

## STRUMENTAZIONE VOYAGER

- Strumenti per lo studio di campi, onde e particelle
- Strumenti di imaging e spettroscopia

ACCESO SPENTO PER RISPARMIO ENERGETICO DEGRADATO

### LOW GAIN ANTENNA (LGA)

È stata utilizzata per le comunicazioni solo quando la sonda era vicino alla Terra.

### HIGH GAIN ANTENNA (HGA)

Parabola riflettente di 3,7 m di diametro accoppiata ad un sub-riflettore che focalizza i segnali radio in banda X (7-11,2 GHz) o, in caso di necessità, in banda S (2.1-2.3 GHz).

### MAGNETOMETER

Il suo compito principale è quello di misurare le variazioni del campo magnetico solare in funzione della distanza e del tempo, determinare se ciascuno dei pianeti esterni possieda un campo magnetico e in che modo le lune e gli anelli di questi pianeti interagiscano con tali campi magnetici. I magnetometri sono montati su... etc

VOYAGER 1 ON OFF  
VOYAGER 2 ON OFF

### RADIOISOTOPE THERMOELECTRIC GENERATORS

Batterie nucleari alimentate da combustibile radioattivo (Plutonio-238)

### PLASMA WAVE SUBSYSTEM

Condivide con il Planetary Radio Astronomy le due lunghe antenne che si estendono ad angolo retto l'una rispetto all'altra, formando una "V". Rileva le onde radio e le oscillazioni del plasma circostante, in particolare, le variazioni di densità del plasma: è stato fondamentale per stabilire la transizione dal vento solare allo spazio interstellare.

VOYAGER 1 ON OFF  
VOYAGER 2 ON OFF

### PLANETARY RADIO ASTRONOMY

È progettato per misurare le emissioni radio provenienti dai pianeti giganti (Giove, Saturno, Urano e Nettuno) e dal mezzo interplanetario.

VOYAGER 1 ON OFF (2006)  
VOYAGER 2 ON OFF (2006)

### LOW ENERGY CHARGED PARTICLE

Utilizza due sistemi di rilevatori a stato solido che misurano velocità, direzione e numero di interazioni con particelle di energia superiore al Plasma Science. Si sovrappone parzialmente alle misure del Cosmic Ray Instrument.

VOYAGER 1 ON OFF (2025)  
VOYAGER 2 ON OFF (2025)

### ULTRAVIOLET SPECTROMETER

Sensibile alla luce ultravioletta, è in grado di individuare la presenza di elementi chimici e composti rilevati mediante il loro assorbimento della luce solare. È stato utilizzato per osservare le atmosfere planetarie e lo spazio interplanetario.

VOYAGER 1 ON OFF (2016)  
VOYAGER 2 ON OFF (1998)

### COSMIC RAY SUBSYSTEM

È uno strumento con elevata sensibilità che rileva il passaggio dei raggi cosmici, particelle ad altissima energia provenienti dai pianeti, dal Sole o dallo spazio interstellare.

VOYAGER 1 ON OFF (2025)  
VOYAGER 2 ON OFF (2025)

### PLASMA SCIENCE

Misura velocità, direzione, densità e temperatura del plasma.

VOYAGER 1 ON OFF  
VOYAGER 2 ON OFF (2024)

### IMAGING SCIENCE SUBSYSTEM

È composto da due telecamere (una a focale stretta e una a grandangolo) che producono immagini ad alta risoluzione nel visibile. Le immagini a colori sono ottenute sovrapponendo foto prese con filtri diversi.

VOYAGER 1 ON OFF (1990)  
VOYAGER 2 ON OFF (1989)

### PHOTOPOLARIMETER SUBSYSTEM

È progettato per studiare struttura e composizione delle atmosfere di Giove, Saturno, dei loro satelliti e degli anelli di Saturno misurando l'intensità e la polarizzazione della luce solare diffusa. È in grado di studiare i fulmini e l'attività aurorale dei pianeti che incontra.

VOYAGER 1 ON OFF (1980)  
VOYAGER 2 ON OFF (1991)

### INFRARED INTERFEROMETER SPECTROMETER AND RADIOMETER

Incorpora tre funzioni. Misura la temperatura di corpi e sostanze che osserva, rivelandone composizione chimica e struttura.

