



Il messaggio di Giuseppe Colombo ai giovani meccanici spaziali di oggi

Anna M. Nobili
Dipartimento di Fisica "E. Fermi", Università di Pisa

*Lezione al Corso di Meccanica Spaziale del Prof. Giulio Baù
Università di Pisa, 26 maggio 2025*



*Abbiamo un grande bisogno di maestri, e non solo perché
la scienza è un mestiere difficile...*



Quasi 10 anni di “lezioni” molto speciali

Ottobre 1974: Colombo parla al LX Congresso della SIF a Bologna (il mio primo Congresso, da perfezionando in Normale). Problemi attualissimi, concetti complessi ridotti ai loro elementi di base ed esposti con estrema semplicità, passione ed entusiasmo travolgenti dall'inizio alla fine. Sembrava che parlasse dritto a ciascuno dei presenti. Anche se in Normale venivano scienziati da gran parte del mondo non avevo mai assistito ad una presentazione simile!

Colombo era professore a Padova, ma in quegli anni ebbe l'incarico di tenere alla Normale di Pisa un Corso di Meccanica Celeste, disciplina tornata di attualità con la gara spaziale e i primi computer elettronici, e in bacheca comparve un avviso per incontrare “gli studenti interessati”.

Il Corso cominciò con 2 studenti (Paolo Farinella ed io) e poco dopo si unì a noi Andrea Milani. Erano “lezioni” del tutto informali. Io telefonavo a Colombo (ad ora di cena, a casa) per sapere quando sarebbe passato da Pisa nel suo andirivieni con gli USA. Ci trovavamo in qualche studio in Normale, alla stazione, all'aeroporto, o a casa mia. Ci portava le ultime scoperte, i problemi più difficili, articoli non ancora pubblicati, i nuovi libri del dopo-sputnik che non si trovavano in nessuna biblioteca italiana e che dovevamo fotocopiare in gran fretta (l'inerzia del nostro mondo accademico ha radici antiche..), ci metteva in contatto diretto con i più grandi scienziati del momento, ai quali ci introduceva orgogliosamente come “i miei giovani”.

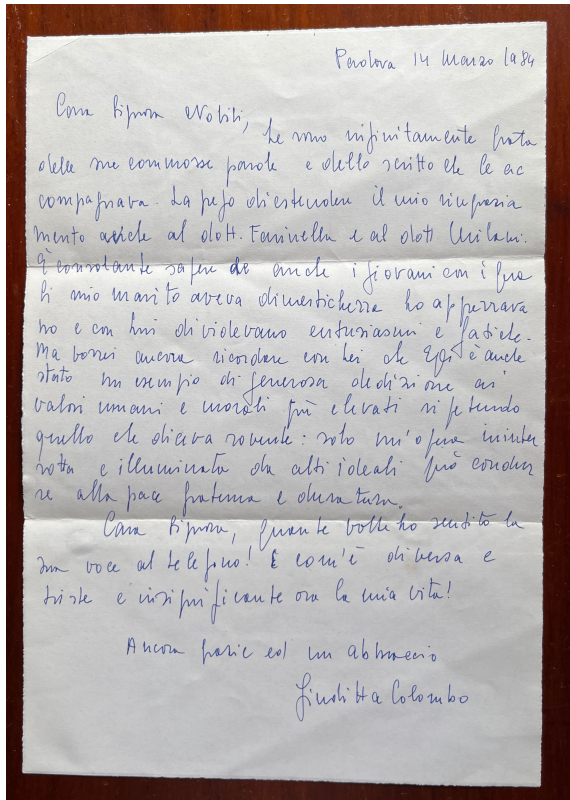
Le discussioni a volte erano aspre, ma non ci ha mai fatto pesare la sua indubbia superiorità. Era evidente la sua fiducia in noi, nel fatto che da tutto quel lavoro frenetico avremmo tirato fuori qualcosa di buono. E così ci spingeva a dare il massimo...

Tutto questo finì con la sua morte nel febbraio del 1984, a quasi 64 anni.

Anche Paolo e Andrea ormai non ci sono più, ma vale la pena riscoprire le tracce dei suoi insegnamenti perché hanno un grande valore per i giovani di oggi



Lo scienziato e l'uomo



Dalla moglie Giuditta poco dopo la sua morte

“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.”*

In ogni incontro c'era la scienza, ma c'era anche un vero rapporto umano, dal suo racconto di come era sopravvissuto fortunatamente alla disastrosa invasione della Russia, ad un interesse quasi commovente per noi che avevamo la metà dei suoi anni ed eravamo lontani dal suo mondo...

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

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

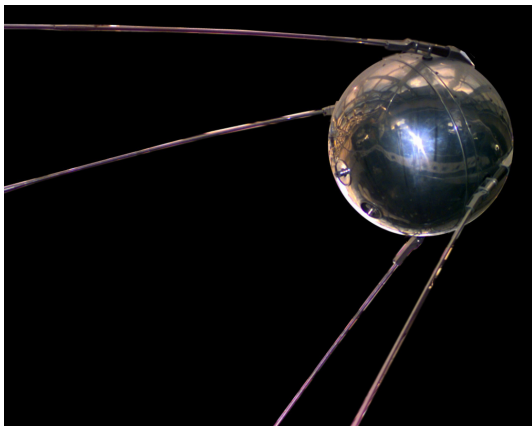
*Giuseppe Colombo - A remembrance
in “Stability of the Solar System and its Minor Natural and Artificial Bodies”
NATO advanced Study Institute, Cortina, August 1984 (Dedicated to Colombo)*



