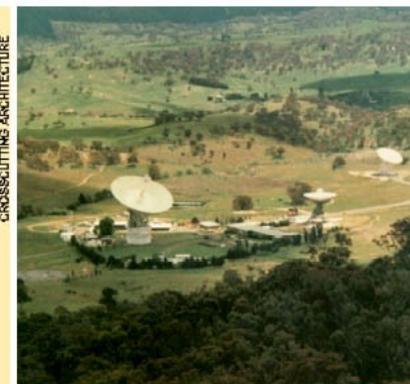
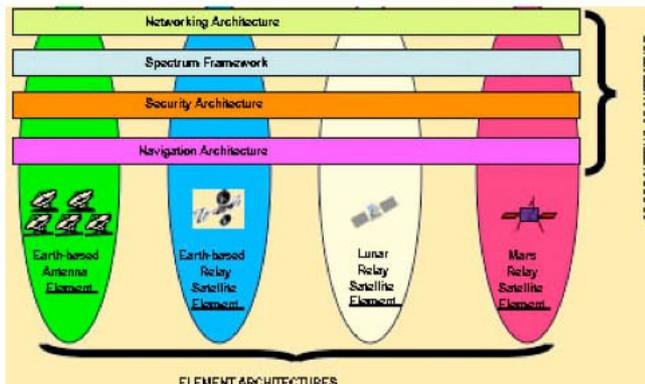
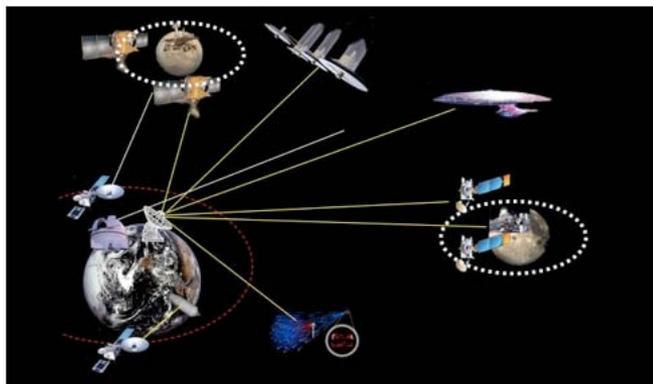
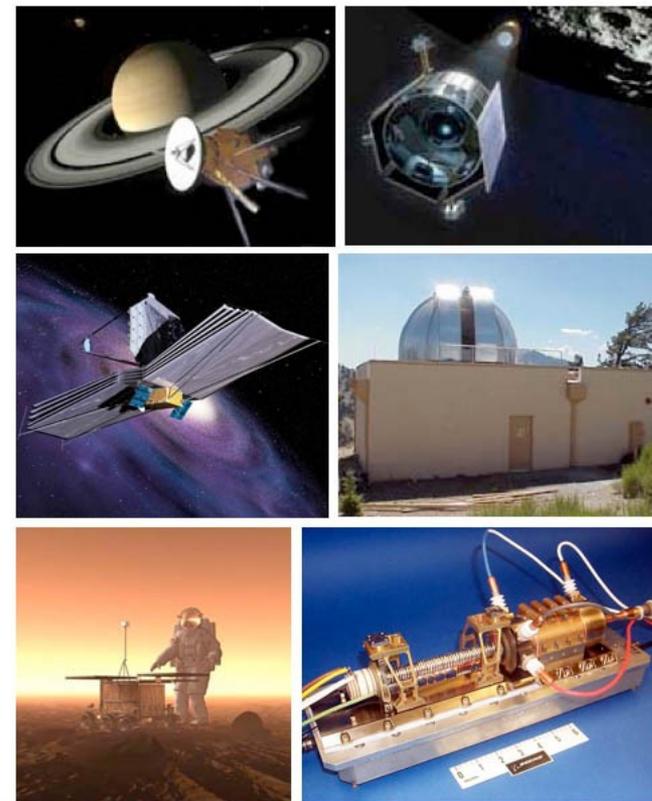




Comunicaciones de espacio lejano*

Farzin Manshadi
Gestor del espectro, JPL
20-21 de septiembre de 2012

* Basado en material proporcionado por el Dr. Les Deutsch





Comunicaciones de espacio lejano

Introducción

- **La UIT define el espacio lejano como el volumen del espacio situado a una distancia de la Tierra igual o mayor de 2×10^6 km**
- **Los vehículos espaciales del espacio lejano deben viajar decenas de miles de millones de km desde la Tierra para alcanzar el objeto más próximo en el espacio lejano**
- **La masa y la potencia del vehículo espacial son parámetros críticos**
- **Se necesitan grandes antenas en tierra y transmisores de muy alta potencia para compensar las enormes pérdidas en el espacio y las pequeñas antenas y transmisores de baja potencia que utiliza el vehículo espacial**
- **La navegación es compleja y muy dependiente de las mediciones efectuadas desde la Tierra**
- **Cada una de las misiones de espacio lejano es única y, por tanto, su desarrollo es muy costoso**



Comunicaciones de espacio lejano

La masa y la potencia del vehículo espacial son parámetros críticos

- Las misiones del espacio lejano deben superar la gravedad de la Tierra, lo cual es muy difícil
 - Un vehículo Atlas V 551 puede impulsar 19 000 kgs hasta una órbita terrestre baja pero sólo unos 500 kgs hasta el espacio lejano
- La generación de energía es muy difícil en un vehículo espacial que se encuentra a gran distancia del Sol
 - El flujo solar se reduce por un factor de cuatro cada vez que se duplica la distancia al Sol, de manera que un panel solar en Júpiter puede generar únicamente una milmillonésima de la potencia que generaría en la Tierra
 - Los generadores de energía nuclear son muy costosos y políticamente sensibles



