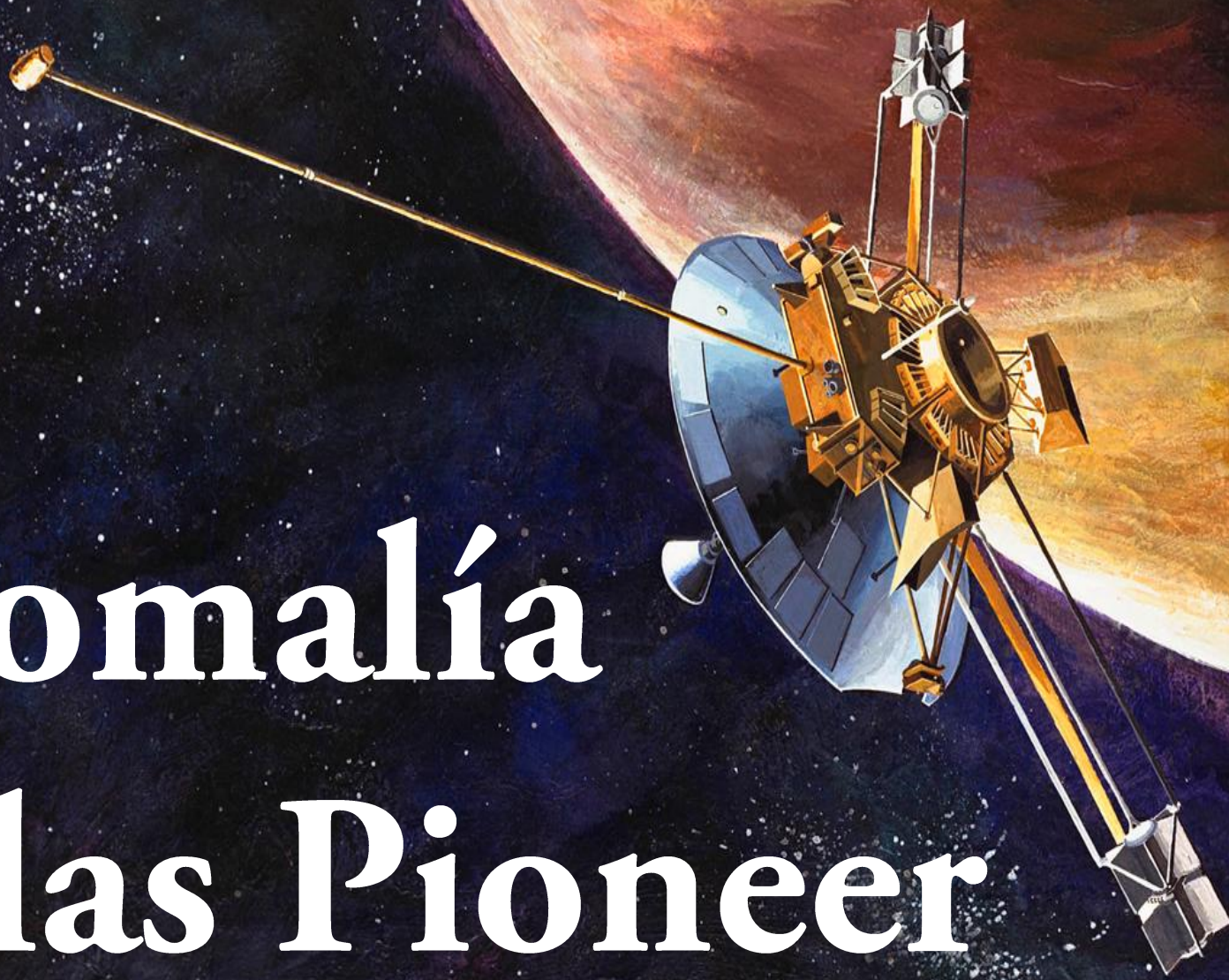
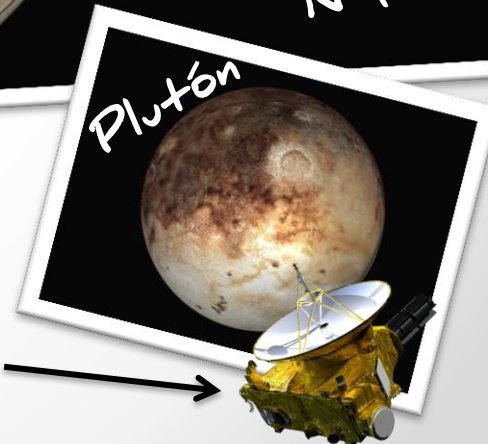