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



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



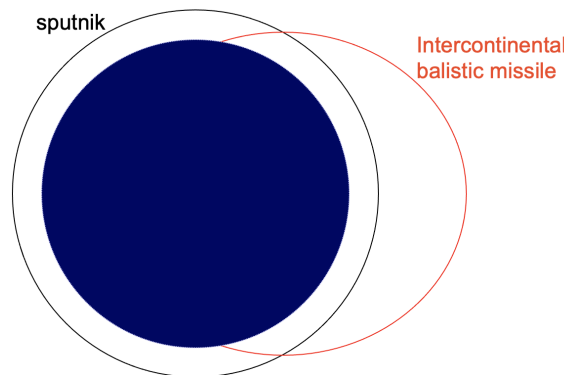
Piccolo: massa ~ 80 kg, diametro ~ 58 cm,
potenza 1 W

Orbita bassa: periodo ~ 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 (ne avevano 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 poema di William Wordsworth sull'inizio della
rivoluzione francese)*

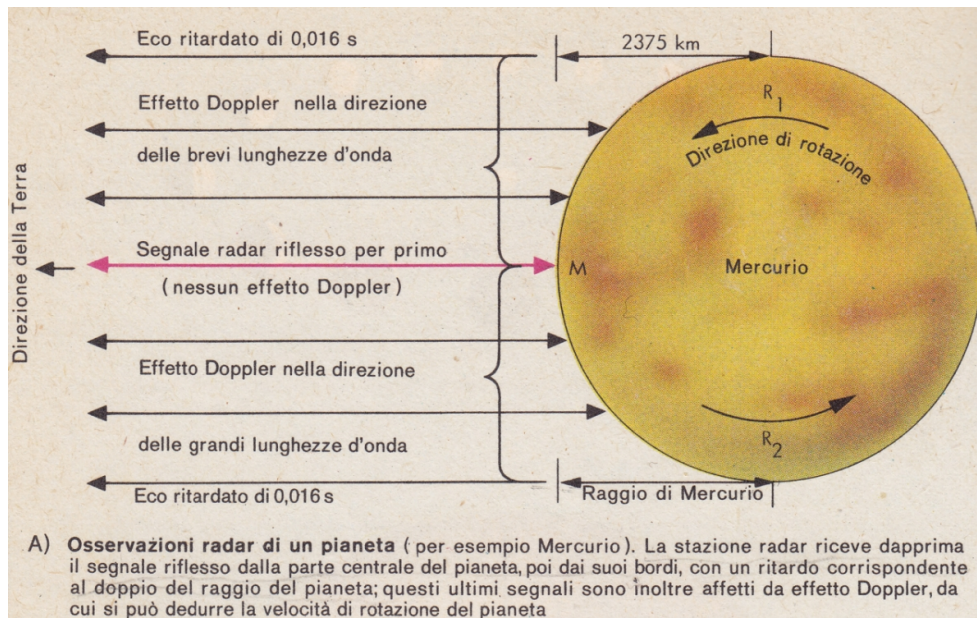
Desmond King-Hele, scienziato e poeta (n. 1927, UK), 1983



*Per lui la prima sfida era spiegare ciò che esperimenti,
telescopi e sonde ci rivelano
“.. e serve un grande impegno per arrivare a soluzioni
semplici”*



Misura del periodo di rotazione di Mercurio



A) Osservazioni radar di un pianeta (per esempio Mercurio). La stazione radar riceve dapprima il segnale riflesso dalla parte centrale del pianeta, poi dai suoi bordi, con un ritardo corrispondente al doppio del raggio del pianeta; questi ultimi segnali sono inoltre affetti da effetto Doppler, da cui si può dedurre la velocità di rotazione del pianeta

Il ritardo tra i segnali radar riflessi dalle regioni ai bordi rispetto a quelle centrali determina il raggio
 $\Delta t_{max} = 2R_{\oplus}/c \simeq 0.016 \text{ ms}$

L'effetto doppler (massimo ai bordi, nullo al centro e opposto nelle due regioni) determina la velocità lineare di rotazione

Nel 1965 Il periodo di rotazione di Mercurio viene misurato via radar (usando l'effetto Doppler) e risulta essere di 59 ± 5 giorni

Pettingill & Dyce, Nature 1965

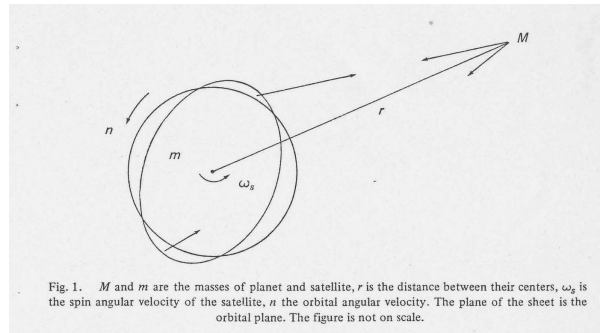


... ma la misura non torna con quanto ci si aspettava!

-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



A.N., Secular effects of tidal friction on the planet-satellite systems of the solar system, 1978

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

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 di Pettingill & Dyce)

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 ± 5 d 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

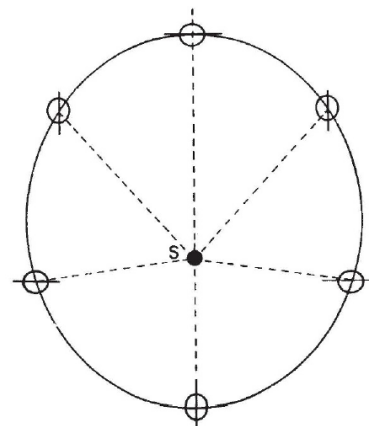


Fig. 1

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), e allora è compatibile con la misura!!!