Comunicaciones de espacio lejano

La masa y la potencia de un vehículo espacial tienen una importancia fundamental

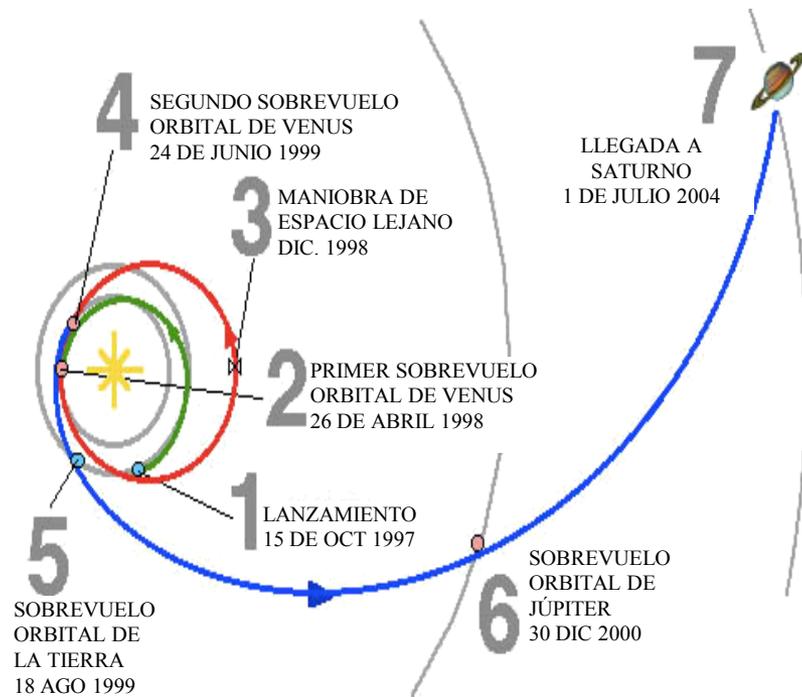
- Los vehículos espaciales de espacio lejano se asemejan a antenas gigantes con instrumentos adosados
 - No pueden generar grandes potencias
 - Los transmisores generalmente producen unas decenas de Watios
- Las trayectorias se optimizan para reducir al mínimo el consumo de combustible
 - Las demandas de la navegación son extremas
 - Pueden producirse muchos acontecimientos críticos
 - Un pequeño error puede dar al traste con la misión





Comunicaciones de espacio lejano

La masa y la potencia de un vehículo espacial son parámetros críticos - Ejemplo del Cassini



Trayectoria de “crucero” del Cassini:

- Múltiples “rebotes gravitacionales” para ahorrar combustible



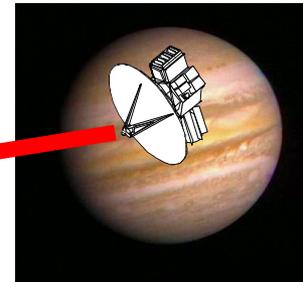
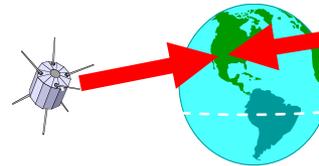
Comunicaciones de espacio lejano

El vehículo espacial viaja grandes distancias desde la Tierra

- El rendimiento de las comunicaciones es inversamente proporcional a la distancia al cuadrado
- Las antenas en tierra de espacio lejano tienen un gran tamaño
- El sistema no puede desperdiciar ningún dB
- El vehículo espacial debe ser autónomo

Dificultades en el establecimiento de las telecomunicaciones

$$\text{Rendimiento} \sim 1/\text{distancia}^2$$



Dificultad relativa

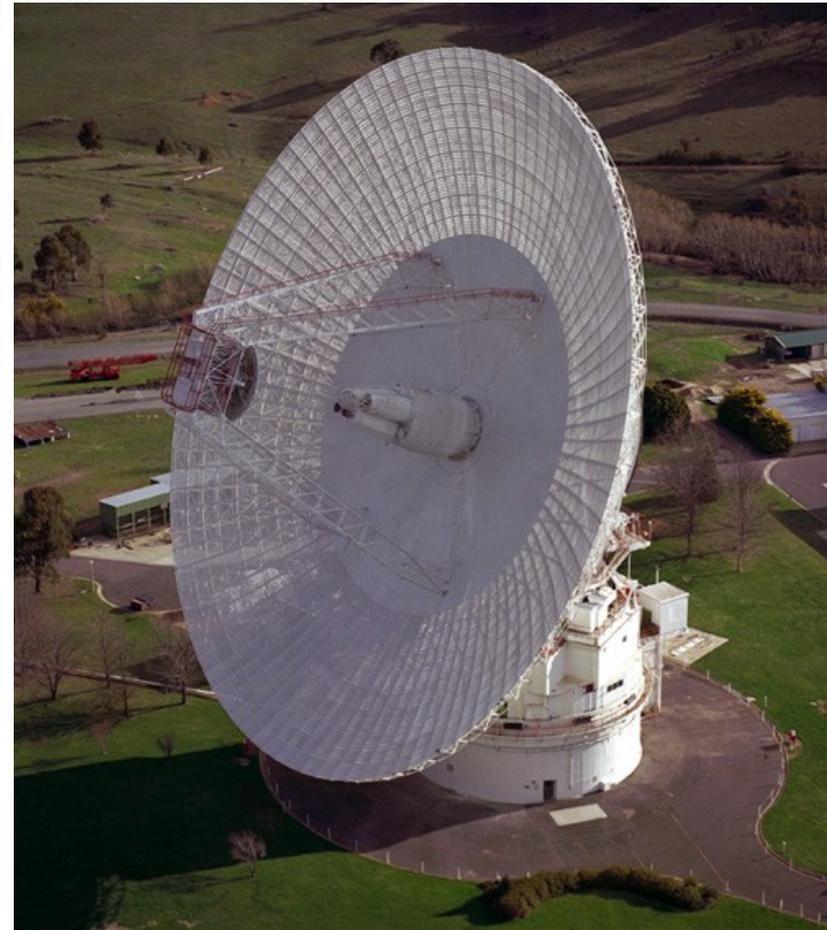
<i>Lugar</i>	<i>Distancia</i>	<i>Dificultad</i>
<i>Tierra</i>	$4 \times 10^4 \text{ km}$	<i>Línea de base</i>
<i>Luna</i>	$4 \times 10^5 \text{ km}$	100
<i>Marte</i>	$3 \times 10^8 \text{ km}$	5.6×10^7
<i>Júpiter</i>	$8 \times 10^8 \text{ km}$	4.0×10^8
<i>Plutón</i>	$5 \times 10^9 \text{ km}$	1.6×10^{10}