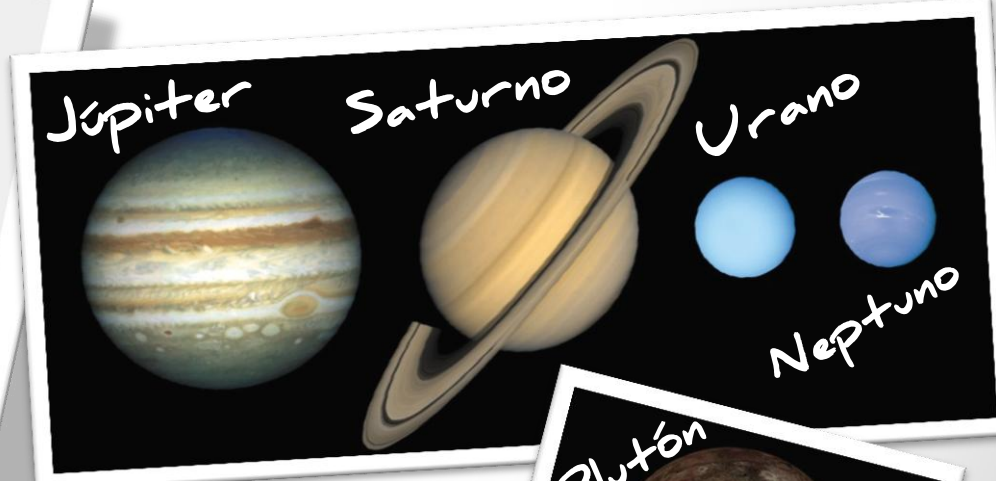
