanza di Mercurio avrebbe un periodo orbitale vicino al doppio di quello di Mercurio. Quando la sonda passa vicino a Venere per andare a Mercurio è possibile cambiare di poco la sua energia affinché sia proprio in risonanza 2/1*



# Non c'è nessuna violazione della conservazione dell'energia...

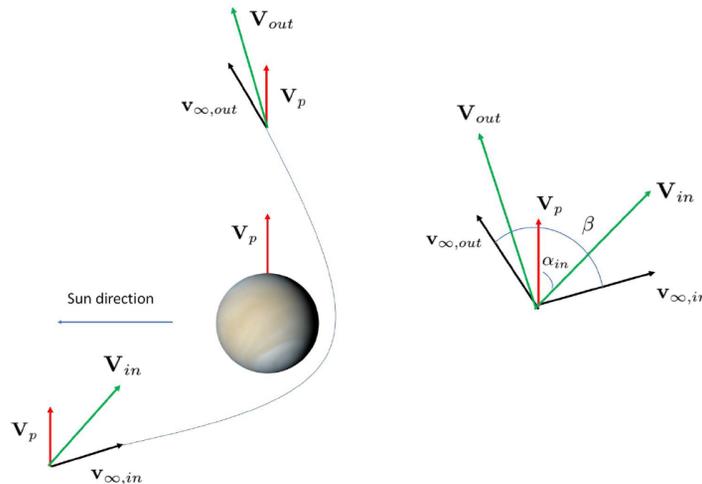
La sonda entra nella sfera di influenza del pianeta da fuori, quindi su orbita iperbolica.

**Caso in cui la velocità della sonda -nel sistema eliocentrico- aumenta.**

Usato nel 1973 da Pioneer 10, che uscì dal sistema solare dopo essere passato vicino a Giove

$$\Delta V = 2v_{\infty, in} \sin \frac{\beta}{2}$$

**(Per andare a Mercurio Mariner 10 doveva frenare, non accelerare)**



*La sonda guadagna (o perde) energia a spese del pianeta cui passa vicino, che però ha una massa tanto maggiore della sonda che neppure se ne accorge... l'energia si conserva...*



*In quegli anni le sfide non mancavano mai...*



## *Gli anelli di Urano...*

---

- Nel 1977 furono scoperti alcuni anelli intorno ad Urano, incluso uno ellittico che aprì subito una vivace discussione
- Colombo naturalmente era a conoscenza della scoperta e partecipava attivamente alla discussione. E naturalmente ci coinvolse
- Fu così che per la prima volta pubblicammo su Nature...

Farinella et al. *Lifetime of an elliptical ring around Uranus* Nature 1978



## *La scoperta di Caronte...*

---

- Caronte, satellite di Plutone, fu scoperto al Naval Observatory nel giugno del 1978. Si vide che non solo volgeva sempre la stessa faccia a Plutone (come la Luna alla Terra), ma anche Plutone faceva lo stesso con Caronte. Cioè il periodo di rotazione di Caronte, quello di Plutone e il loro periodo orbitale attorno al comune centro di massa sono tutti e 3 uguali.
- È l'unico esempio conosciuto nel Sistema Solare, e si sa che questa configurazione è lo stadio finale della evoluzione per attrito delle maree di un sistema di 2 corpi.
- Colombo ci portò subito la notizia e ci pose immediatamente il problema di capire se il tempo richiesto dalla evoluzione mareale per arrivare a questa rotazione sincrona era compatibile con l'età del sistema solare.
- Avevamo tutti gli strumenti, e a novembre dello stesso anno avevamo già sottoposto il lavoro, e la risposta era sì.



