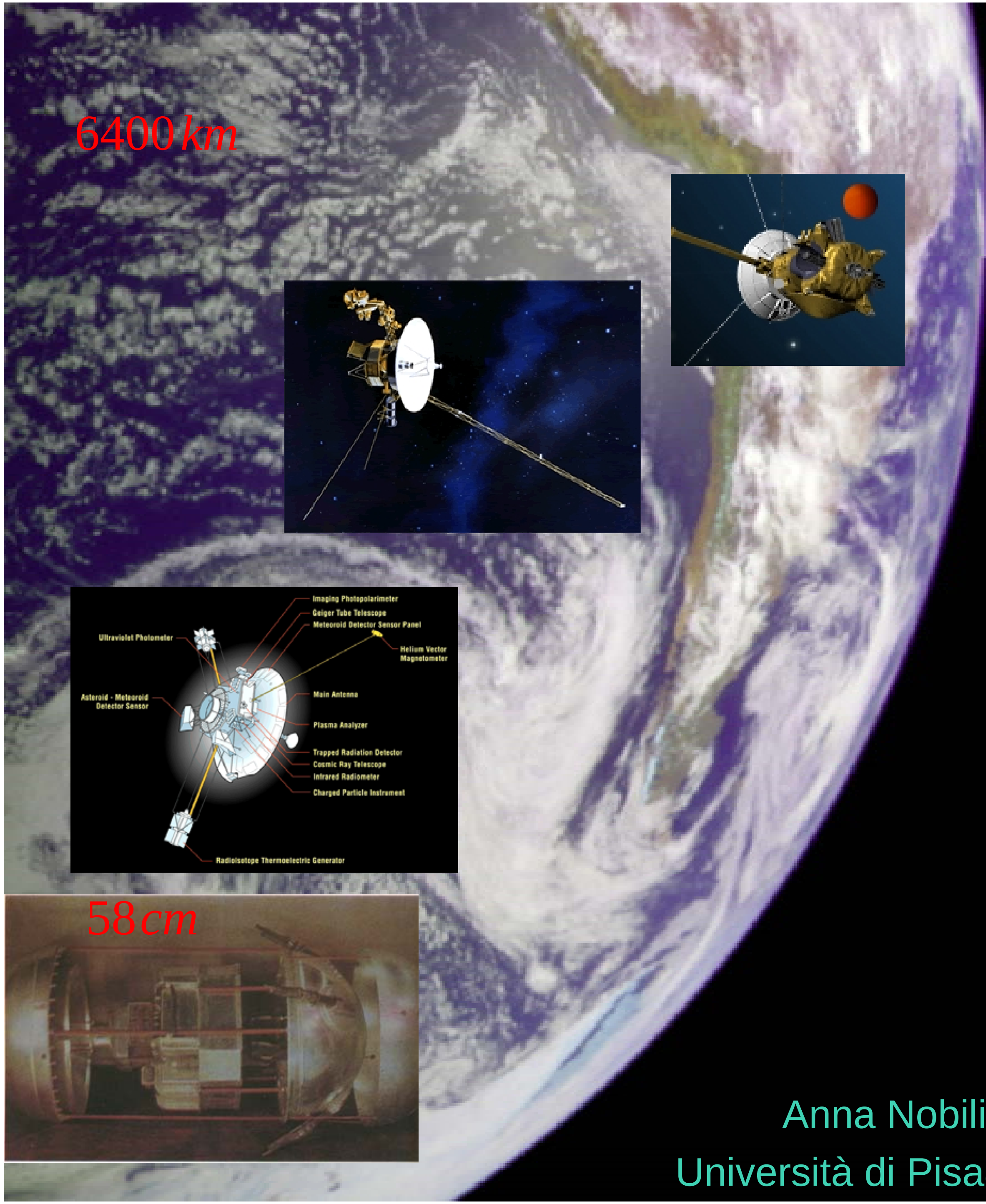
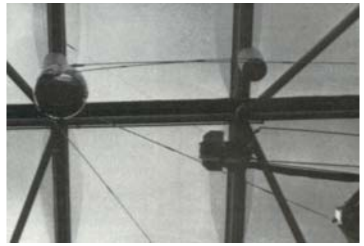