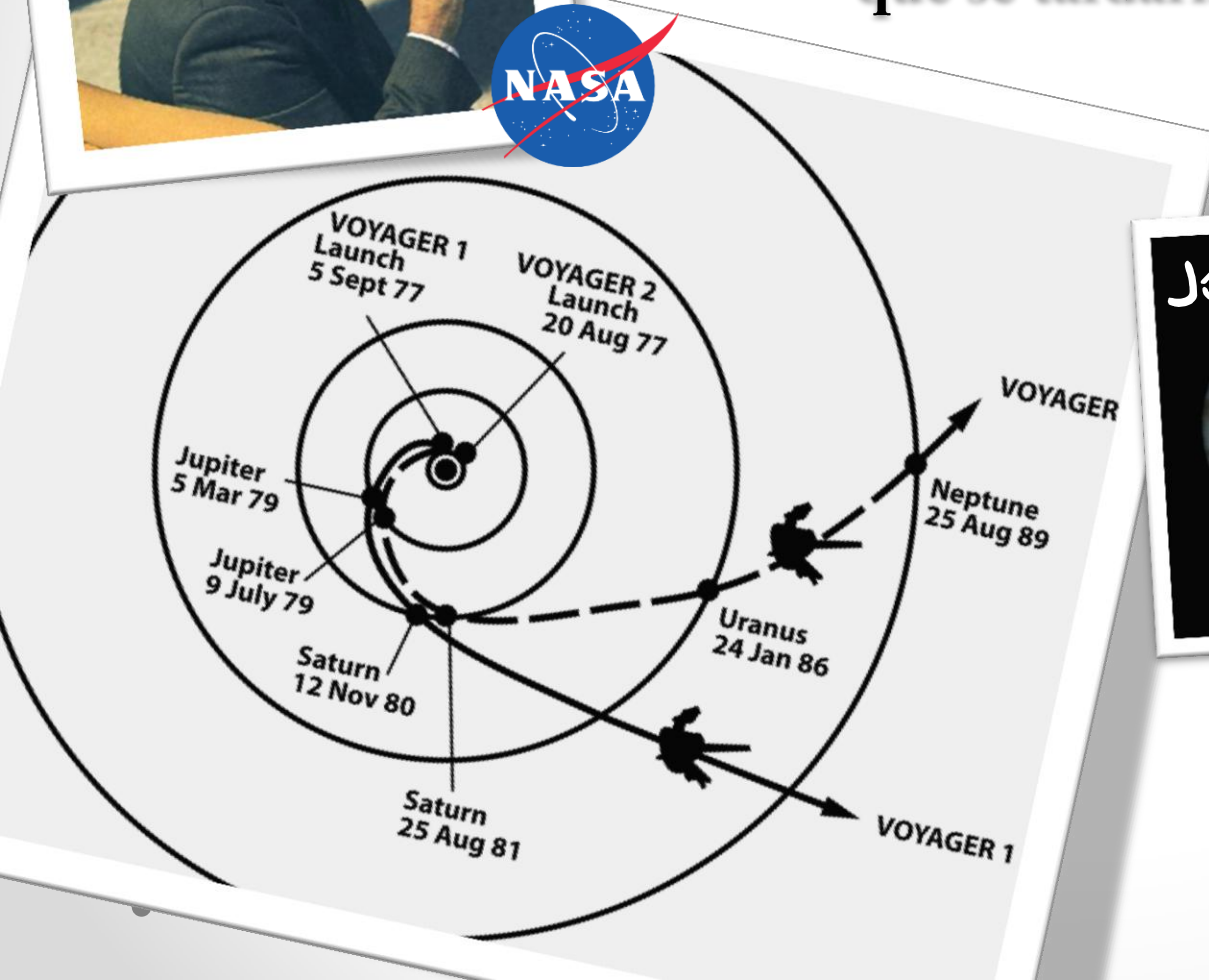
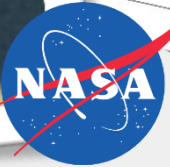