Molti lavori (dopo!) sulla cattura in questa risonanza...
... potrebbe anche essere dovuta a moti caotici (Correlo & Laskar, Nature 2004)



“Serve un grande impegno per arrivare a soluzioni semplici”

LETTERS TO THE EDITOR

ASTROPHYSICS

Rotational Period of the Planet Mercury

In a recent communication by S. J. Peale and T. Gold¹ the rotational period of Mercury, determined from radar Doppler-spread measurements to be 39 ± 5 days², has been explained in terms of a solar tidal torque effect, taking into account the large eccentricity of Mercury's orbit, and the $1/r^3$ dependence of the tidal friction (r being the Sun-planet distance). They conclude from a very brief discussion that after slowing down from a higher direct angular velocity, the planet will have a final period of rotation between 56 and 88 days, depending on the assumed form of the dissipation function. However, from their discussion it is by no means clear why permanent deformations would imply a period of 88 days as a final rotation state after a slowing-down process. A very nearly uniform rotational motion of 58-65 sidereal-day period, that is $2/3$ of the orbital period, may indeed be a stable periodic solution. This rotational motion could have the axis of minimum moments of inertia nearly aligned with the Sun-Mercury radius vector at every perihelion passage. The orbital angular velocity at perihelion ($2\pi/56$ days) is close to $2\pi/58$ -65 days, leading to an approximate alignment of the axis of minimum moment of inertia with the radius vector in an arc around perihelion where the interaction is strongest. The axial asymmetry of Mercury's inertia ellipsoid may result in a torque that counterbalances the tidal torque, giving a stable motion with this orientation and with a period two-thirds of the orbital period. It would therefore be possible for Mercury to have a higher permanent rigidity than that permitted by Peale and Gold.

In discussion with I. I. Shapiro³, we concluded that the actual rotational motion may have evolved via a speeding-up process from a lower angular velocity or possibly from a retrograde motion. We would point out that a 58-65-day period, precisely because it is $2/3$ of the orbital period, fits some of the old optical observations as well as the recent radar measurements.

In Fig. 1 a rough planar sketch is shown of the orientation of Mercury's axis of minimum moment of inertia, at different points along its orbit, given that the rotational period is two-thirds of the orbital period and that this axis is aligned with the Sun-planet vector at perihelion.

G. COLOMBO

University of Padova, Italy, and
Smithsonian Astrophysical Observatory,
Cambridge,
Massachusetts.

¹ Peale, S. J. and Gold, T., *Nature*, **206**, 1341 (1965).

² Pettengill, G. H. and Tross, R. E., *Nature*, **208**, 1240 (1965).

³ Shapiro, I. I. (personal communication).

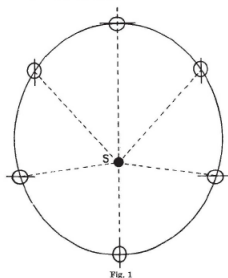


Fig. 1



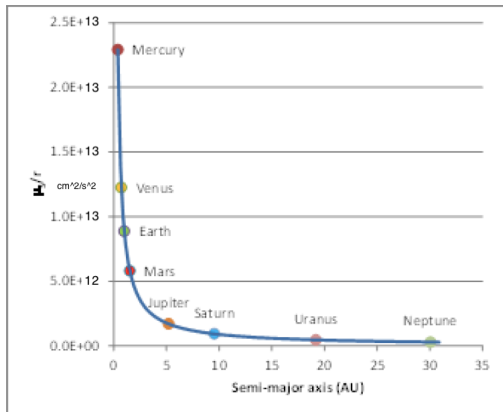
*... le idee possono anche dare un'impronta alla tecnologia
spaziale ...*

*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 $\Rightarrow$ la differenza di potenziale tra Mercurio e la Terra è la più alta

Su un'orbita kepleriana chiusa l'energia è negativa $\Rightarrow$ bisogna disfarsi di circa il 60% dell'energia della Terra per raggiungere Mercurio!! Arrivarci direttamente è proibitivo...

Nota: l'energia è negativa. Per andare a Mercurio bisogna perdere energia!

Alberto Anselmi, 2018 on the BepiColombo orbit

Il programma Mariner

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

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



L'effetto fionda (o "gravity assist")

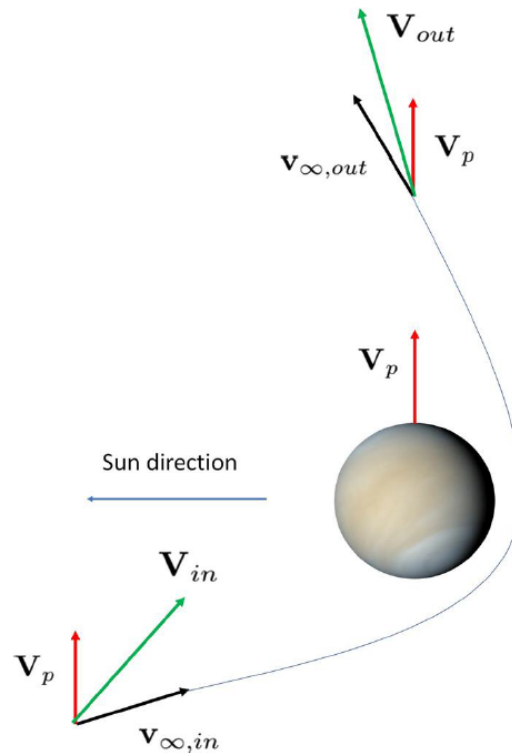
Quando uno s/c che si muove nel campo gravitazionale del Sole passa vicino ad un pianeta (fly-by, close-approach) le perturbazioni del pianeta cambiano la sua energia orbitale e il suo momento angolare