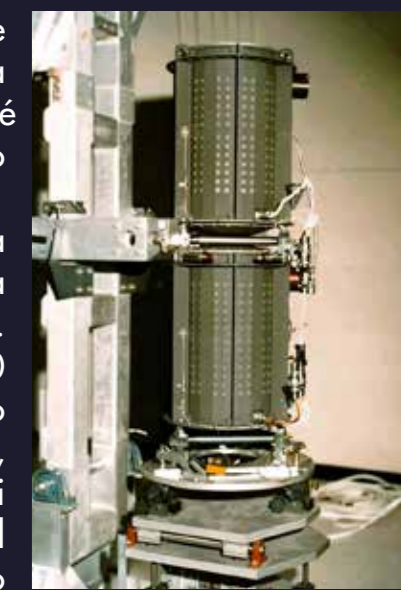
VOYAGER 1 ON OFF (1998)  
VOYAGER 2 ON OFF (2007)

### IL DISCO D'ORO

## Con quale energia?

Le sonde Voyager sono state lanciate nel 1977. Come fare per mantenere gli strumenti invita per tutta la durata prevista della missione? Non si possono usare pannelli solari, perché alle distanze a cui devono arrivare la luce del Sole è troppo debole.

L'energia deve essere fornita da una speciale "pila" interna alla sonda: le Voyager usano tre generatori di energia elettrica che sfruttano il decadimento radioattivo per produrre energia. Al momento del lancio ciascuna sonda generava circa 470 W di potenza elettrica, oggi meno di 150 W. Nel corso degli anni, per preservare quanta più energia possibile, alcuni strumenti sono stati spenti progressivamente e oggi sono ancora accesi solo gli strumenti scientifici essenziali e il sistema di comunicazione: entrambe le Voyager continuano a inviare dati.



Uno delle 3 batterie presenti su ciascuna sonda Voyager

# NATO PER ESPLORARE

## Qui Voyager...

Per comunicare a Terra i dati scientifici e la propria posizione, velocità e direzione, le sonde Voyager utilizzano una grande antenna ad alto guadagno (HGA). Più è grande la parabola dell'antenna, maggiore è la sua capacità di concentrare il segnale in una direzione precisa, così da essere ricevuta a Terra nonostante sia inviato da decine di miliardi di chilometri di distanza con una potenza di trasmissione ormai ridotta. Questa direzionalità richiede quindi che l'antenna sia sempre allineata verso la Terra. Il problema è reso ancora più complesso dal fatto che le sonde si muovono a velocità elevate (Voyager 1 viaggia a circa 61.200 km/h rispetto al Sole, mentre Voyager 2 a circa 55.570 km/h) e che le stazioni di ricezione ruotano insieme alla Terra. Per mantenere l'allineamento corretto le sonde utilizzano piccoli propulsori che eseguono periodiche micro-correzioni di assetto.