La Anomalía de las Pioneer



1964: El Gran Tour Planetario

A fines de los '70 un raro alineamiento de los planetas exteriores iba a permitir explorarlos de forma muy rápida: en una década, en comparación con los 40 años que se tardaría normalmente



New Horizons

Pioneer 10 y 11

Marzo 2, 1972



Pioneer 10

2003

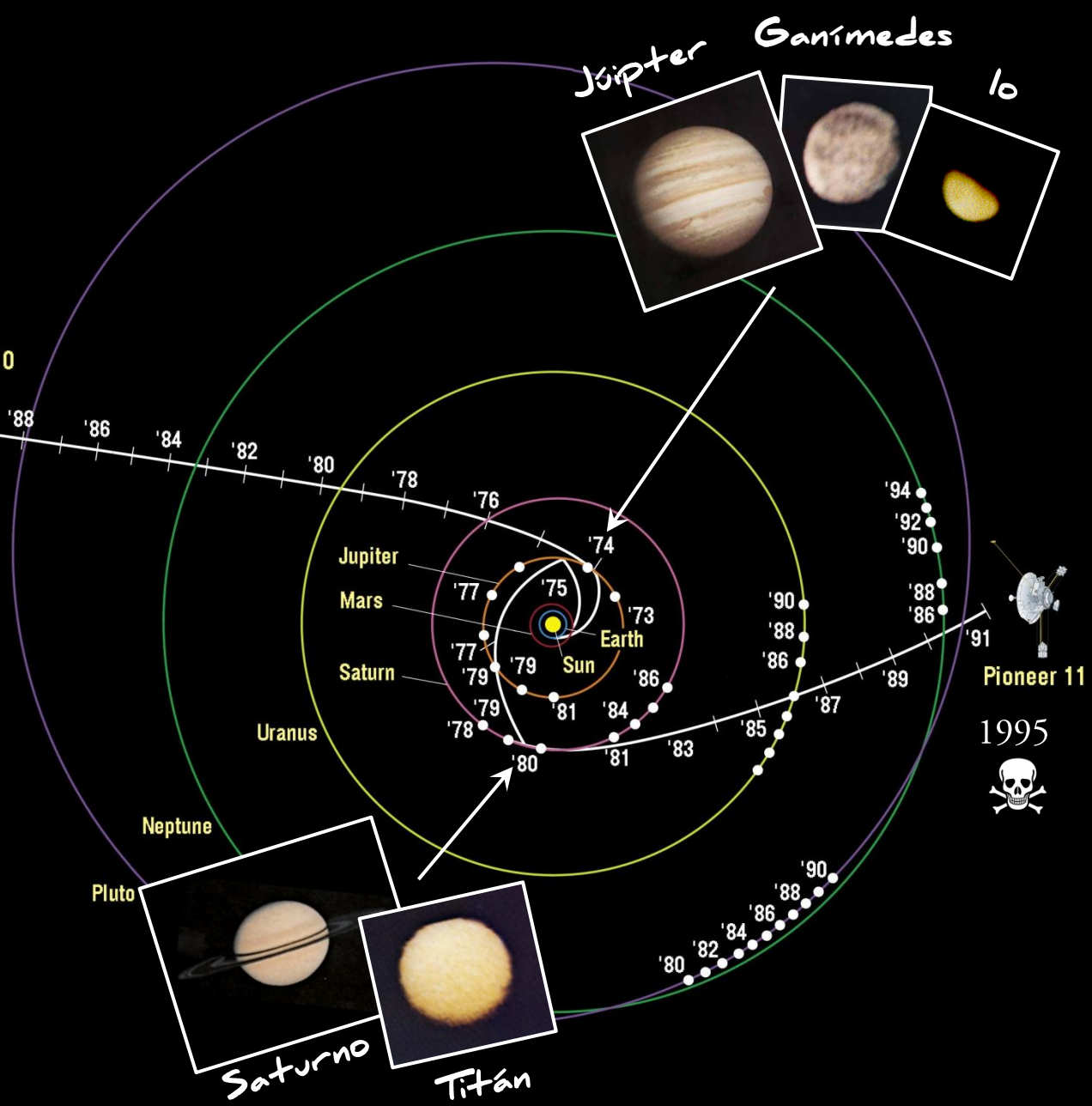


Pioneer 10

Abril 6, 1973



Pioneer 11



Jupiter Ganymedes Io

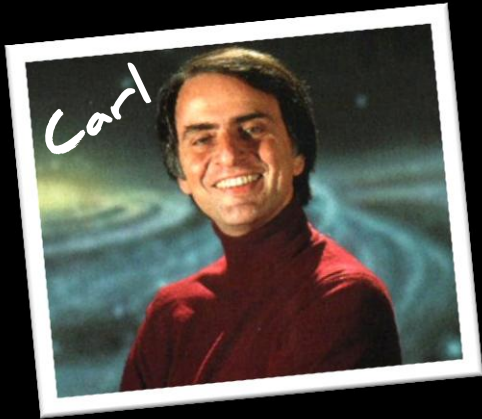


Pioneer 11

1995

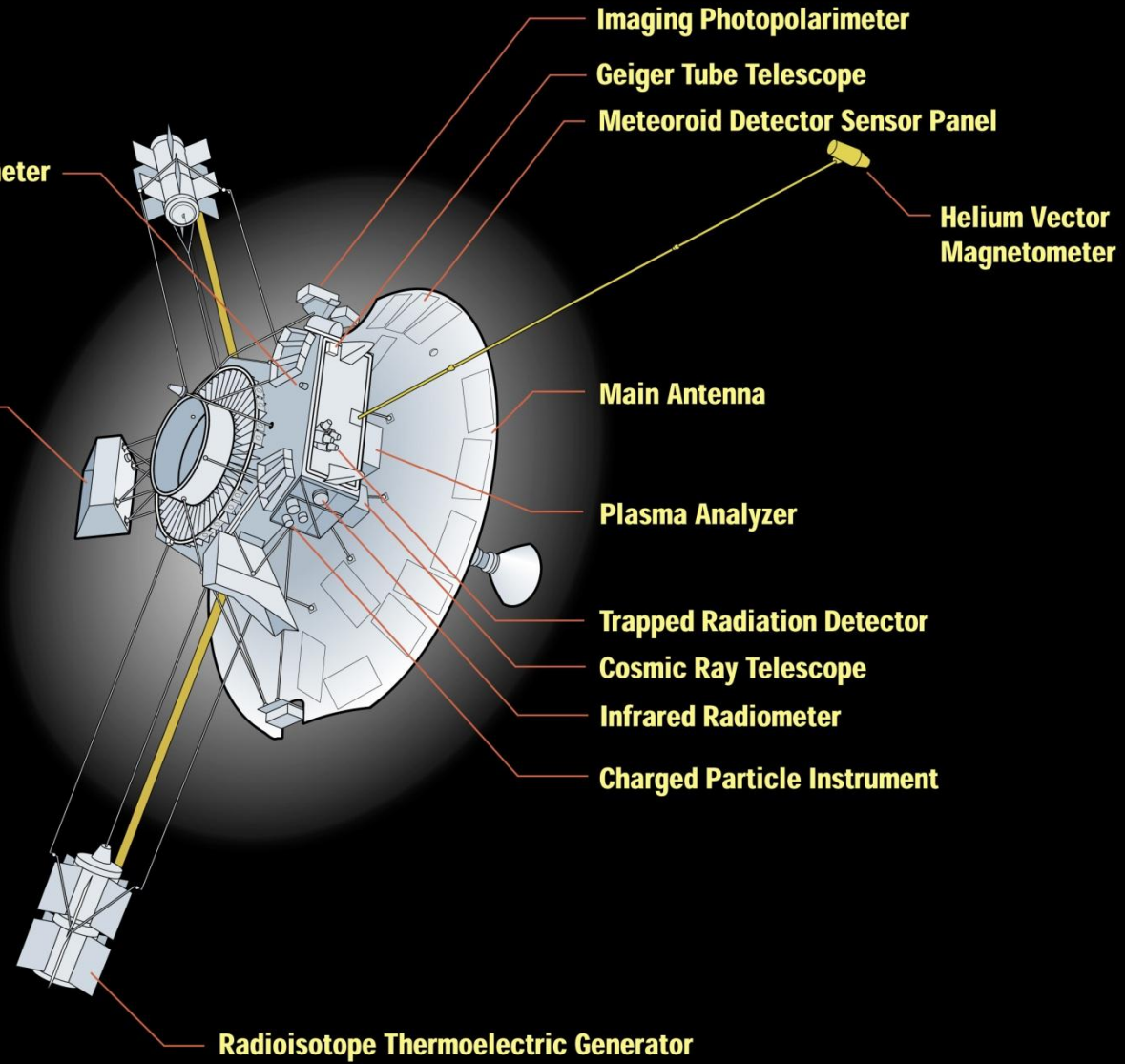


Las sondas

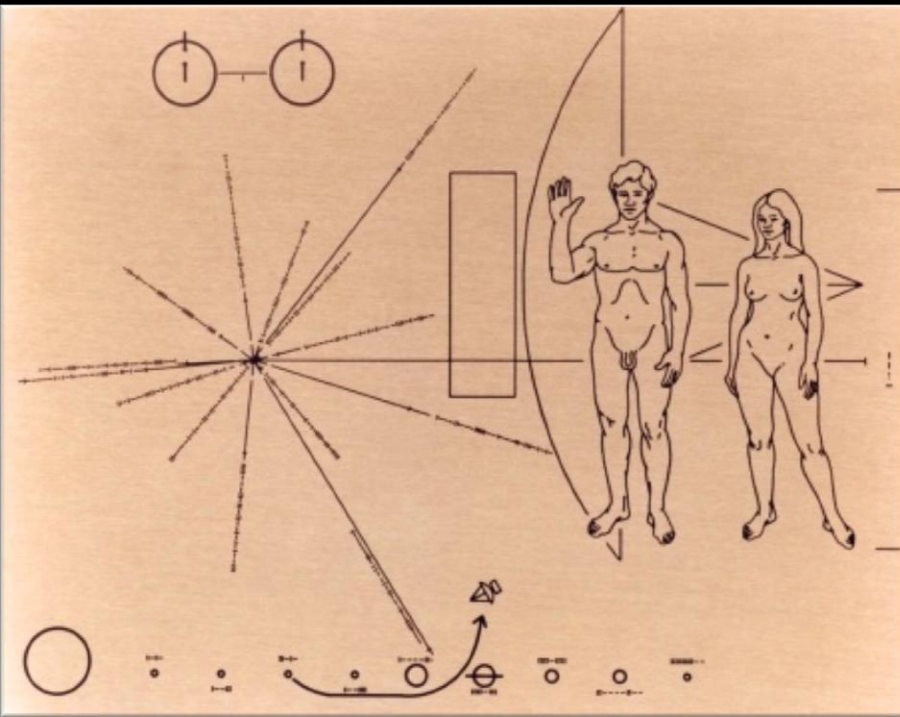


Asteroid - Meteoroid Detector Sensor