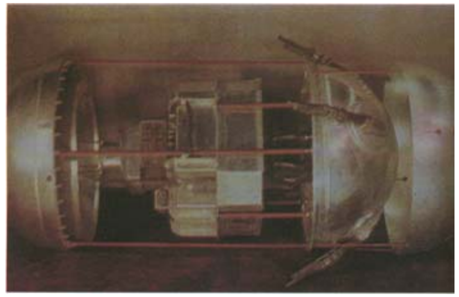
Il cammino delle sonde spaziali

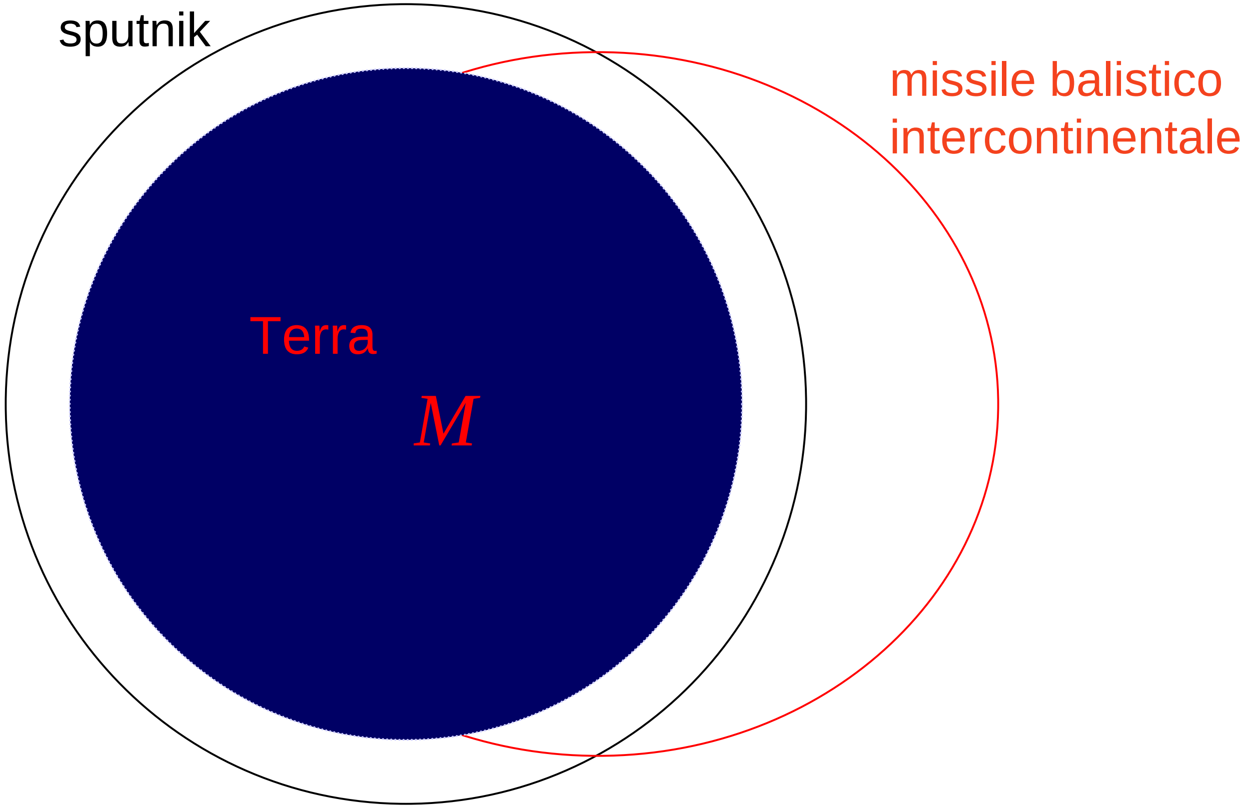
Anna Nobili
Università di Pisa&INFN

Lo shock dello Sputnik (1)

Perché un piccolo satellite fece quasi una rivoluzione?