# Il puzzle di Titano-Iperione...

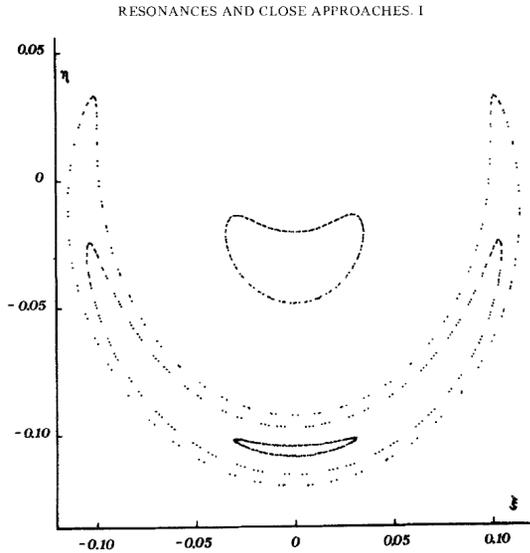


Fig. 3. Four superimposed librations with the same value of the Jacobi integral ( $H = -1.507880$ ): below, three librations of the high eccentricity type; above, one of the low eccentricity type.

Titano e Iperione orbitano attorno a Saturno in una risonanza 3/4 (Iperione è molto più piccolo di Titano e ha una forma irregolare tipo hamburger; vale il modello dei 3 corpi ristretto circolare)

Iperione è molto eccentrico, ma si muove in una isoletta di librazione di piccola ampiezza per cui le congiunzioni con Titano avvengono sempre all'apocentro, evitando incontri ravvicinati (catastrofici) con il grosso Titano. Ma come c'era finito era un rompicapo...

*Colombo ci aveva lavorato ed era per la "selezione naturale". Ci pose il problema. Ci procurò anche un finanziamento della Scuola Normale per il tempo macchina presso il CNUCE necessario a far girare il nostro programma ORBIT2*

Bevilacqua et al, *Resonances and close approaches. I. The Titan-Hyperion case*, *The Moon and the Planets*, 1980

Colombo, Franklin & Shapiro  
*On the formation of the orbit-orbit resonance of Titan and Hyperion*, *Astr. J.* 1974



# ... e la scoperta del caos nel Sistema Solare

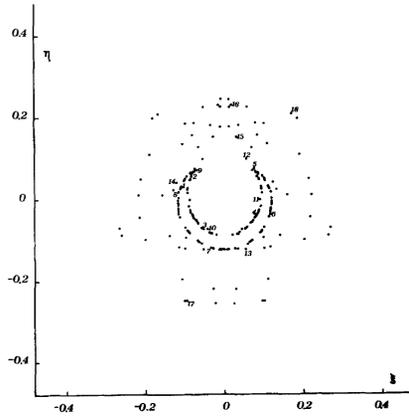


Fig. 4. A high-amplitude libration which results in a chaotic behaviour. The numbered points, representing consecutive conjunctions, show the gradual wandering away from the 'false invariant curve'.

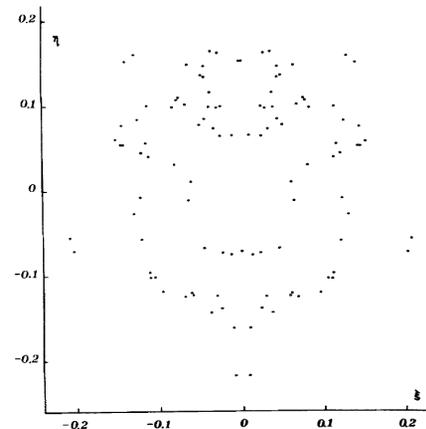


Fig. 5. A chaotic orbit which surrounds the ordered zone.

*Iperione si trova in una piccola isola di liberazione circondata da una zona caotica. È il primo esempio di caos nel Sistema Solare.*

*Quindi non riesce ad a crescere attirando materiale perché le velocità relative sono troppo alte, e resta piccolo con una forma irregolare.*

*A causa di questa forma irregolare non ha un asse di rotazione stabile e finisce in rotazione caotica. Dal caos orbitale nasce il caos rotazionale!!*

Bevilacqua et al, *Resonances and close approaches. I. The Titan-Hyperion case*, The Moon and the Planets, 1980

Farinella et al, *Hyperion: Collisional disruption of a resonant satellite*, Icarus 1983

Wisdom, Peale & Mignard, *The chaotic rotation of Hyperion*, Icarus 1984

Nobili& Burns, *Solar System Chaos*, Science 1989



*Bisogna “sporcarsi le mani” con i satelliti che misurano  
la Terra dallo spazio*



## *Era nata la geodesia spaziale...*

---

– Dal punto di vista tecnologico sono essenziali le stazioni di inseguimento laser dei satelliti. Colombo ha avuto un ruolo cruciale nell'avviare una stazione laser in Italia.