Ultraviolet Photometer



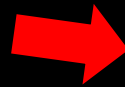
Placa de las Pioneer, diseño de Carl Sagan



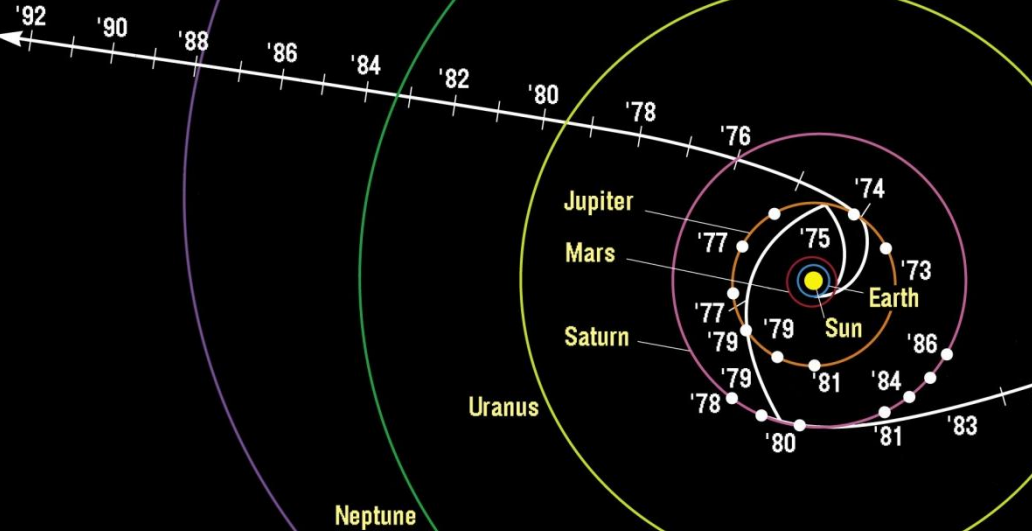
Lo que fue mal

- En la etapa interestelar se detectó una desaceleración aparentemente constante. Luego de varios años se verificó que disminuía lentamente.