Comunicaciones de espacio lejano

El vehículo espacial debe viajar a grandes distancias desde la Tierra Consecuencias

- **Se necesitan antenas en tierra de gran tamaño para compensar las pérdidas en el espacio**
- **Ejemplo: Antenas de la red del espacio lejano de la NASA de 70 m de diámetro**
 - **Son las mayores antenas de comunicaciones orientables del mundo**
 - **Cada una tiene un transmisor de 20 kW para comunicarse con el vehículo espacial en el espacio lejano**

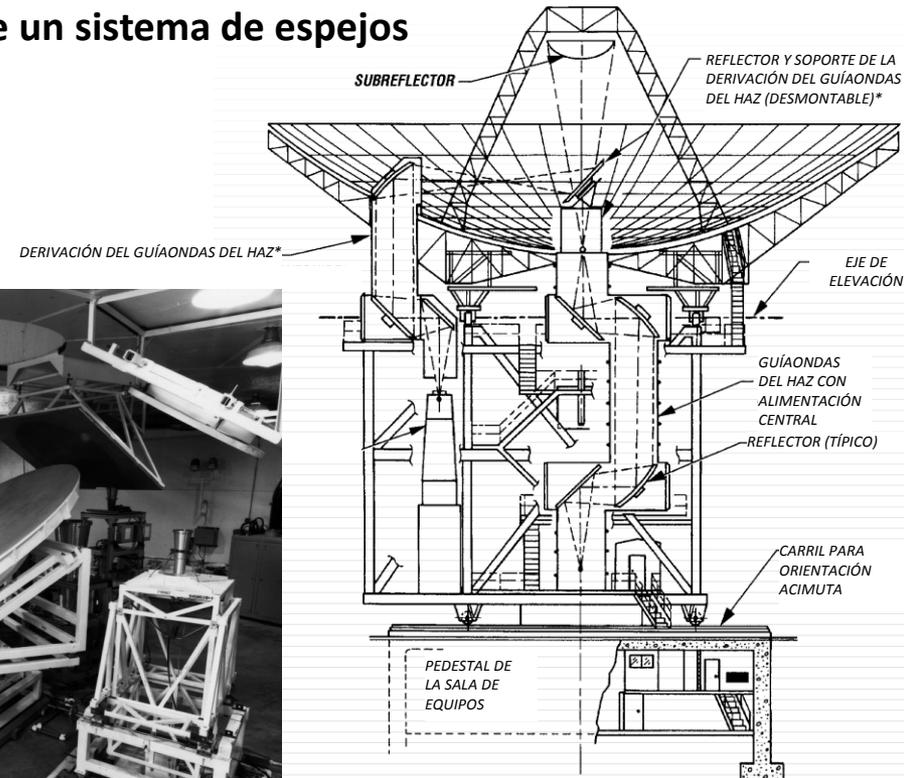




Comunicaciones de espacio lejano

Otros diseños de antena para comunicaciones de espacio lejano

- La antena de guíaondas del haz de la clase de 34 m es hoy en día la que está normalizada para las comunicaciones de espacio lejano
 - Dispositivos electrónicos en un entorno del laboratorio situado en el sótano
 - La señal que transmite o recibe a través de un sistema de espejos
 - Fácil de actualizar
 - Fácil de mantener
 - Funcionamiento más seguro





Las comunicaciones de espacio lejano deben ser muy eficaces

- **No puede desperdiciarse ni una fracción de dB de rendimiento**
- **Las misiones de espacio lejano funcionan cerca del límite de eficiencia teórico de las comunicaciones (con un margen de 1 dB normalmente)**
- **Ejemplo: Si un vehículo espacial diseñado para funcionar con una antena de 70 m pierde 1 dB de rendimiento se necesitaría una antena adicional de 32 m para compensar la diferencia**
 - **Coste de tres antenas de 32 m = 100 millones USD aproximadamente**



El vehículo espacial de espacio lejano debe ser autónomo

- **La transmisión de las señales entre el vehículo de espacio lejano y la Tierra puede llevar entre algunos minutos y varias horas**
- **Las decisiones deben tomarse a menudo en tiempos más reducidos, lo que exige la autonomía del vehículo espacial**
- **El vehículo espacial normalmente se “secuencia”, lo que significa que está programado para funcionar durante largos periodos de tiempo sin necesidad de recibir instrucciones desde la Tierra**
- **El vehículo espacial gestiona los datos que adquiere almacenándolos hasta su retransmisión a la Tierra**
- **Las emergencias requieren unos algoritmos especiales de seguridad**