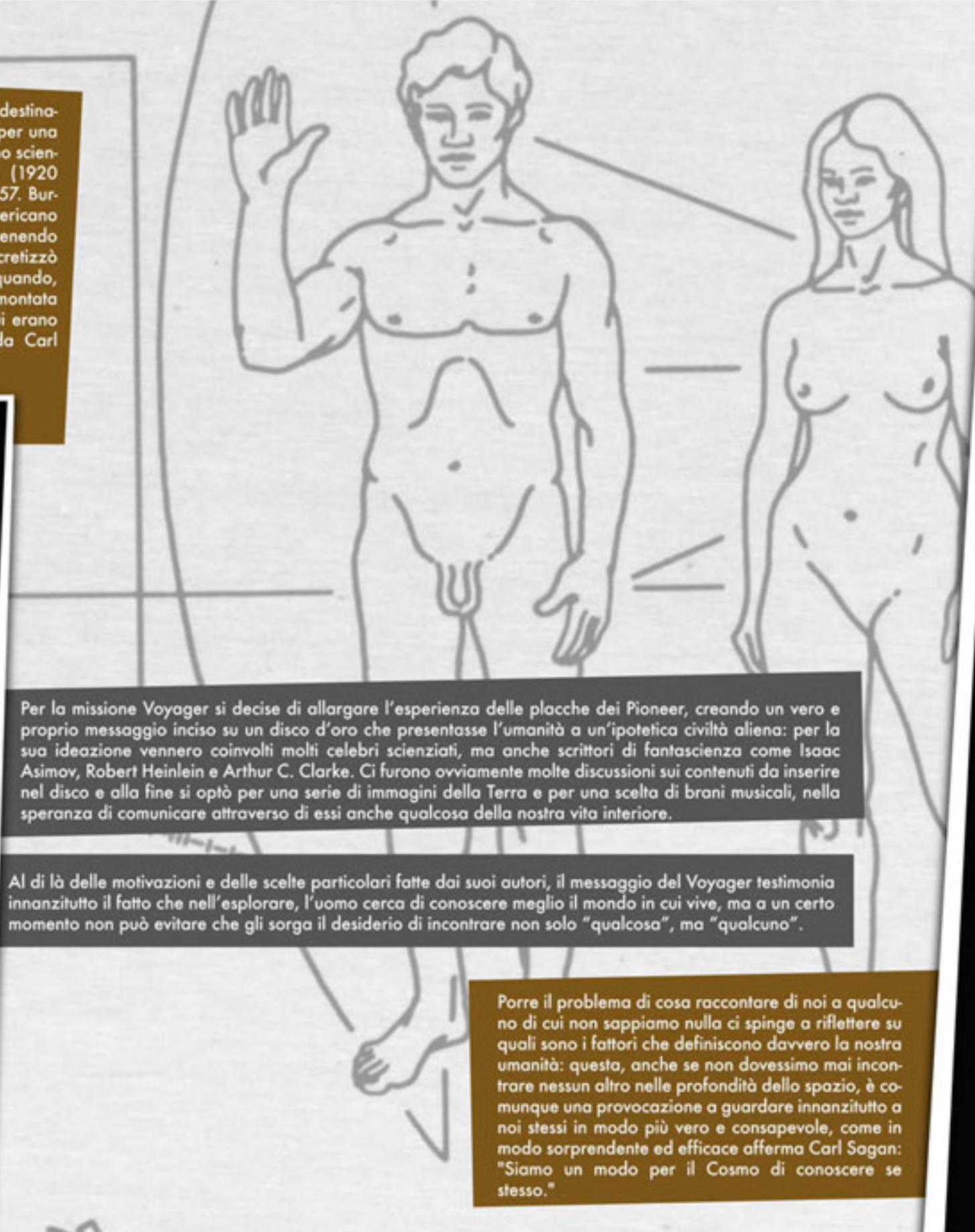
### Deep Space Network

Per comunicare con le sonde da Terra e seguirle si utilizza una combinazione di diverse antenne paraboliche ubicate in tre punti del pianeta: in Spagna, vicino a Madrid; in California, all'Osservatorio Goldstone, nel deserto del Mojave; in Australia, vicino a Canberra. In ognuno di questi luoghi ha sede un complesso di almeno quattro ricevitori spaziali, equipaggiati con sistemi di ricevimento ultrasensibili e 4 grandi antenne paraboliche, da 24 fino a 70 metri di diametro.

CENTAUR STA 2489.6  
JPL STA 304.5

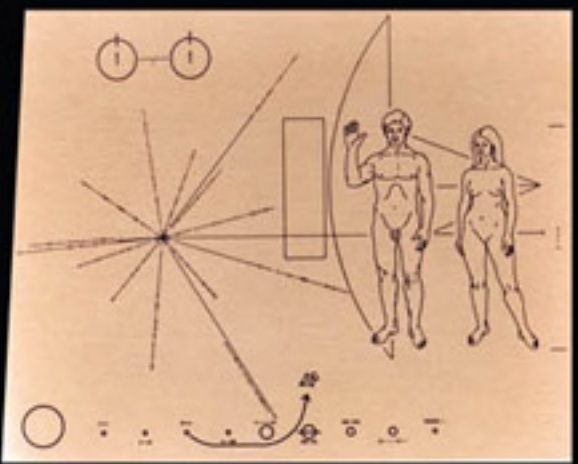
# VOYAGER GOLDEN RECORD

Il primo a ipotizzare l'idea di porre su una sonda destinata allo spazio profondo una "cartolina cosmica" per una intelligenza aliena da parte dell'umanità non fu uno scienziato, ma un giornalista inglese, Eric Burgess (1920-2005), che seguiva le missioni Pioneer fin dal 1957. Burgess propose la sua ipotesi al noto astrofisico americano Carl Sagan (1934-1996), che aderì entusiasta, divenendo uno dei promotori principali dell'idea, che si concretizzò per la prima volta nel 1972 e si ripeté nel 1973, quando, su ognuna delle sonde Pioneer 10 e 11, venne montata una placca rettangolare di alluminio dorato su cui erano incise figure molto simili, ideate e realizzate da Carl Sagan, Linda Salzman Sagan e Frank Drake.



“Un miliardo di anni da oggi, quando ogni cosa sulla Terra che abbiamo mai fatto sarà striciolata in polvere, quando i continenti saranno cambiati irrisconoscibilmente e la nostra specie sarà incredibilmente alterata o estinta, i record dei Voyager continueranno a parlare per noi”

Carl Sagan



In piano d'oro della Pioneer 11 e 12



© Golden Record

## COME LEGGERE IL DISCO

Semplice rappresentazione del fonografo e della punta: è posizionata all'inizio del disco per una corretta riproduzione. Intorno vi è inciso in codice binario il tempo di rotazione corretto, prendendo come unità di riferimento il tempo associato alla transizione fondamentale dell'atomo di idrogeno.