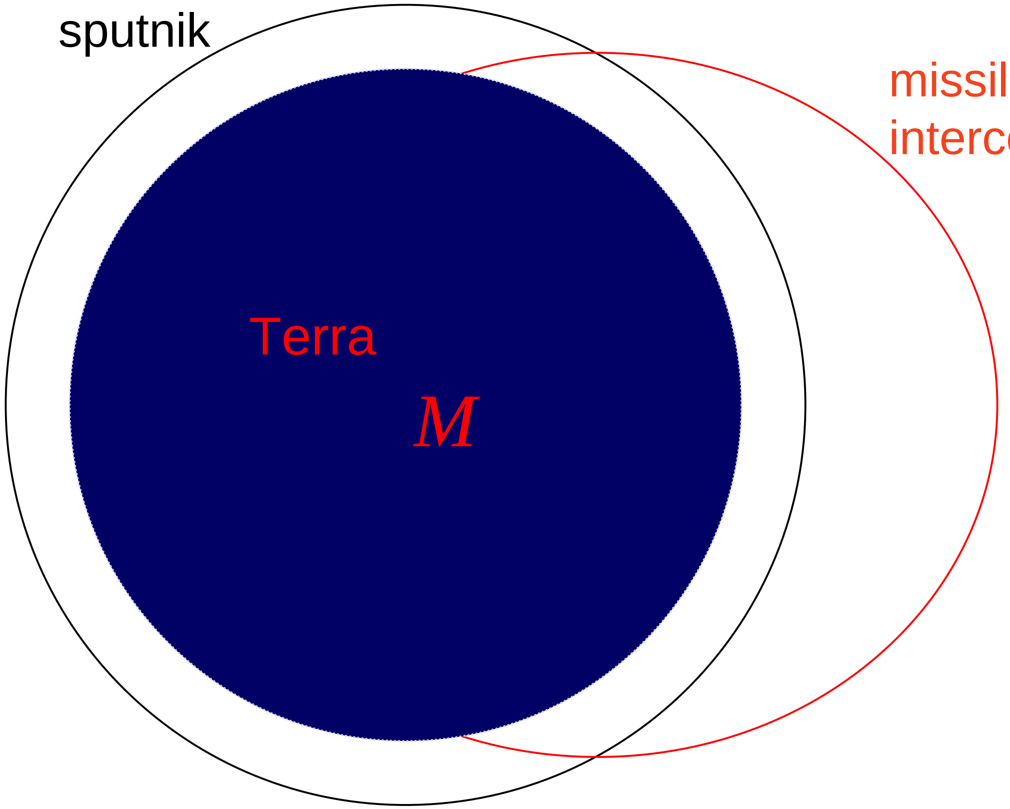


$$E = -\frac{GM}{2a}$$

L'energia (per unità di massa) di un corpo in orbita dipende **solo** dal raggio medio (semiasse maggiore) a della sua orbita

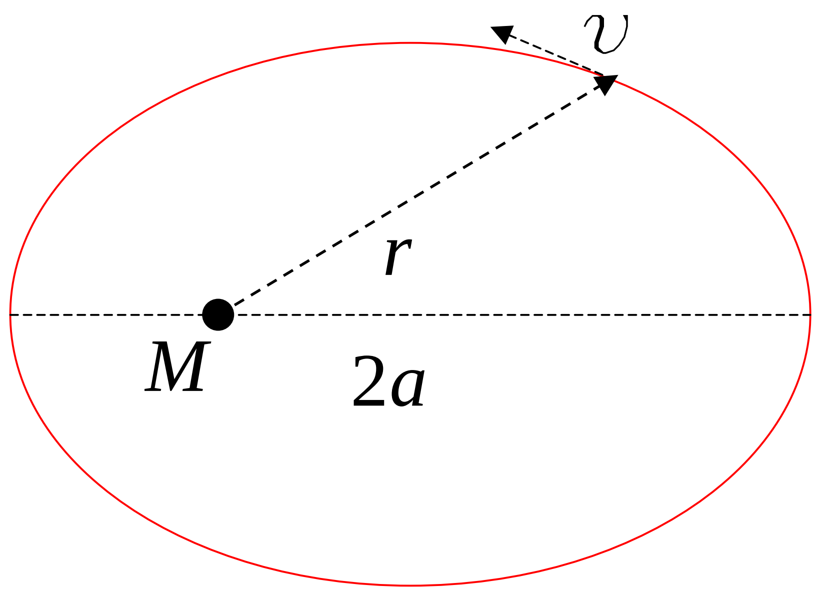
Lo shock dello Sputnik (2)

"For those of us who remember the national trauma following the succesful launching of the first Soviet Satellite on October 4, 1957 there is little doubt that the military uses of space have provided the most powerful incentives for our subsequent effort" James Van Allen, Gennaio 1986



Navigare nello spazio è più facile che guidare una barca a vela... (1)

- Il modello fisico di base è il problema dei 2 corpi (2 masse puntiformi soggette solo alla propria mutua interazione gravitazionale)



$$E = \frac{1}{2}v^2 - \frac{GM}{r} = -\frac{GM}{2a}$$

conservazione dell'energia

$$\Downarrow$$

$$v = \sqrt{GM} \cdot \sqrt{\left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a}\right)}$$

$$v_c = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

(velocità nel caso di orbita circolare)

Nota: la massa della sonda orbitante NON compare mai !!!! Davvero un piccolo sputnik oppure una enorme stazione spaziale non fa differenza????

$$v_{sputnik} \simeq 7.8\ km/s$$

in orbita bassa attorno alla terra..