Comunicaciones de espacio lejano

La navegación es compleja y depende en gran medida de la Tierra

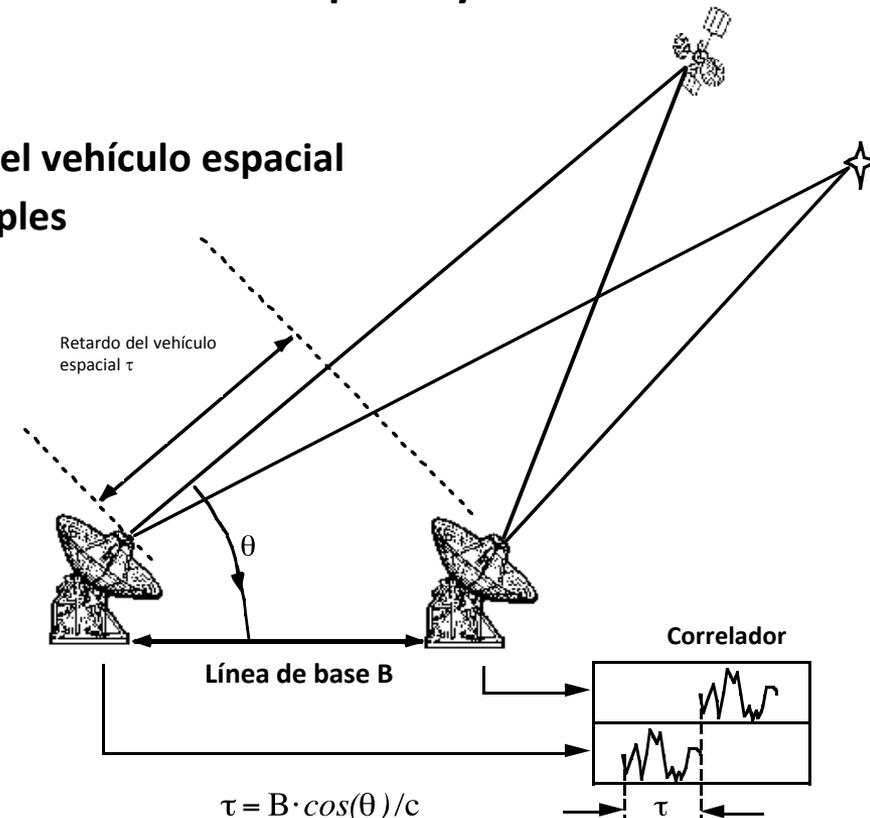
- Mediciones precisas de las señales radioeléctricas utilizadas para ayudar a la navegación del vehículo espacial

- Medición de la distancia al vehículo espacial
- Doppler: Medición del movimiento relativo del vehículo espacial
- Técnicas de interferometría: Utilizando múltiples antenas en tierra para medir con precisión el ángulo del vehículo espacial en el cielo

- Además de la órbita GPS estos valores constituyen la mejor fuente de datos para la navegación

- Normalmente aumentados por los sensores a bordo del vehículo espacial

- Giroscopos
- Sensores de estrellas y del Sol
- Fotografías tomadas por el vehículo espacial de objetivos contra un fondo estelar



Técnica interferométrica, Δ DOR: medición de la distancia unidireccional con diferenciación Delta



Comunicaciones de espacio lejano

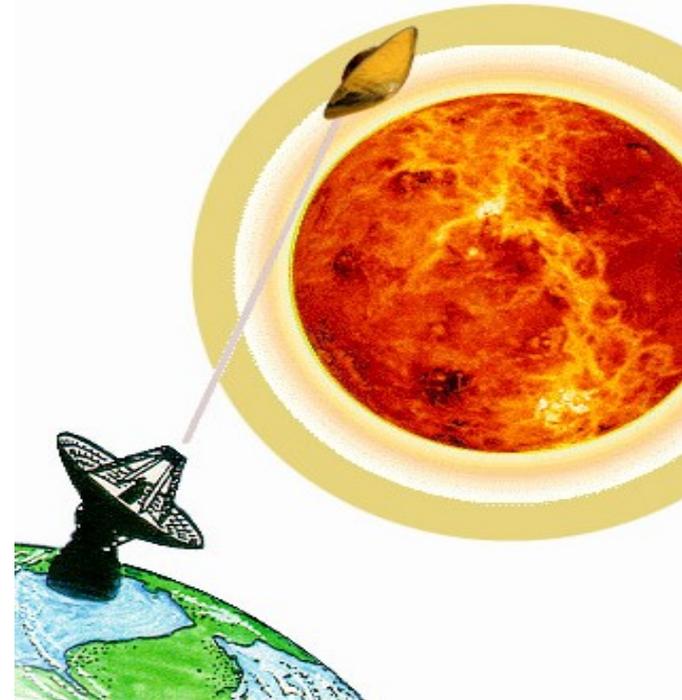
Cada misión de espacio lejano es única

- **Existen miles de objetivos en el espacio lejano: planetas, lunas, asteroides, cometas y espacios de emplazamiento de observatorios astronómicos, cada uno de ellos con su propio**
 - **Conjunto de cuestiones científicas**
 - **Retos de trayectoria única**
 - **Bus, instrumentos y propulsión del vehículo espacial únicos**
- **Incluso los objetivos más populares (por ejemplo Marte) se visitan sólo una vez cada pocos años con diferentes vehículos espaciales**
- **Las comunicaciones y la navegación pueden ser distintas en cada misión**
 - **A menudo requieren estudios especiales para optimizar el rendimiento y maximizar las posibilidades de éxito**
- **Con frecuencia se aplican nuevas tecnologías tanto en los vehículos espaciales como en las redes en tierra, creando algo nuevo en cada misión**