## COME RICOSTRUIRE LE IMMAGINI/1

In codice binario è indicata la durata del segnale relativo a ogni singola immagine.

## COME RICOSTRUIRE LE IMMAGINI/2

Viene rappresentato il numero totale di linee verticali che andranno a formare ogni immagine.

## COME RICOSTRUIRE LE IMMAGINI/3

Rappresentazione della prima immagine come verifica della corretta riproduzione del disco.

## UNITÀ DI TEMPO

Atomo di idrogeno nei suoi livelli meno energetici: il tempo di transizione tra questi due stati è preso come unità di tempo fondamentale per la riproduzione del disco.

## MAPPA STELLARE

Rappresenta la posizione del Sistema Solare, facendo riferimento a 14 pulsar i cui periodi di rotazione sono indicati in codice binario lungo le rette congiungenti il Sole a ogni stella.

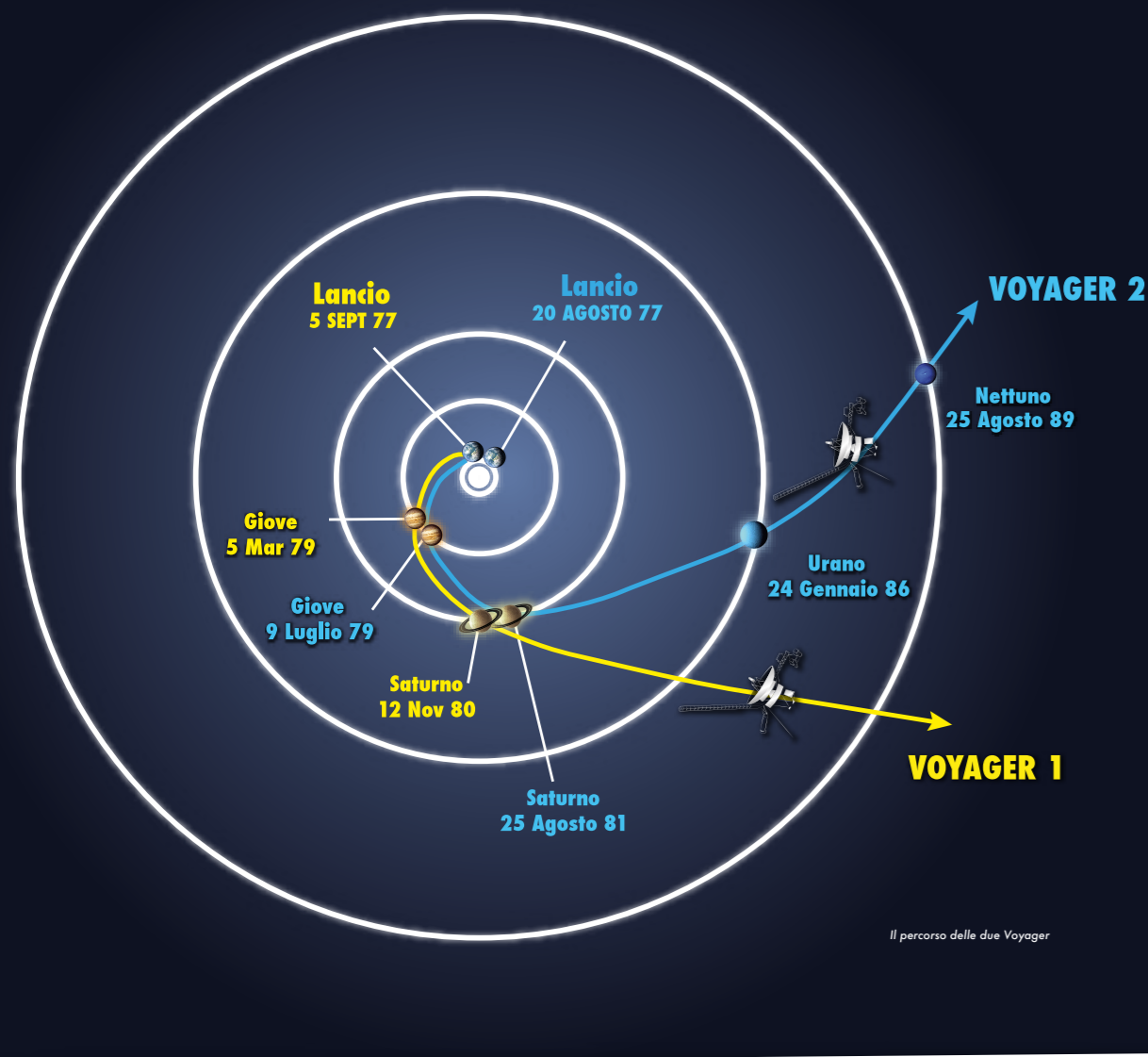
Per la missione Voyager si decise di allargare l'esperienza delle placche dei Pioneer, creando un vero e proprio messaggio inciso su un disco d'oro che presentasse l'umanità a un'ipotetica civiltà aliena: per la sua ideazione vennero coinvolti molti celebri scienziati, ma anche scrittori di fantascienza come Isaac Asimov, Robert Heinlein e Arthur C. Clarke. Ci furono ovviamente molte discussioni sui contenuti da inserire nel disco e alla fine si optò per una serie di immagini della Terra e per una scelta di brani musicali, nella speranza di comunicare attraverso di essi anche qualcosa della nostra vita interiore.