Navigare nello spazio è più facile che guidare una barca a vela... (2)

$$E = \frac{1}{2}v^2 - \frac{GM}{r} = -\frac{GM}{2a}\left\langle \begin{array}{l} < 0 \;\; ellisse\,(o\,circonferenza) \\ = 0 \; parabola \; (v_\infty = 0) \\ > 0 \; iperbole \; (v_\infty > 0) \end{array} \right.$$

Dall'orbita circolare bassa (sputnik) la minima velocità necessaria per fuggire "<u>all'infinito</u>" è (orbita parabolica; conservazione dell'energia):

$$\frac{1}{2}v_f^2 - \frac{GM}{r} = 0 \;\Rightarrow v_f = \sqrt{\frac{2GM}{r}} = \sqrt{2} \cdot v_c \simeq 11 \, km/s$$

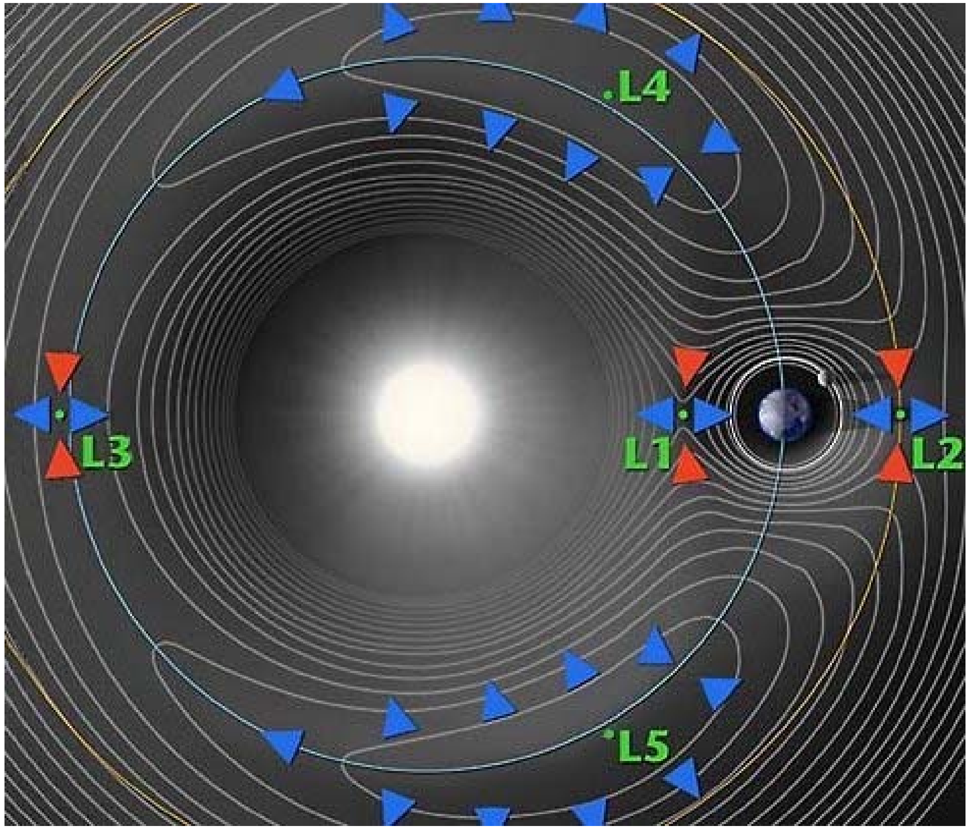
Una volta in orbita bassa attorno alla Terra ($v_c \simeq 7.8 \; km/s$) , scappare all'"infinito" richiede solo un $\Delta v \simeq 3 \; km/s$

Il vero problema è non ricadere sulla Terra e riuscire a orbitarci intorno, anche, a bassa quota….

Occorre andare all'infinito per sfuggire all'attrazione della Terra?