La ciencia de las radiocomunicaciones

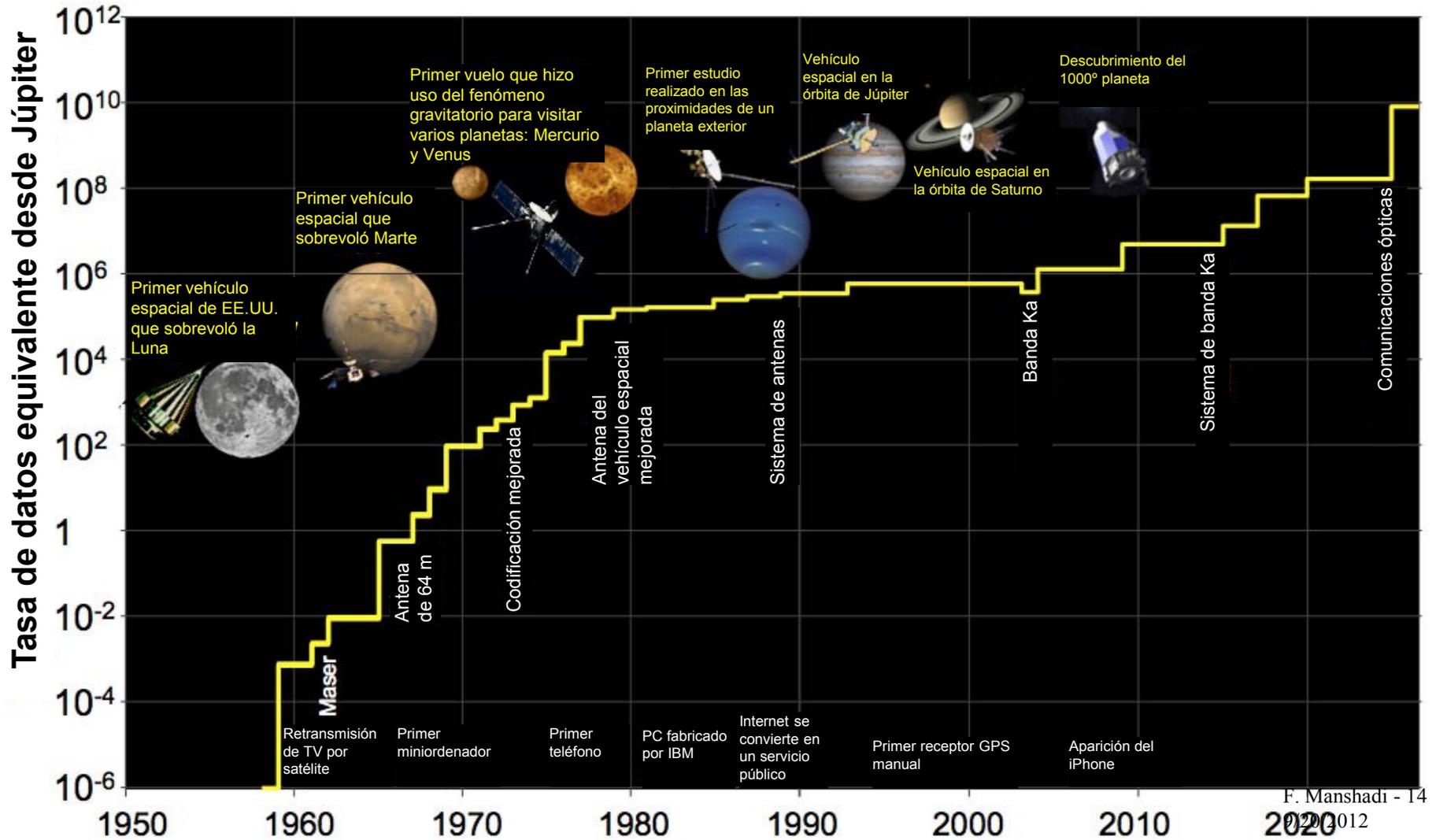
- El seguimiento de los vehículos espaciales antes de llegar a su objetivo o tras sobrepasarlo produce importantes resultados científicos
- Dinámica de la atmósfera
 - Circulación
 - Estructura vertical
 - Turbulencia
- Densidad atmosférica
- Mapa del campo gravitatorio