– Dal punto di vista teorico è essenziale modellare gli effetti delle perturbazioni non-gravitazionali (es. resistenza atmosferica, pressione di radiazione solare, effetti termici, etc...), che sono rilevanti perché il rapporto area-su-massa dei satelliti artificiali è grande (mentre è piccolo per i corpi celesti):

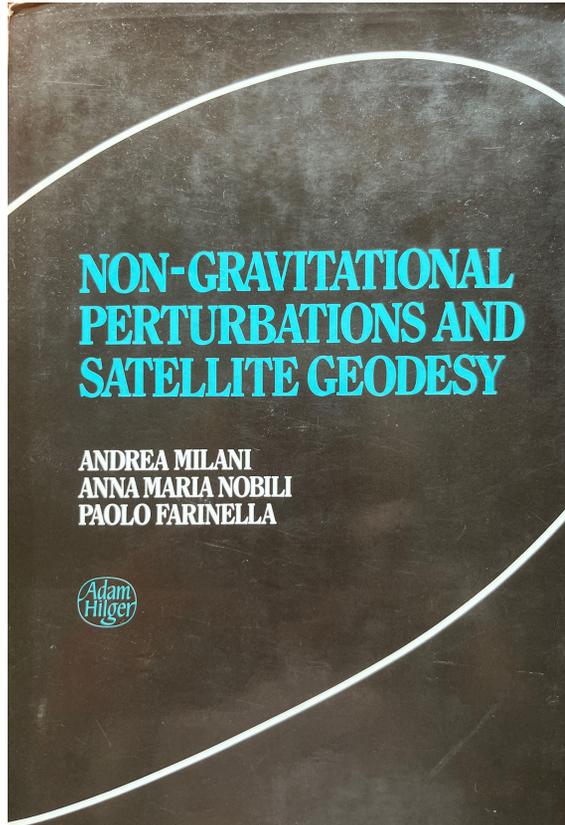
$$a_{ng} \propto \frac{A}{M} \propto \frac{1}{R}$$

$a_{ng}$  accelerazione prodotta sul satellite da un forza non-gravitazionale

$A$  sezione d'urto  $M$ ,  $R$  massa e dimensioni lineari del satellite

# *E naturalmente Colombo ci ha coinvolto ...*

*Nel 1987 abbiamo raccolto i frutti dei nostri lavori di quasi 10 anni in un piccolo libro ancora oggi molto usato*



Scriviamo:

*“This book is an occasion to remember Professor Giuseppe Colombo, recently passed away, who first taught us that there is neither “clean” nor “dirty” celestial mechanics, but only real problems to be solved in the sky.”*



Table 2.1 Accelerations on spacecraft used for satellite geodesy.