- Il modello fisico di base è il problema dei 3 corpi: Terra, Sole, sonda

Approssimazioni: i) la sonda "sente" l'attrazione di Sole e Terra, ma non viceversa perché la sua massa e' trascurabile rispetto ad entrambi; ii) Sole e Terra sono puntiformi (o a simmetria sferica) e su orbite circolari (problema dei 3 corpi ristretto circolare)



Nel riferimento rotante con la Terra attorno al Sole, essi sono fermi e posso calcolare dove si può svolgere il moto della "sonda" (a seconda delle sue condizioni iniziali)

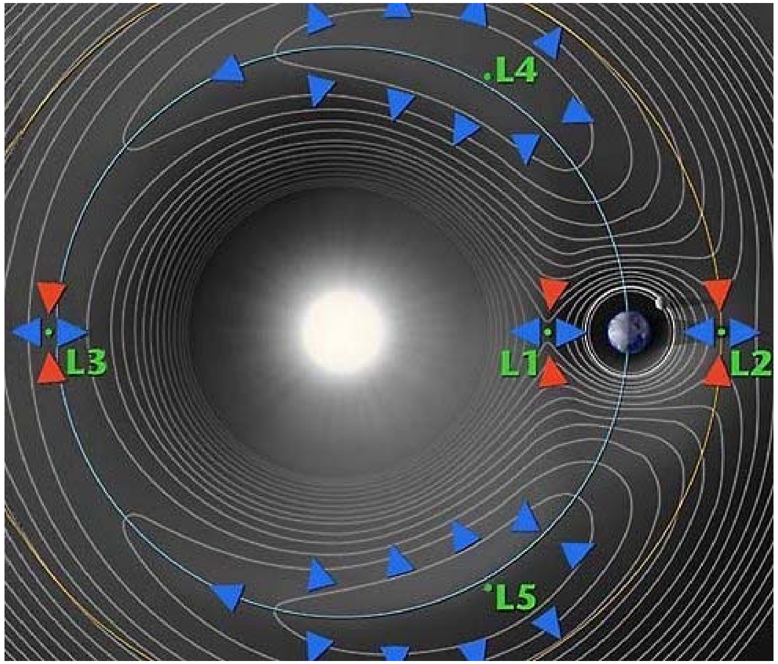
La Terra ha una sua sfera di influenza al di fuori della quale il moto della sonda è dominato dal Sole. Il suo raggio è

$$R_{si\oplus} \simeq d_{\oplus sole}\left(\frac{M_{\oplus}}{3M_{sole}}\right)^{1/3}$$

Per sfuggire alla Terra e andare verso altri pianeti basta arrivare al bordo della sua sfera di influenza…..

Partire verso altri pianeti

$$\mathcal{R}_{si\oplus} \simeq 10^{-2}\, d_{\oplus sole} \simeq 4\, d_{\oplus luna} \simeq 36\, a_{sat\, geostazionario} \simeq 240\, R_{\oplus}$$



Ma se la sonda arriva al bordo della sfera di influenza della Terra su orbita parabolica ha una velocità residua nulla …

Per andare verso altri pianeti deve arrivarci su orbita iperbolica (dall'orbita circolare bassa), e quindi deve lasciare l'orbita circolare con una velocità un po' maggiore di quella minima di fuga:

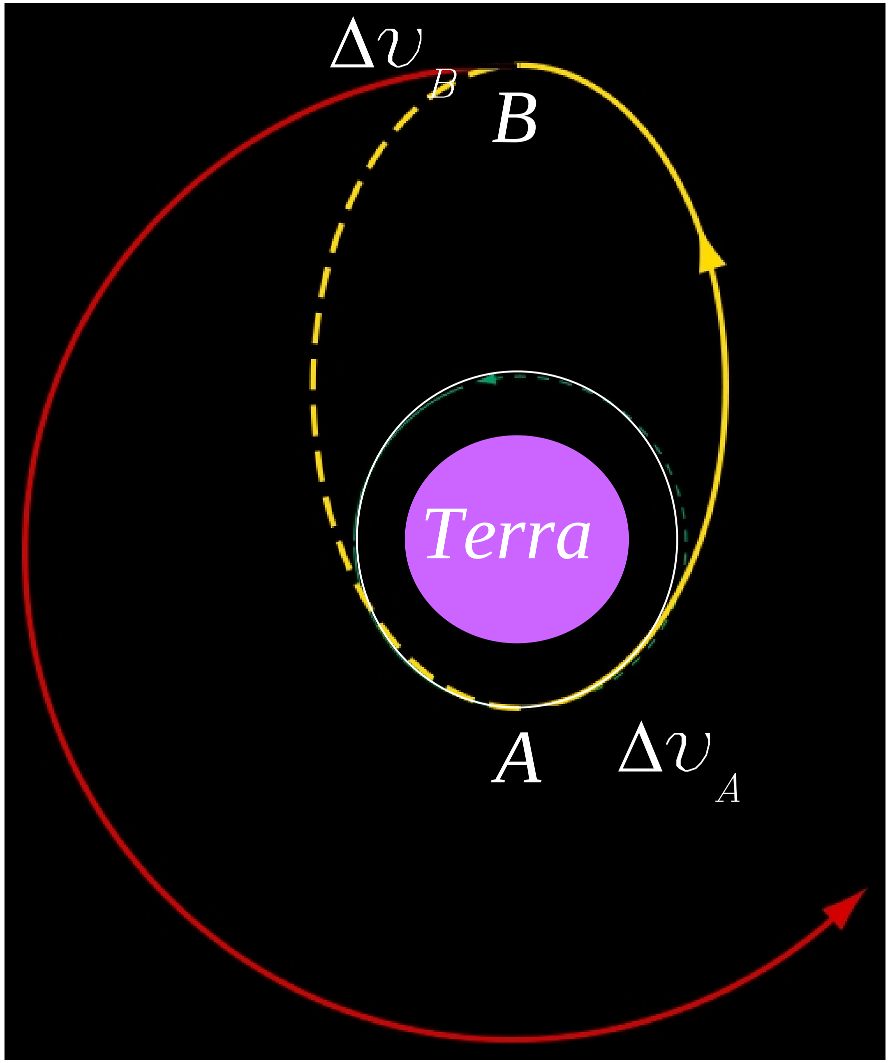
$$\upsilon_i = \upsilon_f + \Delta\upsilon \quad , \; \upsilon_f = \sqrt{\frac{2GM}{r}}$$

$$\frac{1}{2}\upsilon_i^2 - \frac{GM}{r} = \frac{1}{2}\upsilon_\infty^2 \;\Rightarrow \upsilon_\infty = \Delta\upsilon\sqrt{1+\frac{2\upsilon_f}{\Delta\upsilon}} \;\; cioè\; \upsilon_\infty > \Delta\upsilon\; !!!$$

… meglio se υ_f è grande, cioè, meglio se l'orbita di parcheggio è bassa

Le leggi della fisica sono favorevoli all'esplorazione planetaria (una volta riusciti ad andare in orbita attorno alla Terra!!!)

Orbite di trasferimento (alla Hohmann) (1)



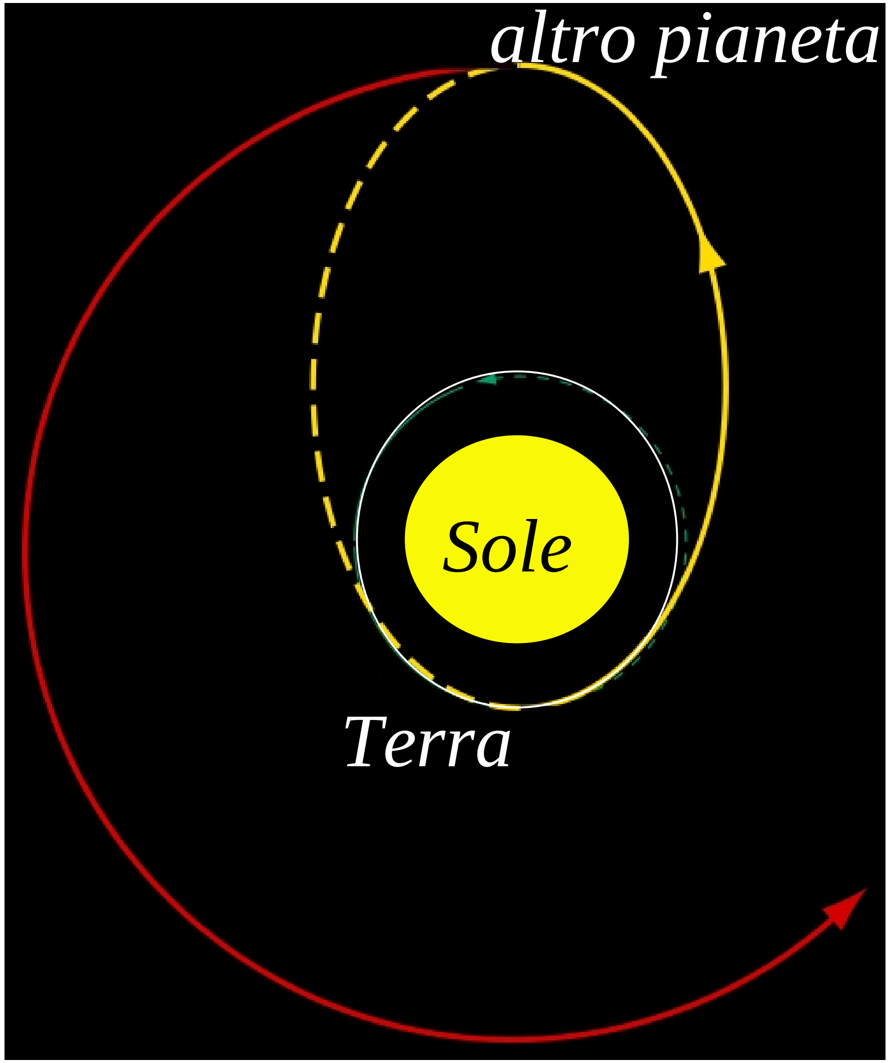
Da orbita bassa ad orbita alta attorno alla Terra, via un’orbita ellittica cotangente (es: per mettere in orbita un satellite geostazionario)