Comunicaciones de espacio lejano

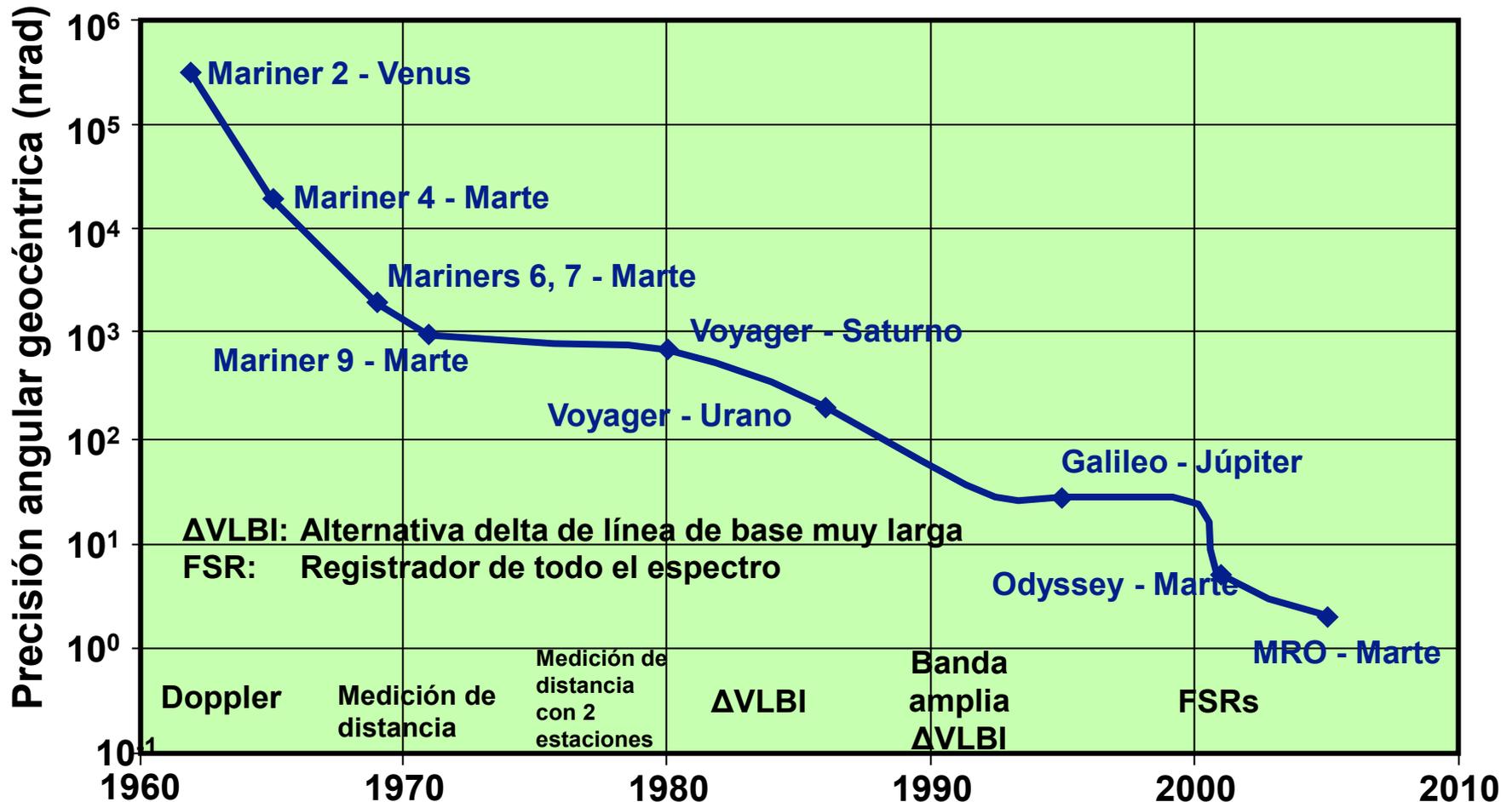
Tendencias en las comunicaciones y navegación de espacio lejano (Tasa de datos)





Comunicaciones de espacio lejano

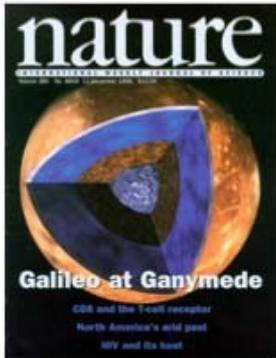
Tendencias en las comunicaciones y la navegación de espacio lejano (Seguimiento angular)



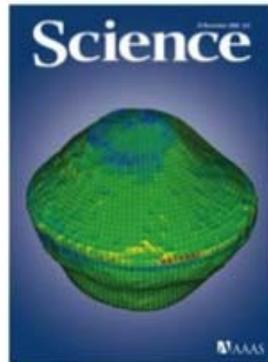
Comunicaciones de espacio lejano

Repercusiones de la ciencia del espacio lejano

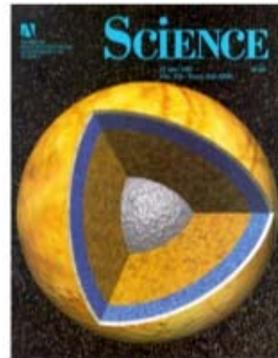
La ciencia del espacio lejano ha proporcionado un flujo continuo de descubrimientos de vanguardia, muchos artículos de gran repercusión y muchas misiones de investigación



Interior de Ganímedes



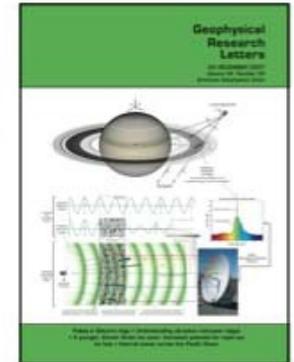
Asteroides en 3-D



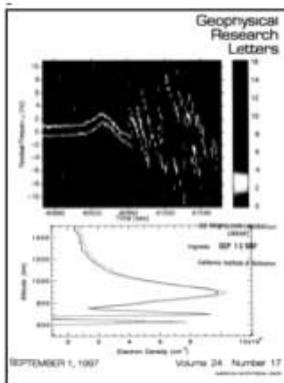
¿Océanos en Europa?