Al di là delle motivazioni e delle scelte particolari fatte dai suoi autori, il messaggio del Voyager testimonia innanzitutto il fatto che nell'esplorare, l'uomo cerca di conoscere meglio il mondo in cui vive, ma a un certo momento non può evitare che gli sorga il desiderio di incontrare non solo "qualcosa", ma "qualcuno".

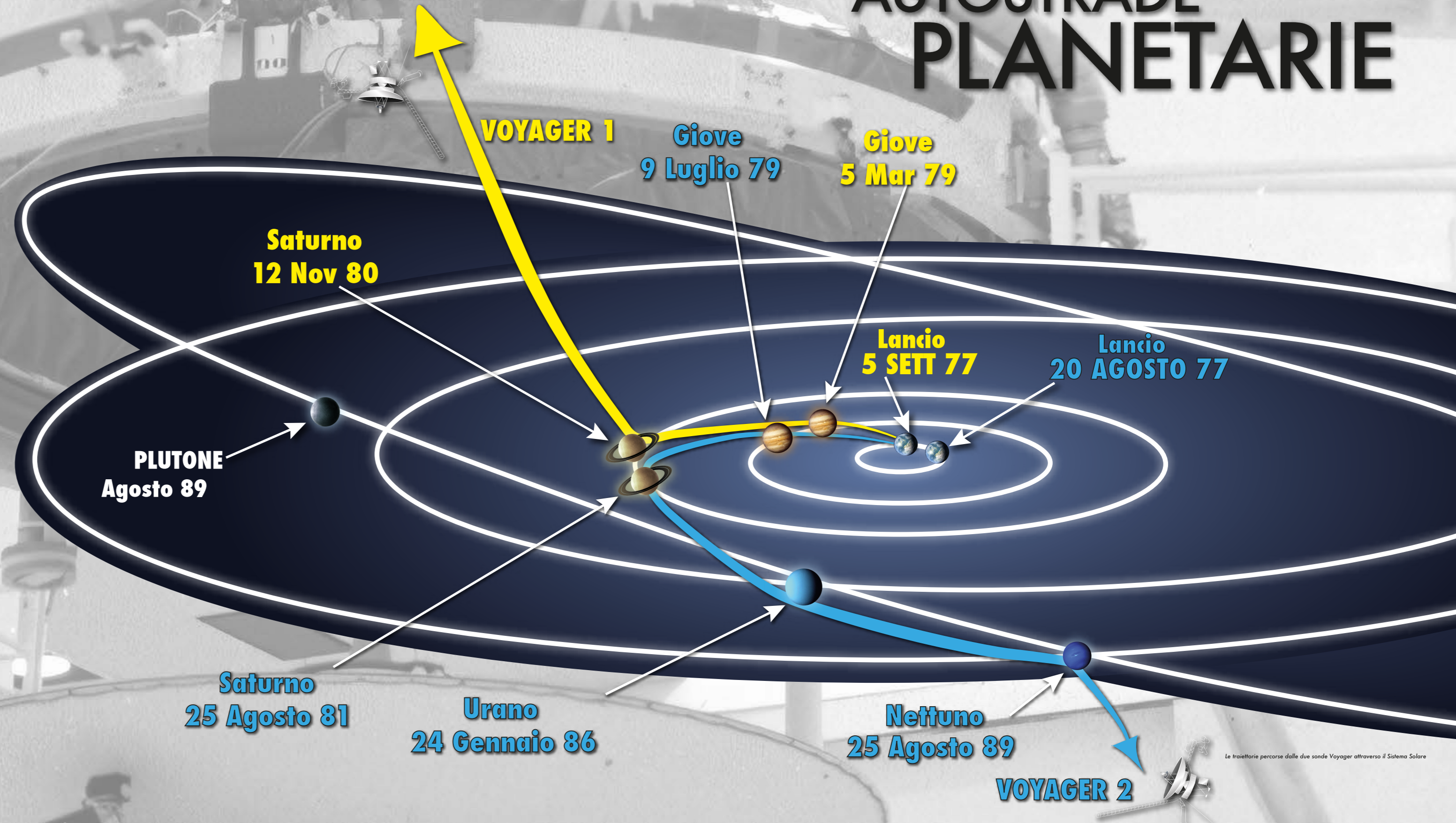
Porre il problema di cosa raccontare di noi a qualcuno di cui non sappiamo nulla ci spinge a riflettere su quali sono i fattori che definiscono davvero la nostra umanità: questa, anche se non dovessimo mai incontrare nessun altro nelle profondità dello spazio, è comunque una provocazione a guardare innanzitutto a noi stessi in modo più vero e consapevole, come in modo sorprendente ed efficace afferma Carl Sagan: "Siamo un modo per il Cosmo di conoscere se stesso."