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

Già negli anni '20 del secolo scorso, decenni prima del lancio del primo satellite artificiale, c'era chi pensava di sfruttarlo per esplorare il sistema solare giacché permette di ridurre il consumo di carburante e i tempi di volo dello s/c

Il russo F. A. Tsander ne scrive estensivamente nel 1924-25 (S. Korolev, padre del programma spaziale sovietico, considera Tsander il proprio mentore)

F. A. Tsander: "Flight to other planets. The theory of interplanetary travel", Traduzione in Inglese uscita nel 1964 e accessibile in rete



Da: Negri & Prado "A historical review of the theory of gravity-assists in the pre-spaceflight era", 2020



Gravity assist: modello matematico e approssimazioni

È un classico problema dei 3-corpi (puntiformi): corpo centrale (Sole), corpo perturbatore (pianeta), s/c

Si può approssimare con più problemi dei 2-corpi (tutti corpi puntiformi):

i) s/c che esce dal campo gravitazionale della Terra, entra in orbita attorno al Sole e raggiunge l'orbita di un altro pianeta (che ha velocità eliocentrica $\vec{v}_p$ nel suo problema dei 2-corpi intorno al Sole) andandogli "abbastanza vicino" (concetto di "sfera di influenza" del pianeta)

ii) s/c in orbita intorno al pianeta mentre attraversa la sua "sfera di influenza" entrando con velocità eliocentrica $\vec{v}_{in}$ su un'orbita che deve essere iperbolica perché arriva da fuori (dall'infinito...) con velocità non nulla

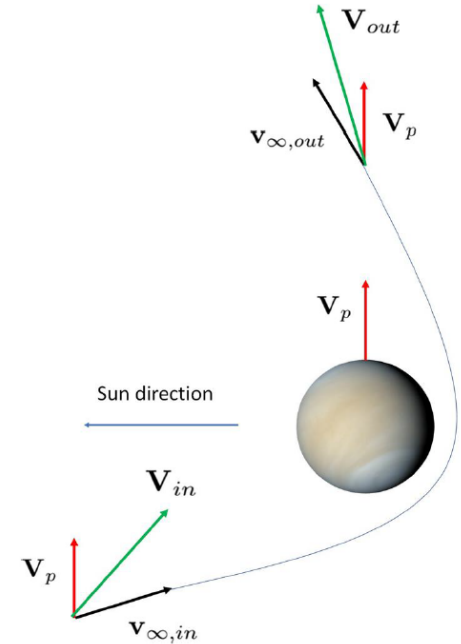
($\vec{v}_{\infty in} = \vec{v}_{in} - \vec{V}_p$ è la velocità planetocentrica dello s/c sull'iperbole all'ingresso)

iii) s/c nella sua nuova orbita intorno al Sole con velocità eliocentrica iniziale $\vec{v}_{out}$

($\vec{v}_{\infty out} = \vec{v}_{out} - \vec{V}_p$ è la velocità planetocentrica dello s/c all'uscita dalla sfera di influenza) con

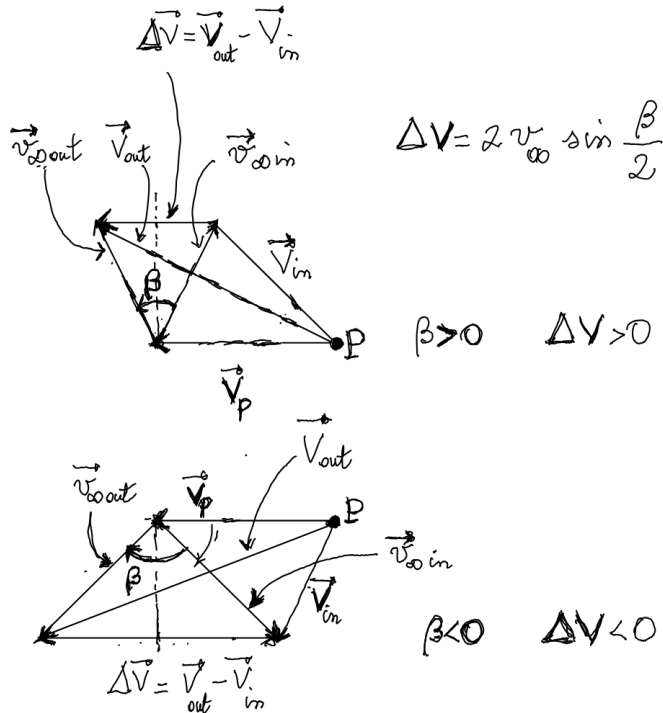
$v_{out} = v_{in} \equiv v_{\infty}$ e un angolo di deflessione β tra $\vec{v}_{\infty out}$ e $\vec{v}_{\infty in}$

Siccome la dimensione della sfera di influenza del pianeta è molto piccola rispetto a quella dell'orbita eliocentrica dello s/c possiamo assumere che la deflessione da $\vec{v}_{\infty in}$ a $\vec{v}_{\infty out}$ avvenga nello stesso punto $\Rightarrow$ cambia solo l'energia cinetica