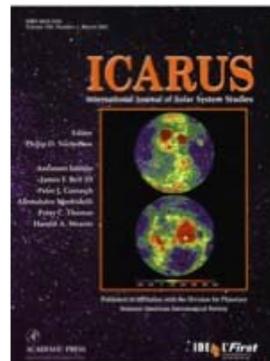
El núcleo líquido de Mercurio



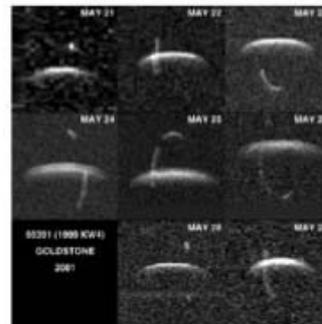
Los anillos de Saturno



La ionosfera de Marte



El campo gravitatorio de la Luna



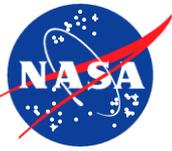
Asteroides binarios



Estudio de las emisiones radioeléctricas de Júpiter

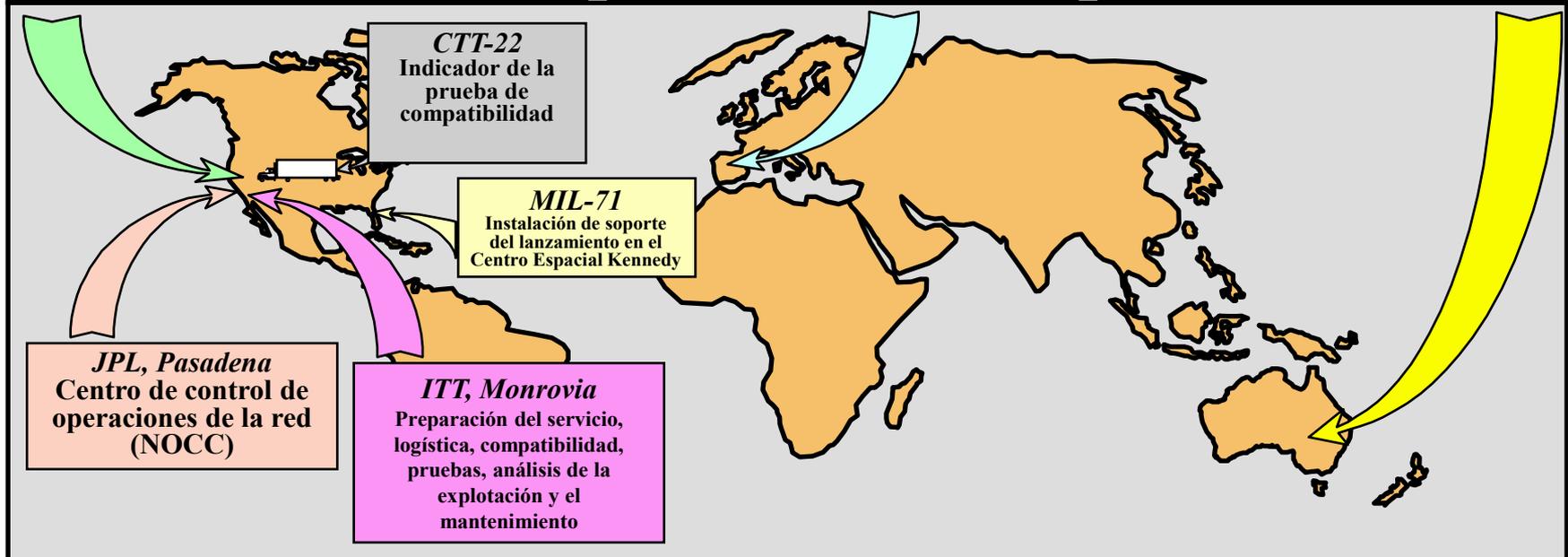
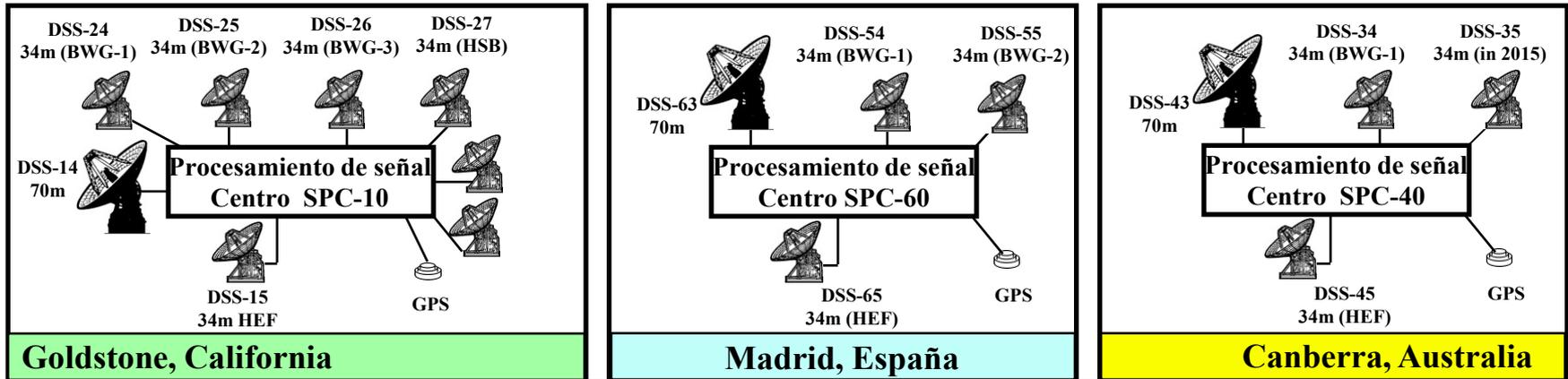