La riproduzione del Golden Record con le istruzioni per accedere alle registrazioni

# AUTOSTRADE PLANETARIE



Fin dall'inizio della scienza missilistica, sappiamo che raggiungere le distanze enormi dei pianeti esterni e arrivare oltre i confini del Sistema Solare è impossibile con i propulsori a bordo, se non in tempi lunghissimi, per effetto del principale polo di attrazione gravitazionale del nostro Sistema planetario: il Sole. Per vincere questo "freno" gravitazionale, si usa un particolare accorgimento, chiamato Gravity Assist (o "fionda gravitazionale"): dopo la fase di lancio e l'allontanamento dall'orbita Terrestre, la sonda può incontrare gli altri pianeti e ricevere una spinta grazie al loro movimento, aumentando la sua velocità fino a superare la velocità di fuga del sistema solare, pari a circa 42 km/s.



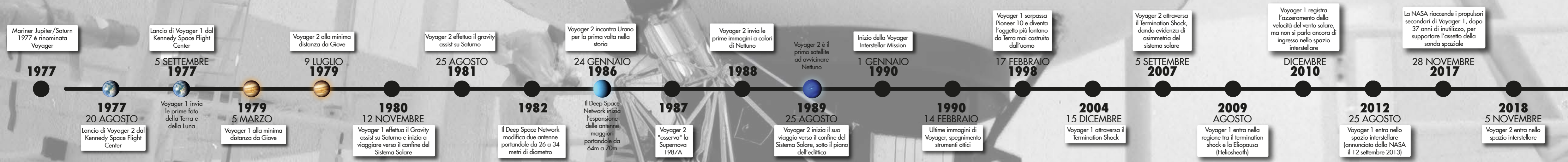
Conoscendo le configurazioni dei pianeti nel tempo, si può arrivare nei punti di interesse in tempi utili, grazie all'individuazione di percorsi vantaggiosi che permettano di sfruttare la fionda gravitazionale più volte. Si progetta perciò di percorrere vere e proprie "autostrade", che si rendono disponibili per periodi limitati nel Sistema Solare.

La "finestra" temporale sfruttata dalla missione Voyager nel 1977 aveva una durata di pochi mesi. Grazie a quella particolare disposizione planetaria le sonde Voyager sono potute arrivare ai confini del Sistema Solare. Un'analogia disposizione si riprodurrà solo nel 2152 (175 anni dopo il lancio).

Per correggere la direzione sono utilizzati dei piccoli motori montati sulla sonda, che servono anche per garantire il corretto puntamento degli strumenti di bordo nelle fasi di utilizzo, soprattutto quello della grande antenna.

«La domanda che ci assilla è di dove proveniamo e dove andiamo, tutto quello che possiamo osservare da noi stessi è ciò che ci circonda attualmente. È per questo che abbiamo l'ansia di scoprire su di esso quanto più possiamo. Questa è scienza, l'apprendere, il conoscere, questa è la vera sorgente di ogni impresa spirituale umana.»