Gravity assist: ΔV e il suo segno



Se nella sua orbita iperbolica dentro la sfera di influenza lo s/c passa “dietro” al pianeta (come nella figura precedente) l’angolo di deflessione è $\beta > 0 \Rightarrow \Delta V > 0$ lo s/c accelera

Se invece lo s/c passa “davanti” al pianeta, l’angolo di deflessione è $\beta < 0 \Rightarrow \Delta V < 0$ lo s/c frena

Nota: tutti i pianeti orbitano attorno al Sole in senso antiorario

Queste figure sfruttano l'approssimazione in cui si trascura la dimensione della sfera di influenza del pianeta e tutto l'effetto sullo s/c avviene in un singolo punto



Gravity assist: la variazione di energia

$$\vec{V}_{in} = \vec{v}_{\infty in} + \vec{V}_p \quad (\text{tra loro l'angolo } \alpha_{\infty in}) \Rightarrow V_{in}^2 = v_{\infty}^2 + V_p^2 + 2v_{\infty}V_p \cos \alpha_{\infty in}$$

$$\vec{V}_{out} = \vec{v}_{\infty out} + \vec{V}_p \quad (\text{tra loro l'angolo } \alpha_{\infty out}) \Rightarrow V_{out}^2 = v_{\infty}^2 + V_p^2 + 2v_{\infty}V_p \cos \alpha_{\infty out}$$

$\Downarrow$

$$\Delta E = \frac{1}{2}(V_{out}^2 - V_{in}^2) = v_{\infty}V_p(\cos \alpha_{\infty out} - \cos \alpha_{\infty in})$$

Tsander (p.280) dimostra che (angoli in valore assoluto):

$$\Delta E = \pm 2v_{\infty}V_p \sin(\alpha_{\infty in} \pm \beta/2) \sin(\beta/2)$$

dove:

$\Delta E > 0$ quando lo s/c passa “davanti” al pianeta (cioè $\beta < 0$ e lo s/c frena)

$\Delta E < 0$ quando lo s/c passa “dietro” al pianeta (cioè $\beta > 0$ e lo s/c accelera)

Nessuna contraddizione: se lo s/c guadagna energia sale di quota e la sua velocità orbitale diminuisce (e viceversa se perde energia.. vedi l'effetto del drag atmosferico sui satelliti terrestri...)

Da dove viene l'energia che lo s/c guadagna, o dove va a finire la sua energia quando la perde?

Nessun mistero: lo scambio avviene con il pianeta, la cui energia è di gran lunga maggiore di quella dello s/c...



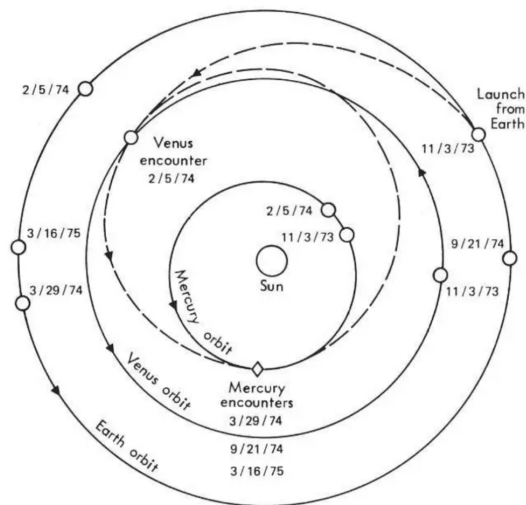
.. e arriviamo a Mariner 10

1959: primo uso del gravity assist per una sonda. I sovietici usano la Luna per cambiare l'inclinazione dell'orbita di Luna3

M. Minovich, JPL: Lo chiama "propulsione gravitazionale" e pubblica un sacco di esempi numerici in un report del 1963

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. Ma sembra che di questa lettera non si trovi traccia...



Il contributo di 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 le sue condizioni iniziali (la sua energia) affinché sia proprio in risonanza 2/1.

Tsander aveva ragione: nel fly-by a Venere e poi negli aggiustamenti per i sorvoli ripetuti a Mercurio ci vuole molta precisione per non finire fuori obiettivo! Al JPL erano scettici...



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 soloolgeva 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...

RESONANCES AND CLOSE APPROACHES. I

145

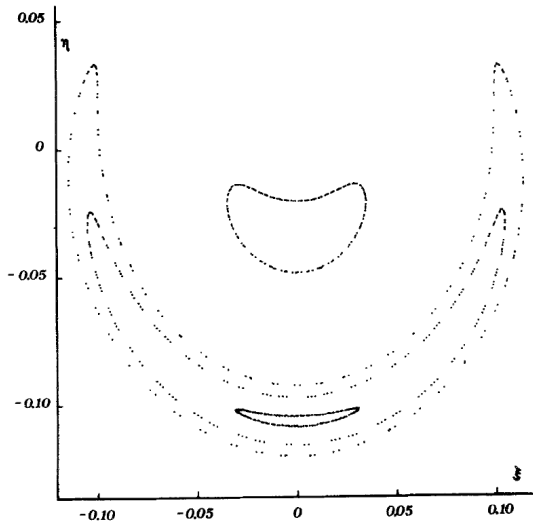


Fig. 3. Four superimposed librations with the same value of the Jacobi integral ($H = -1.507880$): below, three librations of the high eccentricity type; above, one of the low eccentricity type.

Bevilacqua et al, *Resonances and close approaches*.