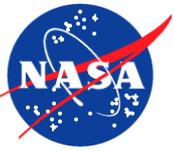
Los anillos de Saturno



Comunicaciones de espacio lejano

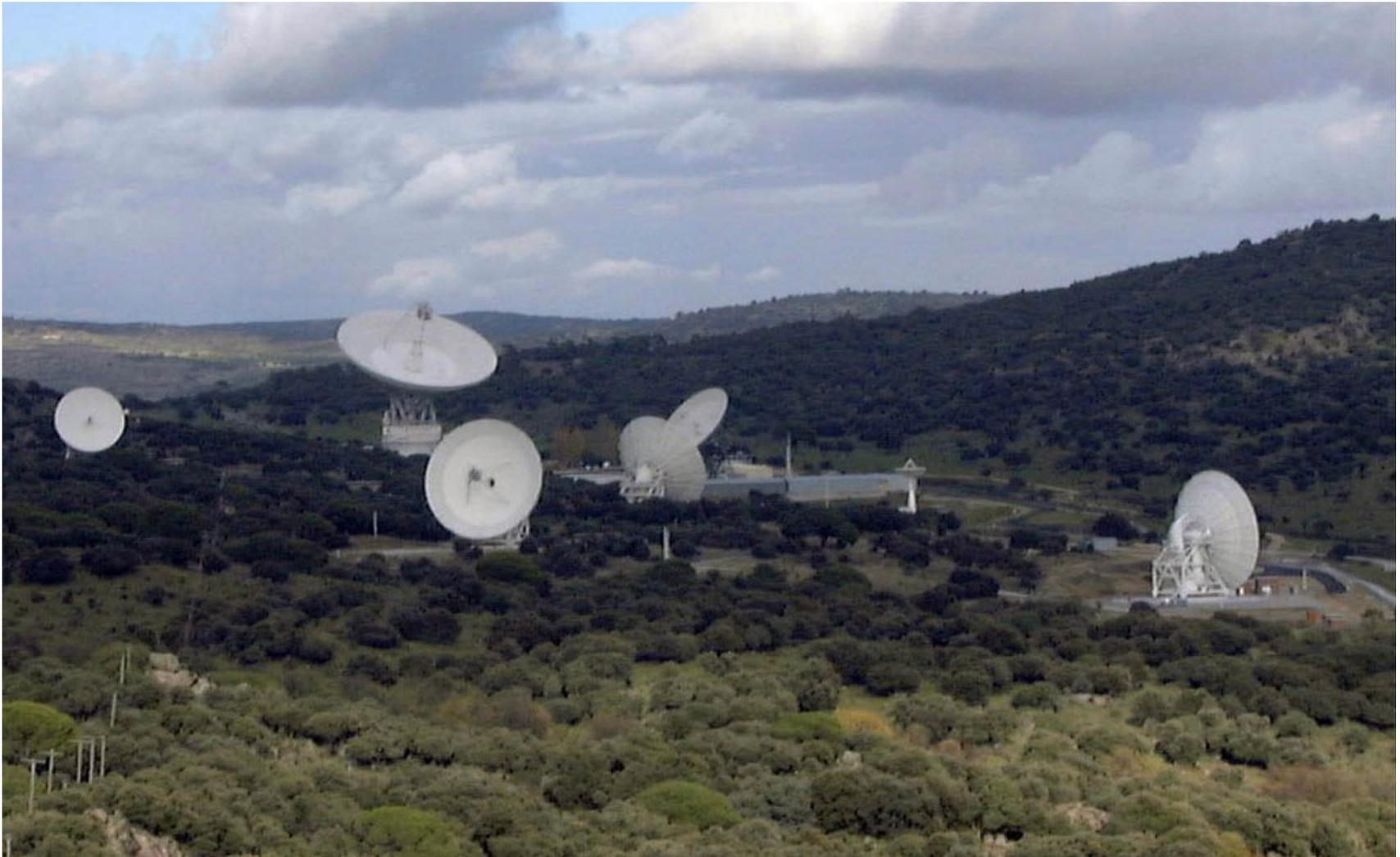
Red de comunicaciones de espacio lejano (DSN) de la NASA

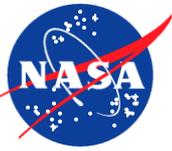




Comunicaciones de espacio lejano

Antenas de la DSN en Madrid, España





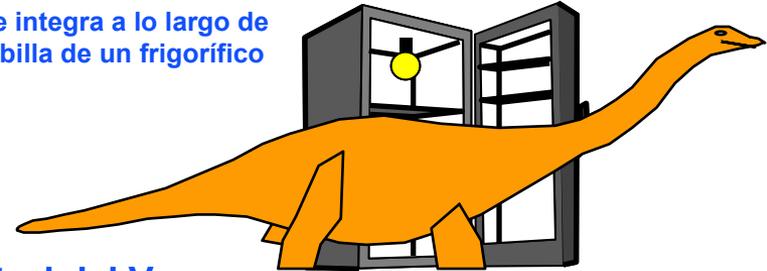
Comunicaciones de espacio lejano

Algunas características sorprendentes de la red de comunicaciones de espacio lejano (DSN)

Sensibilidad de la señal recibida:

La energía recibida del Voyager a una distancia de 100 AU (unidades astronómicas, 1 AU \cong 150 millones de km), si se integra a lo largo de 10 billones de años sería apenas suficiente para encender la bombilla de un frigorífico durante 1 segundo

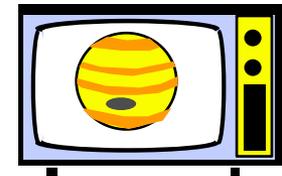
$$\text{Potencia recibida} = 6,3 \times 10^{-19} \text{ W}$$



Potencia de control:

La DSN emplea suficiente potencia en el control del Voyager como para proporcionar una TV comercial de alta calidad en Júpiter

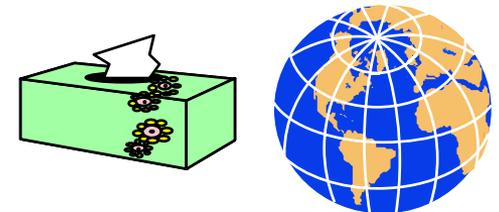
$$\text{Potencia transmitida} = 400 \text{ kW}$$



Gama dinámica de la DSN:

La relación entre la potencia de señal recibida y la potencia transmitida por la DSN es similar a la relación entre el espesor de una hoja de papel y toda la Tierra

$$\text{Relación} = 10^{27}$$



Estabilidad del reloj de referencia:

Los relojes utilizados en la DSN son tan estables que sólo presentarían una deriva de 5 minutos si hubieran estado funcionando desde el principio del universo

$$1 \text{ parte entre } 10^{15}$$