Erwin Schrödinger, Che cos'è la vita? (Scienza e Umanesimo)



Oggi la sola fionda gravitazionale non è più l'unico strumento a disposizione. Le nuove missioni interplanetarie e interstellari la combinano con la propulsione continua fornita da motori ionici a bassa spinta che funzionano accelerando particelle elettricamente cariche (ioni): offrono un'accelerazione costante per lunghi periodi, cambiando radicalmente il concetto di "slancio iniziale".

Sono già stati utilizzati usati da sonde come Dawn (2007-2018, destinazione Vesta e Cerere), BepiColombo (2018-, destinazione Mercurio) e Psyche (2023-, destinazione l'asteroide 16 Psyche situato nella fascia tra Marte e Giove).

In parallelo, si stanno sperimentando sistemi più audaci come le vele solari, che sfruttano la pressione della luce solare, e i futuri motori nucleari termici ed elettrici, pensati per le missioni del prossimo secolo, come la proposta Interstellar Probe della NASA, che punta a spingersi oltre le 100 Unità Astronomiche.

Anche la navigazione è cambiata: i piccoli propulsori montati sulle sonde, oggi gestiti da sistemi autonomi, permettono correzioni di rotta millimetriche, fondamentali per mantenere la sonda allineata con gli strumenti e le antenne direzionali, come le HGA (High Gain Antenna).

Tutto ciò, combinato con tecnologie intelligenti, sta davvero aprendo la strada verso l'esplorazione oltre i confini del Sistema Solare, alla scoperta del mezzo interstellare.



Resultant  
outbound  
velocity

Velocità  
risultante di  
uscita

Planet's  
velocity  
relative to  
the Sun

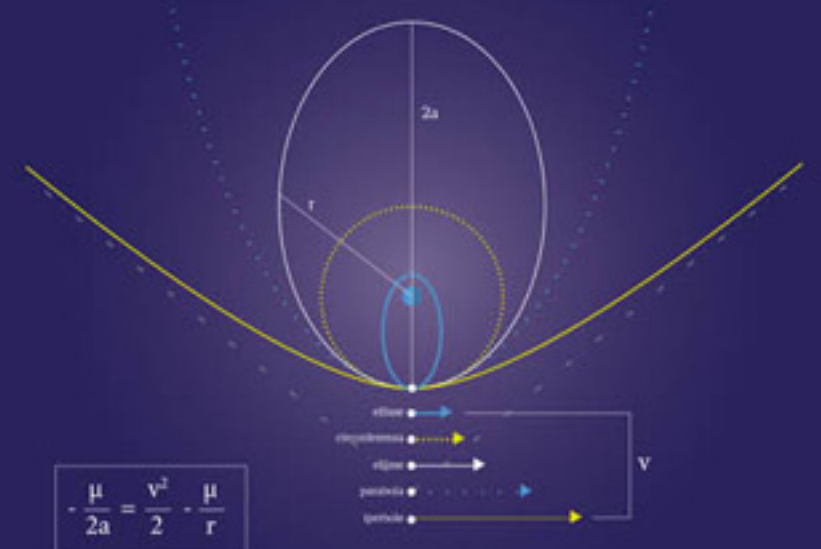
Velocità del  
pianeta  
relativa al  
sole

Resultant  
inbound  
velocity

Velocità  
risultante di  
entrata

$$V_{out} > V_{in}$$

Dal punto di vista del pianeta la sonda ha la velocità rappresentata dalla freccia nera: la traiettoria è iperbolica, la sonda viene accelerata e poi rallentata, ma a pari distanza dal pianeta la velocità ha cambiato la direzione ma non il modulo. Ma dal punto di vista "assoluto" (quello del Sole) alla velocità rispetto al pianeta (freccia nera) si somma la velocità del pianeta stesso (freccia rossa) dando la velocità "assoluta" (freccia blu). Attraendo la sonda il pianeta le trasmette le sua velocità: la velocità "assoluta" cambia sia direzione sia modulo.



$$\frac{\mu}{2a} = \frac{v^2}{2} - \frac{\mu}{r}$$

Le linee curve nel grafico sono delle possibili traiettorie orbitali. Esse sono delle coniche: circonferenza, ellisse, parabola, iperbole. Tutte hanno come fuoco la terra (cerchio azzurro). Più un'orbita è grande più richiede energia per percorrerla. Più è alta l'energia, maggiore è la velocità (vedi frecce).