I. *The Titan-Hyperion case*, *The Moon and the Planets*, 1980

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

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

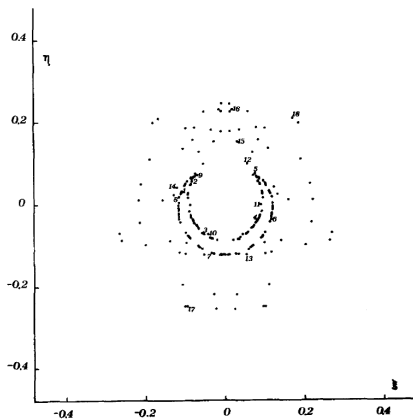


Fig. 4. A high-amplitude libration which results in a chaotic behaviour. The numbered points, representing consecutive conjunctions, show the gradual wandering away from the 'false invariant curve'.

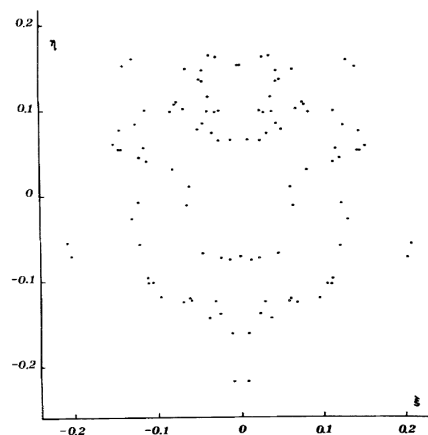


Fig. 5. A chaotic orbit which surrounds the ordered zone.

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 accrescere 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



Se hai un messaggio importante da comunicare, fallo con il minor numero di parole possibile...

However, the true meaning of this chaos is not yet understood. Nor is it clear how relevant it is in shaping the present configuration of our solar system; certainly chaos is not a *deus ex machina* capable of explaining the entire distribution of objects in the solar system.

In a few cases the results on chaos in the solar system do explain observations. For example, chaos is thought to produce the gap in the distribution of asteroids at the 3:1 orbital resonance with Jupiter by inducing highly eccentric orbits (1), in one case even elongated enough to cross Earth's path, thereby indicating a route for the delivery of meteorites (2). Close encounters with Jupiter resulting from chaos also appear to be the explanation for the drop of asteroid number density in the outer belt (3). Finally, the hamburger-shaped Saturnian satellite that is locked in orbital resonance with neighboring massive Titan inside a small libration island surrounded by a large chaotic region (4). It appears that, as the satellite was battered by primordial impacts, chaos prevented fragments from being reaccreted. Consequently, only Hyperion's craggy core remains today (5), and its very irregular shape—together with the large eccentricity forced by Titan—is responsible for the satellite's chaotic tumbling (6). From orbital chaos, spin chaos was born!

The presence of chaos, however, does not necessarily imply that real objects are invariably absent. Project SPACEGUARD (7), which investigated all known planet-crossing asteroids as influenced by all planets but Mercury and Pluto, shows that, over the 200,000-year span of the calculation, asteroid motions are highly chaotic; yet the objects are there. Moreover, chaos can mean quite different things: asteroids can be perturbed onto comet-like paths or have their eccentricities pumped up to Earth-crossing values while in orbital resonances with Jupiter, but they can also be protected from close planetary approaches.

As Kerr describes, open planetary orbits are now seen to be chaotic with the time scales for the onset of chaos being remarkably brief: 5 million years for the inner planets and 20 million years for Pluto. This chaos has startled celestial mechanicians who, for over two centuries, have been trying to prove just the opposite, namely that the solar system is stable, perhaps motivated by the simple fact that we are here. However, N -body systems with $N > 2$ are nonintegrable, and the phase spaces of such systems are known to contain an intricate interweaving of regular and chaotic regions. Although the planets have only feeble mutual perturbations, chaotic regions must exist

so that, provided a numerical integration is long enough, the solution will enter such a region. In this context, planetary chaos was in fact foreseen by Poincaré, but many today have forgotten his prediction. Nevertheless, the implications of planetary chaos are not so clear-cut as in the asteroidal examples cited above. In those cases chaos determines the dynamics by forcing the asteroids close to the planets, as happened when 1089TC passed Earth in late March at only twice the moon's distance. But the planets have been around for nearly 1000 times the detected time scale for chaos in the inner planets, so in this case what does chaos mean? For Pluto, an analysis motivated by the discovery of chaos (8) shows that the planet's major dynamical features are unchanged despite the strength of the chaos (9). It is important to note that different long-term integrations of the orbits of the outer planets do generally agree, thereby implicitly validating both works. However, they also demonstrate that the role of high-order secular resonances, as well as the strength of the chaos—and possibly its very detection—depend strongly on initial conditions and the physical model used.

The curious situation today is that, as our capability to detect chaos in the motion of real objects increases, the relevance of this chaos becomes more difficult to assess.

ANNA M. NOBILI*

Department of Astronomy,
Space Sciences Building,
Cornell University,
Ithaca, NY 14853

JOSEPH A. BURNS
Departments of Astronomy and
Theoretical and Applied Mechanics,
Cornell University

REFERENCES

1. J. Wisdom, *Journ. Geophys. Res.* **88**, 51 (1983).
2. A. Milani and A. M. Nobili, *Astron. Astrophys.* **144**, 261 (1985).
3. R. Bevilacqua, O. Menzili, A. Milani, A. M. Nobili, P. Farinella, *Journ. Geophys. Res.* **92**, 141 (1987).
4. P. Farinella, A. Milani, A. M. Nobili, P. Padellaro, V. Zappala, *Journ. Geophys. Res.* **92**, 103 (1987).
5. J. Wisdom, S. Peale, F. Mignard, *ibid.* **88**, 137 (1983).
6. A. Milani, M. Carpinio, G. Hedo, A. M. Nobili, *ibid.* **78**, 512 (1983).
7. G. J. Sellar and J. Wisdom, *Science* **241**, 433 (1988).
8. A. Milani, A. M. Nobili, M. Carpinio, *Journ.*, in press.
9. A. Milani, A. M. Nobili, M. Carpinio, *Journ.*, in press.