Cause	Formula	Parameters (in CGS units)	Accelerations (cm s <sup>-2</sup> )			
			Geosynchronous satellite $a = 42.160 \text{ km}$ $\mathcal{A}/\mathcal{H} = 0.1 \text{ cm}^2 \text{ g}^{-1}$	LAGEOS 12 270 0.007	Starlette -7300 0.01	SEASAT (OF ERS-1) -7100 0.2
(1) Earth's monopole	$\frac{GM_{\oplus}}{r^2}$	$GM_{\oplus} = 3.986 \times 10^{20}$	$2.2 \times 10^1$	$2.8 \times 10^2$	$7.5 \times 10^2$	$7.9 \times 10^2$
(2) Earth's oblateness	$\frac{3}{2} \frac{GM_{\oplus}}{r^3} \left(\frac{R_{\oplus}}{r}\right)^2 J_{20}$	$J_{20} = 4.84 \times 10^{-4}$ $R_{\oplus} = 6.378 \times 10^8$	$7.4 \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-1}$	$8.3 \times 10^{-1}$	$9.3 \times 10^{-1}$
(2) Low-order geopotential harmonics: e.g. $l=2, m=2$	$\frac{3}{2} \frac{GM_{\oplus} R_{\oplus}^2}{r^3} J_{22}$	$J_{22} = 2.81 \times 10^{-6}$	$4.3 \times 10^{-6}$	$6.0 \times 10^{-4}$	$4.8 \times 10^{-3}$	$5.4 \times 10^{-3}$
$l=6, m=6$	$\frac{7}{8} \frac{GM_{\oplus} R_{\oplus}^6}{r^7} J_{66}$	$J_{66} = 2.42 \times 10^{-7}$	$4.5 \times 10^{-10}$	$8.8 \times 10^{-6}$	$5.6 \times 10^{-4}$	$7.0 \times 10^{-4}$
(2) High-order geopotential harmonics: e.g. $l=18, m=18$	$\frac{19}{20} \frac{GM_{\oplus} R_{\oplus}^{18}}{r^{19}} J_{1818}$	$J_{1818} = 1.8 \times 10^{-8}$	$1.3 \times 10^{-20}$	$6.9 \times 10^{-10}$	$2.2 \times 10^{-7}$	$3.9 \times 10^{-7}$
(3) Perturbation due to the Moon	$2 \frac{GM_{\oplus}}{r^2} \frac{M_{\oplus}}{r}$	$M_{\oplus} = M_{\oplus}/81.3$ $r_{\oplus} = 3.8 \times 10^{10}$	$7.3 \times 10^{-4}$	$2.1 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-4}$
(3) Perturbation due to the Sun	$\frac{2}{r} \frac{GM_{\odot}}{r_{\odot}^2}$	$M_{\odot} = 3.29 \times 10^3 M_{\oplus}$ $r_{\odot} = 1.5 \times 10^{13}$	$3.3 \times 10^{-4}$	$9.6 \times 10^{-1}$	$5.7 \times 10^{-1}$	$5.6 \times 10^{-1}$
(3) Perturbation due to other planets (e.g. Venus)	$\frac{2}{r} \frac{GM_{\oplus}}{r_{\oplus}^2}$	$M_{\oplus} = 0.82 M_{\oplus}$ $r_{\oplus} = 4 \times 10^{13}$	$4.3 \times 10^{-4}$	$1.3 \times 10^{-8}$	$7.5 \times 10^{-9}$	$7.3 \times 10^{-9}$
(4) Indirect oblateness	$3 J_{20} \frac{GM_{\oplus}}{r^2} \left(\frac{R_{\oplus}}{r}\right)^2 \frac{M_{\oplus}}{M_{\oplus}}$		$1.4 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-9}$	$1.4 \times 10^{-9}$
(5) General relativistic correction	$\frac{GM_{\oplus}}{r^3} \frac{GM_{\oplus}}{c^2} \frac{1}{r}$	$\frac{GM_{\oplus}}{c^2} = 0.44$	$2.3 \times 10^{-9}$	$9.5 \times 10^{-8}$	$4.5 \times 10^{-7}$	$4.9 \times 10^{-7}$
(6) Atmospheric drag	$\frac{1}{2} C_D \frac{\rho}{\mathcal{H}} v^2$	$C_D = 2-4$ $\rho = 0-10^{-16}$	0(?)	$3 \times 10^{-10}$	$7 \times 10^{-8}$	$2 \times 10^{-5}$
(7) Solar radiation pressure	$\frac{\mathcal{A}}{c} \frac{\Phi_{\odot}}{c}$	$\Phi_{\odot} = 1.38 \times 10^8$	$4.6 \times 10^{-6}$	$3.2 \times 10^{-7}$	$4.6 \times 10^{-7}$	$9.2 \times 10^{-6}$
(8) Earth's albedo radiation pressure	$\frac{\mathcal{A}}{c} \frac{\Phi_{\oplus}}{c} A_{\oplus} \left(\frac{R_{\oplus}}{r}\right)^2$	$A_{\oplus} = 0.4$	$4.2 \times 10^{-4}$	$3.4 \times 10^{-1}$	$1.4 \times 10^{-1}$	$3.0 \times 10^{-4}$
(9) Thermal emission	$\frac{4}{9} \frac{\mathcal{A}}{c} \frac{\Phi_{\oplus}}{c} \frac{\Delta T}{T_{\oplus}}$	$\alpha = 0.4-0.7$ $\Delta T = 1-20^\circ$	$9.5 \times 10^{-4}$	$1.9 \times 10^{-10}$	$2.7 \times 10^{-10}$	$1.9 \times 10^{-1}$

Seguendo un suo tipico insegnamento, abbiamo costruito il libro attorno a questa tabella di ordini di grandezza delle principali perturbazioni non gravitazionali, perché il primo passo è capire quali sono le perturbazioni di cui dobbiamo preoccuparci e da quali parametri fisici dipendono... poi bisogna studiarle in dettaglio (ma mai partire con un approccio da pura forza bruta!)