Secondo la legge della gravità di Newton, due corpi, di masse  $m_1$  e  $m_2$ , si attraggono con una forza  $F$  che diminuisce con il quadrato della distanza  $d$ :

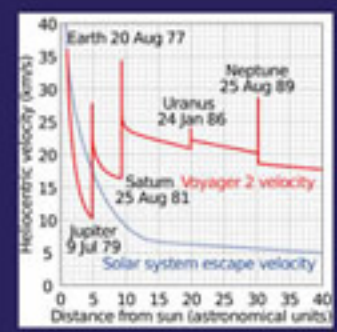
$$F = G \frac{m_1 m_2}{d^2}$$

Ogni sonda, come ogni pianeta, è attratta dal Sole e da tutti gli altri pianeti. Ma quando si avvicina a un pianeta la forza aumenta rapidamente: riducendo la distanza alla metà, o a un quarto, la forza diventa 4 o 16 volte più intensa. Attorno a ogni pianeta c'è una "sfera di influenza", entro cui l'attrazione verso quel pianeta domina su tutte le altre, compresa quella del Sole. All'interno della sfera di influenza una sonda si muove quasi come se esistesse solo quel pianeta.

Una sonda rimane nella sfera di influenza, percorrendo un'orbita ellittica o circolare, cioè una traiettoria chiusa, quando la sua velocità è inferiore alla "velocità di fuga": non è sufficiente a sfuggire all'attrazione del pianeta. Percorre invece una traiettoria aperta, a forma di iperbole, se la velocità è superiore alla "velocità di fuga".

Per mettere in orbita una sonda occorre portarla fuori dall'atmosfera e a una velocità elevata, ma inferiore alla "velocità di fuga". Per inviarla verso Marte la si porta in una "orbita di parcheggio", per poi accelerarla ulteriormente fino a superare la "velocità di fuga". Così la sonda esce dalla sfera di influenza della Terra, e segue una traiettoria ellittica attorno al Sole, progettata affinché intersechi l'orbita di Marte.

Avvicinandosi a Marte la sonda viene attratta, guadagna velocità, e girerebbe attorno al pianeta cambiando direzione, come girando attorno a una boa, per riallontanarsi con una traiettoria iperbolica. La gravità la accelera e poi la rallenterebbe, come per un ciclista che guadagna velocità su una discesa e risale sulla successiva salita sfruttando lo slancio. Ma la gravità non impedirebbe alla sonda di riallontanarsi indefinitamente. Affinché sia catturata dalla "sfera di influenza" di Marte, portandosi su un'orbita ellittica, è necessario frenarla, utilizzando ancora il razzo, e portare la sua velocità al di sotto della "velocità di fuga" da Marte.



La velocità della sonda Voyager nel suo viaggio: con la sola spinta del razzo la velocità era scesa al di sotto della velocità di fuga del Sole, e i pianeti esterni sarebbero rimasti irraggiungibili. Sono stati raggiunti solo grazie al ripetuto sfruttamento della "fionda gravitazionale".

# UNA FIONDA... SPAZIALE!

“Ho imparato a usare la parola "impossibile" con la più grande cautela”

Wernher von Braun

Se invece la sonda non viene frenata, gira attorno a Marte e si riallontana. In questo modo potrebbe venire diretta verso i pianeti più lontani ma, se il pianeta fosse fermo, con scarsa efficacia. L'effetto della gravità sarebbe simile a quello del rimbalzo di una pallina da ping pong sul tavolo: cambia direzione, ma non guadagna né perde velocità.

Invece i pianeti orbitano attorno al Sole a velocità elevate (quella della Terra è di circa 30 km/s). Per la sonda, una traiettoria iperbolica attorno al pianeta in movimento ha un effetto simile al rimbalzo della pallina non sul tavolo fermo, ma sulla racchetta, che le trasmette la sua spinta. La gravità, attirando la sonda, le trasmette la velocità del pianeta, che può sommarsi o sottrarsi a quella della sonda, così come, con la racchetta, è possibile 'schiacciare' oppure smorzare la pallina.

Con questa manovra, chiamata "gravity assist" o "fionda gravitazionale", la velocità di una sonda viene aumentata o diminuita senza accendere il razzo, ma sfruttando l'energia del moto del pianeta, che ha una massa enormemente più grande.

I pianeti esterni sono raggiungibili solo approfittando di posizioni favorevoli di Marte, o Giove o Saturno, e utilizzando traiettorie che incontrino più pianeti, sfruttando più volte la "fionda gravitazionale".

Il calcolo esatto delle traiettorie è complesso, perché solo approssimativamente la sonda si muove dapprima "come se ci fosse solo la Terra", e poi "come se ci fosse solo il Sole"; in realtà subisce sempre l'attrazione, pur debole, dei pianeti vicini, e risente di perturbazioni dovute alla non uniformità della massa del pianeta nella cui sfera di influenza si trova, e alla pressione del vento solare.