Occorrono 2 manovre: in A per dare un “delta v” che permetta di alzare l’apogeo fino a B, e in B per dare un altro “delta v” che permetta di non “ricadere” in A e mantenga il satellite sull’orbita circolare alta

I “delta v” necessari si calcolano usando le energie delle 3 orbite (che sono note dato il raggio dell’orbita di partenza e quello dell’orbita cui si vuole arrivare), e notando che siccome le manovre si fanno a posizione fissa, si cambia solo l’energia cinetica…

A parte queste 2 manovre, + quella iniziale per andare sull’orbita circolare bassa, per il resto fa tutto la Terra (+ le leggi della fisica…)

Orbite di trasferimento (alla Hohmann) (2)



In modo simile si calcola il “delta v” necessario per andare dalla Terra verso un altro pianeta nel campo del sole (sia esterno che interno…come decido?)

Attenzione: 1) Prima si restava attorno alla Terra, quindi le orbite erano tutte ellissi (o circonferenze). Ora per andare su un altro pianeta devo “sfuggire” dal campo della Terra, e sappiamo che ci vuole un’orbita iperbolica… ma qui ho disegnato una ellisse… dove si nasconde l’iperbole?

2) Quando la sonda entra nella sfera di influenza del pianeta target, rispetto ad esso e’ su orbiat iperbolica (è l’inverso di sfuggire..il segno del tempo non conta nelle equazioni del moto…)

3) I pianeti si muovono a velocita’ diverse, e bisogna fare in modo che quando la sonda arriva il pianeta target ci sia .. (ogni quanto tempo si puo’ partire?)

4) Se si vuole tornare, bisogna scegliere quando partire, per ritrovare la Terra all’arrivo…

Sembra difficile, ma basta il problema dei 2 corpi (attorno alla terra, attorno al sole, attorno al pianeta target… con opportuni raccordi…)

Il "magico" effetto fionda

Quando la sonda entra nella sfera di influenza del pianeta target (es Giove) è in orbita iperbolica attorno ad esso, e se la distanza al pericentro è piccola il pianeta cambia la direzione della velocità della sonda all'uscita della sua sfera di influenza di quasi 180 gradi. Se all'ingresso la sonda andava in verso opposto alla velocita' di Giove attorno al Sole, all'uscita andrà circa nello stesso verso, e quindi la sua velocita' rispetto al Sole sarà aumentata. Se questa è anche la direzione giusta per puntare verso Saturno, si e' guadagnato in tempo e risparmiato in razzi (che vuol dire massa, da portarsi dietro fin dalla superficie della Terra al lancio..)

Se poi al pericentro (che si cerca di avere il piu' vicino a Giove possibile) si spara anche un razzetto, si amplifica ancora di piu' questo effetto positivo … (perche' sparare il razzo al pericentro?)

Ma bisogna fare bene i conti…Proposto da Giuseppe Colombo alla NASA nel 1973 per i Mariner (e da allora usato in moltissime missioni spaziali..)

E la massa della sonda che ruolo ha?