*On sabbatical leave from the University of Pisa, Italy, with the support of the G. Galilei Fellowship of the European Space Agency.

Erratum: The article "Spin chaos: big risk in interpreting basic science" (Nobili & Burns, 18 Mar., p. 128) by Joseph A. Burns and Anna M. Nobili, published in the Education, Science, and Culture, known as *Montebello*, has only a few errors in corrections. In fact, Montebello has a few corrections in each scientific specialty, such as molecular biology.

Solar System Chaos

We have no quarrel with Richard A. Kerr's statement (Research News, 14 Apr., p. 144) that, as faster computers have allowed longer numerical integrations, chaos is turning up everywhere in the solar system.

23 JUNE 1989

LETTERS 1425



*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):

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

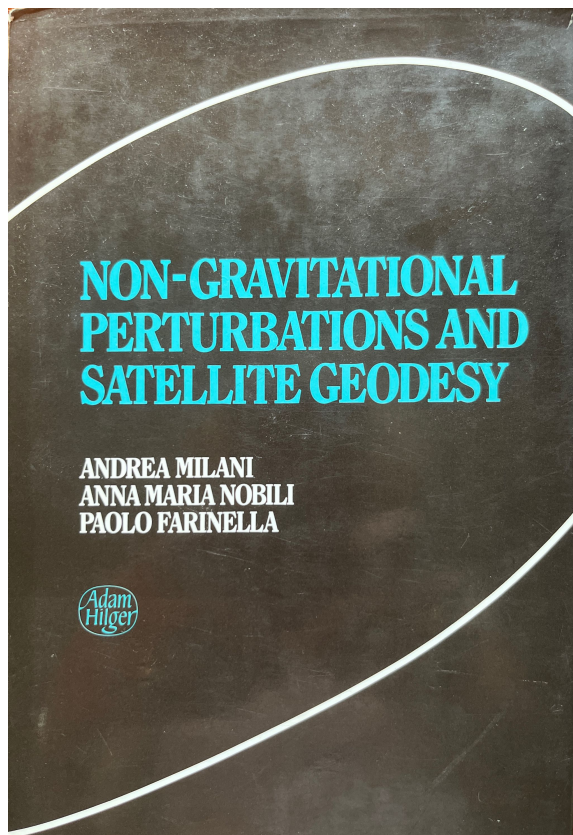
a_{ng} accelerazione prodotta sul satellite da un forza non-gravitazionale

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



Scrivevamo:

"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 ⁻²)			
			Geosynchronous satellite $a = 42\,160\text{ km}$ $M = 0.1\text{ cm}^3\text{ g}^{-1}$	LAGEOS 12 270 0.007	Starlette -7300 0.01	SEASAT (of IRS-1) -7100 0.2
(1) Earth's monopole	$\frac{GM_{\oplus}}{r^2}$	$GM_{\oplus} = 3.986 \times 10^{20}$	2.2×10^1	2.8×10^2	7.5×10^2	7.9×10^2
(2) Earth's oblateness	$\frac{3}{2} \frac{GM_{\oplus}}{r^3} \left(\frac{R_{\oplus}}{r} \right)^2 J_2$	$J_2 = 4.84 \times 10^{-4}$ $R_{\oplus} = 6.378 \times 10^8$	7.4×10^{-4}	1.0×10^{-1}	8.3×10^{-1}	9.3×10^{-1}
(2) Low-order geopotential harmonics: e.g. $l=2$, $m=2$	$\frac{3}{2} \frac{GM_{\oplus} R_{\oplus}^2}{r^4} J_{22}$	$J_{22} = 2.81 \times 10^{-4}$	4.3×10^{-6}	6.0×10^{-4}	4.8×10^{-3}	5.4×10^{-3}
$l=6$, $m=6$	$\frac{3}{2} \frac{GM_{\oplus} R_{\oplus}^6}{r^7} J_{66}$	$J_{66} = 2.42 \times 10^{-7}$	4.5×10^{-10}	8.8×10^{-6}	5.6×10^{-4}	7.0×10^{-4}
(2) High-order geopotential harmonics: e.g. $l=18$, $m=18$	$\frac{19}{20} \frac{GM_{\oplus} R_{\oplus}^{18}}{r^{20}} J_{1818}$	$J_{1818} = 1.8 \times 10^{-8}$	1.3×10^{-20}	6.9×10^{-10}	2.2×10^{-3}	3.9×10^{-3}
(3) Perturbation due to the Moon	$2 \frac{GM_{\oplus}}{r^2} \frac{M_{\oplus}}{r}$	$M_{\oplus} = 81.3$ $r_{\oplus} = 3.8 \times 10^{10}$	7.3×10^{-4}	2.1×10^{-4}	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}
(3) Perturbation due to the Sun	$2 \frac{GM_{\oplus}}{r^2} \frac{M_{\odot}}{r}$	$M_{\odot} = 3.29 \times 10^3 M_{\oplus}$ $r_{\odot} = 1.5 \times 10^{13}$	3.3×10^{-4}	9.6×10^{-3}	5.7×10^{-3}	5.6×10^{-3}
(3) Perturbation due to other planets (e.g. Venus)	$\frac{GM_{\oplus}}{r^2} \frac{M_{\oplus}}{r}$	$M_{\oplus} = 0.82 M_{\oplus}$ $r_{\oplus} = 4 \times 10^{11}$	4.3×10^{-8}	1.3×10^{-8}	7.5×10^{-9}	7.3×10^{-9}
(4) Indirect oblateness	$3 J_2 \frac{GM_{\oplus}}{r^3} \left(\frac{R_{\oplus}}{r} \right)^2 \frac{M_{\oplus}}{r}$		1.4×10^{-9}	1.4×10^{-9}	1.4×10^{-9}	1.4×10^{-9}
(5) General relativistic correction	$\frac{GM_{\oplus}}{r^3} \frac{GM_{\oplus}}{c^2} \frac{1}{r}$	$\frac{GM_{\oplus}}{c^2} = 0.44$	2.3×10^{-9}	9.5×10^{-8}	4.5×10^{-7}	4.9×10^{-7}
(6) Atmospheric drag	$\frac{1}{2} C_D \frac{\rho}{\rho_0} v^2$	$C_D = 2-4$ $\rho = 10^{-14}$	0(?)	3×10^{-10}	7×10^{-8}	2×10^{-8}
(7) Solar radiation pressure	$\frac{A \Phi_{\odot}}{c}$	$\Phi_{\odot} = 1.38 \times 10^6$	4.6×10^{-8}	3.2×10^{-7}	4.6×10^{-7}	9.2×10^{-8}
(8) Earth's albedo radiation pressure	$\frac{A \Phi_{\oplus}}{c} A_{\oplus} \left(\frac{R_{\oplus}}{r} \right)^2$	$A_{\oplus} = 0.4$	4.2×10^{-8}	3.4×10^{-8}	1.4×10^{-7}	3.0×10^{-8}
(9) Thermal emission	$\frac{4 A \Phi_{\oplus}}{9 A_{\oplus} c} \frac{\Delta T}{T_{\oplus}}$	$\alpha = 0.4-0.7$ $\Delta T = 1-20^\circ$	9.5×10^{-8}	1.9×10^{-10}	2.7×10^{-10}	1.9×10^{-7}