*Sfruttare le peculiarità dell'ambiente spaziale  
(prepararsi al futuro)*

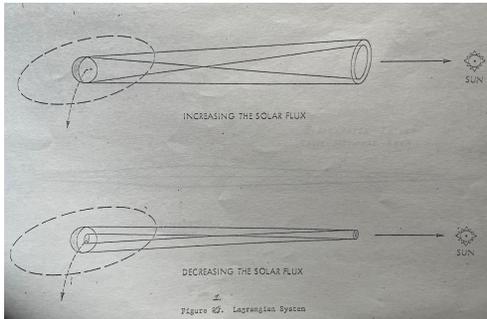
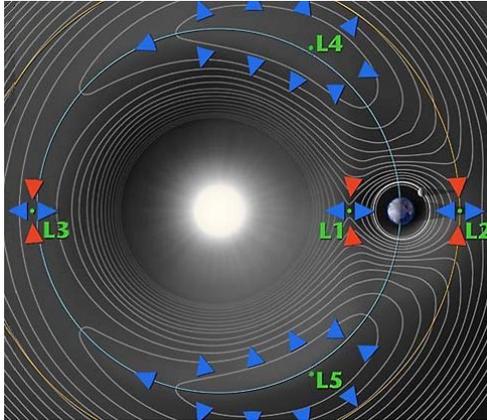


# *Pensare in grande e guardare lontano*

- Sulla Terra esiste un limite alle grandi strutture perché devono sostenere il proprio peso
- Nello spazio, in assenza di peso, le tensioni interne sono modeste, si può pensare in grande a strutture non rigide, pieghevoli o smontabili che si possono distendere o montare solo in orbita.
- *Era convinto che prima o poi l'umanità avrebbe dovuto fronteggiare drammatici cambiamenti climatici. E che in ogni caso una popolazione terrestre in aumento non può sopravvivere senza fonti alternative di energia*
- *Ci parlava di come si poteva controllare il flusso solare sulla Terra con un grande numero di satelliti, ciascuno con grande specchio non rigido, da dispiegare in volo, messi in orbita vicino al punto di equilibrio lagrangiano tra la Terra e il Sole dove le loro forze si bilanciano quasi esattamente e perciò i moti sono lenti, il controllo automatico da remoto è facile il consumo di carburante minimo*



# L'idea, i numeri, le sfide



- $L_1$  è instabile ma ci si può convivere
- Ogni s/c uno specchio  $\sim 1 \text{ km}^2$ ,  $10^6$ ,  $10^7$  specchi in una sfera di 15000 km di diametro (circa come la Terra) centrata in  $L_1$ , controllo della lenta instabilità degli s/c con microrazzetti a ioni, controllo statistico dell'orientazione in modo da controllare il flusso sulla Terra in distribuzione e quantità (10 s andata e ritorno per comunicare). Massa totale  $10^7$ ,  $10^8$  tonnellate
- *Sensori, controllo e potenza di calcolo non sono un problema*
- **Un errore non testare la vela solare "... in line with the usual way of thinking when choosing between electronic systems and mechanical systems"** disse nella sua conferenza al MIT
- **Ci vuole un salto qualitativo in meteorologia e climatologia ... non sono più difficili delle particelle elementari, è una questione di scelte .. "science follows money..."**
- **Per costruire così tanti s/c e portarli fuori dalla buca di potenziale della Terra ci sono due vie, da usare in combinazione: ridurre drasticamente i costi di costruzione e lancio (senza l'uomo si può fare, l'uomo nello spazio serve solo in casi eccezionali); industrializzare la Luna**