Nel campo gravitazionale tutti i corpi “cadono” con la stessa accelerazione indipendentemente dalla loro massa e/o composizione **(Principio di Equivalenza),** quindi finche’ le forze in gioco sono solo gravitazionali la massa della sonda non conta…

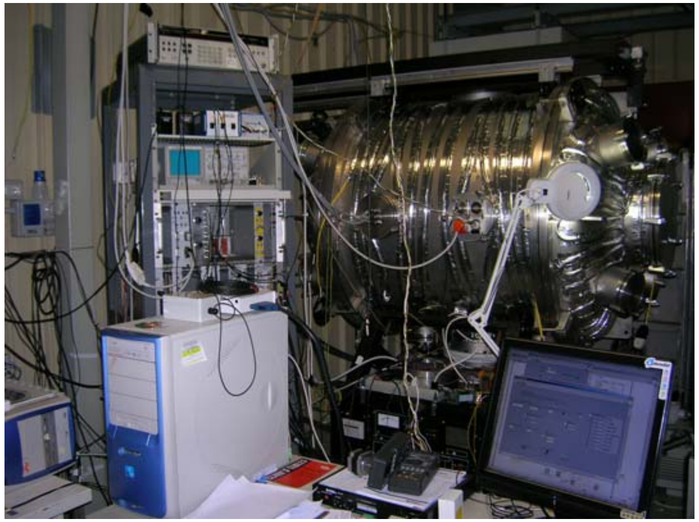
Questo NON è vero per le forze non gravitazionali, es. resistenza dell’atmosfera, pressione di radiazione solare, spinte termiche, spinte di razzi…

Allora l’accelerazione acquistata dalla sonda è, a parità della forza non gravitazionale ad essa applicata, inversamente proporzionale alla sua massa.., e lanciare sonde che pesano tonnellate e’ BEN DIVERSO dal lanciare un piccolo satellite…

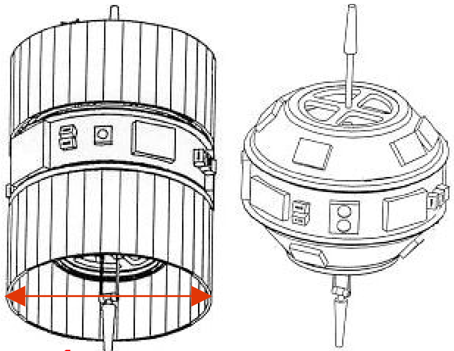
Nota: il **Principio di Equivalenza** è alla base della teoria della Relatività Generale, e per questo viene sottoposto a verifiche sperimentali sempre più precise.

Miglioramenti notevoli ci si aspettano proprio da esperimenti nello spazio..

Nel nostro piccolo ci proviamo anche noi (1)



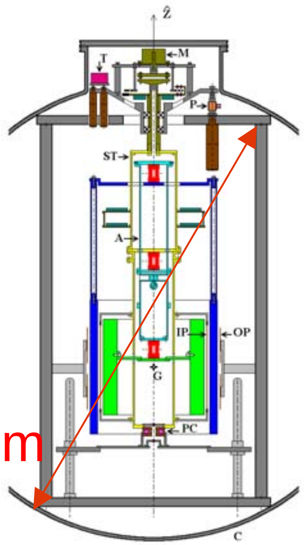
"Galileo Galilei – GG" satellite project



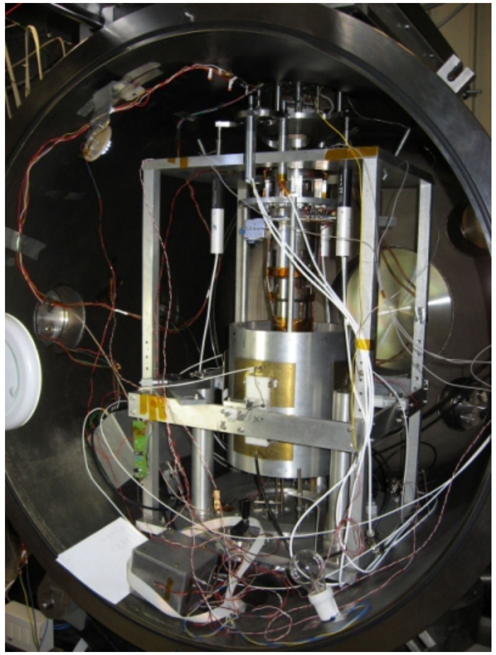
1 m

Target : 1 part in 10^{17}

Si mettono due cilindri concentrici e di diversa composizione dentro il piccolo satellite GG. Misurando i loro spostamenti relativi (che dovrebbero essere nulli secondo la gravitazione newtoniana e la Relatività Generale) si verifica se "cadono" allo stesso modo intorno alla Terra. Più piccoli sono gli spostamenti misurati, più sensibile è l'esperimento. Per ora abbiamo costruito un prototipo in laboratorio



1 m



Nel nostro piccolo ci proviamo anche noi (2)