14

THE PERTURBATIONS

ORDERS OF MAGNITUDE OF THE PERTURBING FORCES

15

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

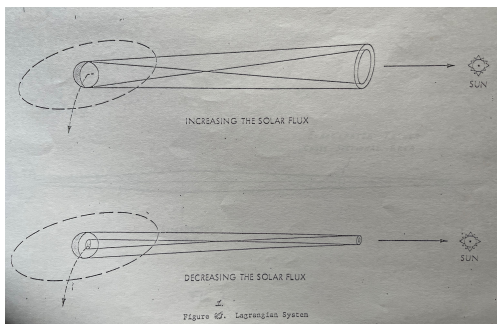
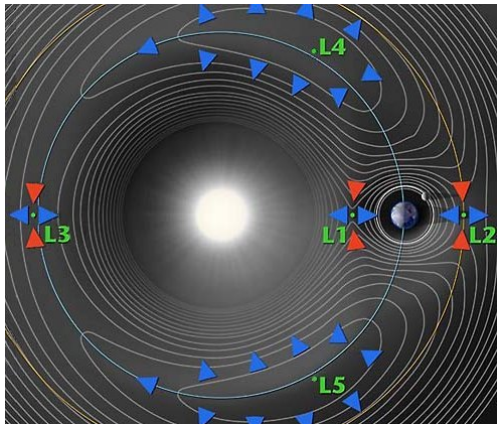
- Sulla Terra esiste un limite alle grandi strutture perché devono sostenere il proprio peso
- Nello spazio, in assenza di peso, le tensioni interne sono modeste, si può pensare in grande a strutture non rigide, pieghevoli o smontabili che si possono distendere o montare solo in orbita.
- *Era convinto 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



UNIVERSITÀ DI PISA



- 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"

Colombo, MIT, 1980



*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: $n^2 a^3 = GM_{\oplus}$ $\left(n = \frac{2\pi}{P^2}\right)$

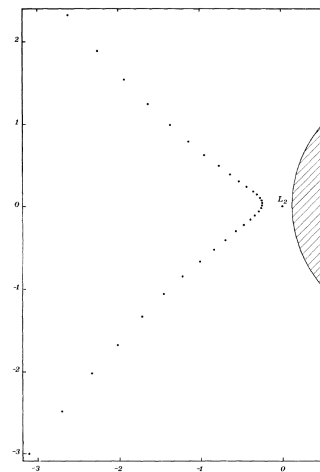
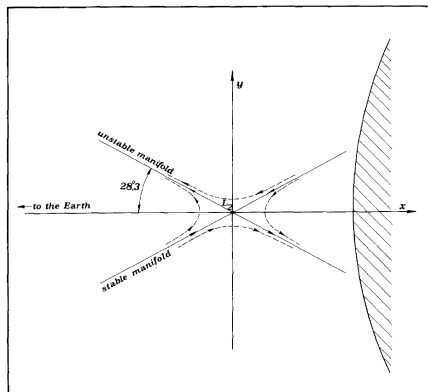
Dalle misure (stazioni laser) si ottengono $n, a \Rightarrow GM_{\oplus}$ con grande precisione, perché il moto di LAGEOS è dominato dalla gravità della Terra

... 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 sì!
- 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