*Tutto questo richiede una cooperazione internazionale, " which makes it appear utopistic in the present political situation. However, it is very difficult to see how the human society may survive in the present configuration, under the present economical, political and social stresses"*



*Sfruttare le peculiarità dell'ambiente spaziale  
(già oggi)*



# Misura di $G$ sullo Shuttle

- Uno s/c in orbita è il laboratorio ideale per esperimenti che richiedono di misurare piccolissime forze con grande precisione ed accuratezza: assenza di peso, sistema isolato (bassi disturbi), vuoto a costo zero ... e molto altro per s/c ben progettati. Colombo: “Pensate ad un esperimento da fare dentro lo Shuttle...”
- $G$  è la costante fondamentale peggio nota: gli effetti da misurare piccolissimi rispetto alla gravità locale...

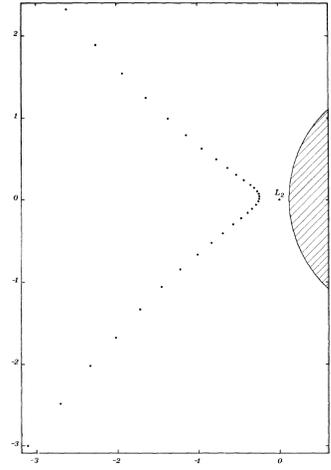
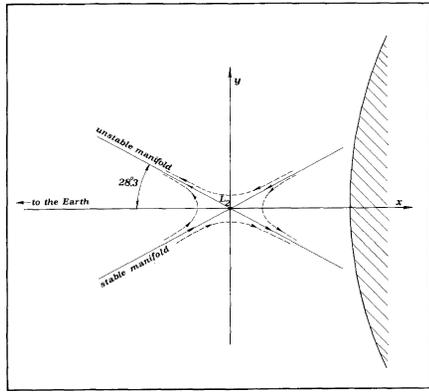
*Conosciamo bene LAGEOS e la terza legge di Keplero:  $n^2 a^3 = GM_{\oplus}$  ( $n = \frac{2\pi}{P^2}$ )*

Dalle misure (stazioni laser) si ottengono  $n, a \implies GM_{\oplus}$  con grande precisione, perché il moto di LAGEOS è dominato dalla gravità della Terra

*... ma si misura solo il prodotto di  $G$  per  $M_{\oplus}$ ! Per ottenere  $G$  da sola bisogna “pesare” la Terra!!!!*

- Se avessimo un modellino ‘Terra-LAGEOS’ in laboratorio, potremmo pesare la massa e dal moto orbitale ricavare  $G$  in un sistema dominato dall’effetto che vogliamo misurare... a Terra non si può ( $g$  fa cascare tutto...), ma in orbita si!
- Colombo: “Bellissimo! ... pausa... E la marea della Terra?”  
*È un sistema a 3 corpi: Terra-‘pianeta’ artificiale-‘satellite’ artificiale, e la Terra perturba il moto del sistema ‘pianeta-satellite’. Lo Shuttle vola troppo vicino e un’orbita tipo LAGEOS attorno alla Terra non è possibile....*

# ... qualcosa si può fare anche in orbita bassa



Farinella, Milani, N.  
*The measurement of the gravitational constant in an orbiting laboratory, Astr. Space Sc. 1980*

- Il punto lagrangiano di equilibrio è troppo vicino al 'pianeta' (la sua sfera di influenza è piccolissima). Il moto è instabile e (senza controllo..) il tempo in cui il 'satellite' passa vicino al pianeta è troppo breve per una misura di precisione. **Meglio un satellite dedicato in orbita alta**
- **Ma poi l'interesse si è spostato verso il test del principio di equivalenza (universalità della caduta libera) in quanto principio fondante della Relatività Generale**
- *Ed è così ho dedicato gli ultimi 25 anni della mia vita scientifica ad un test in orbita di altissima precisione, prendendo a prestito un principio ampiamente applicato in ingegneria meccanica (l'autocentratura di masse in rotazione supercritica), controintuitivo e (quasi) sconosciuto ai fisici.*
- *Ho seguito anche qui l'insegnamento di Colombo, ma questa è un'altra storia...*

"Galileo Galilei" GG