desaceleración
 $(8.74 \pm 1.33) \times 10^{-10} \text{ m/s}^2$



Pioneer 10



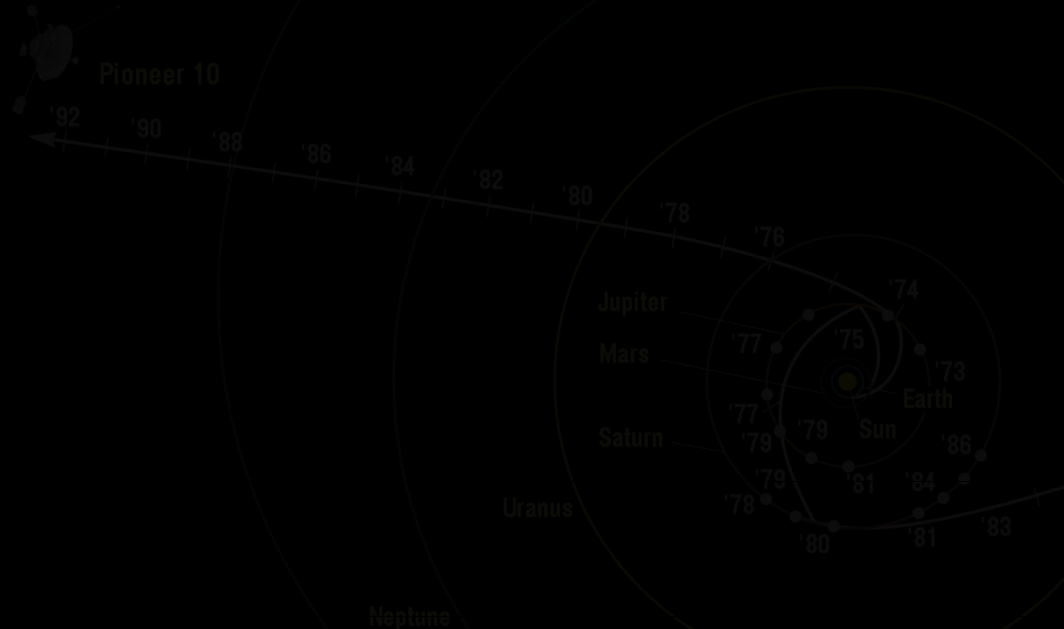
Lo que fue mal

Teorías triviales

- Escapes de gas
- En la etapa interestelar se detectó una desaceleración aparentemente constante. Luego de varios años se verificó que disminuía lentamente.
- Arrastre del medio interplanetario (polvo, viento solar, rayos cósmicos)
- Interacciones gravitatorias no consideradas (Cinturón de Kuiper, materia oscura)
- Variación en la posición de las estaciones receptoras en Tierra
- Interacciones entre la señal de radio y el viento solar
- Errores del modelo inicial o de observación.

Física nueva

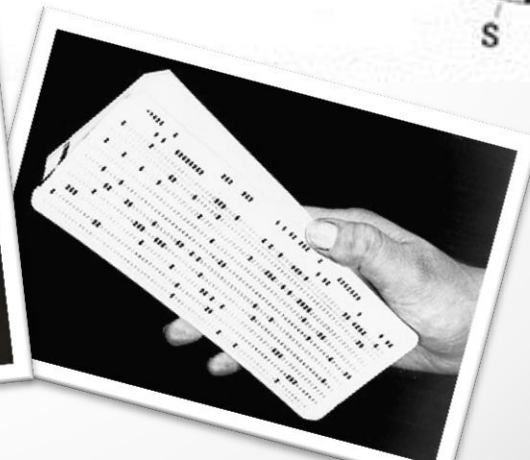
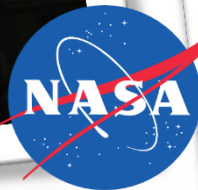
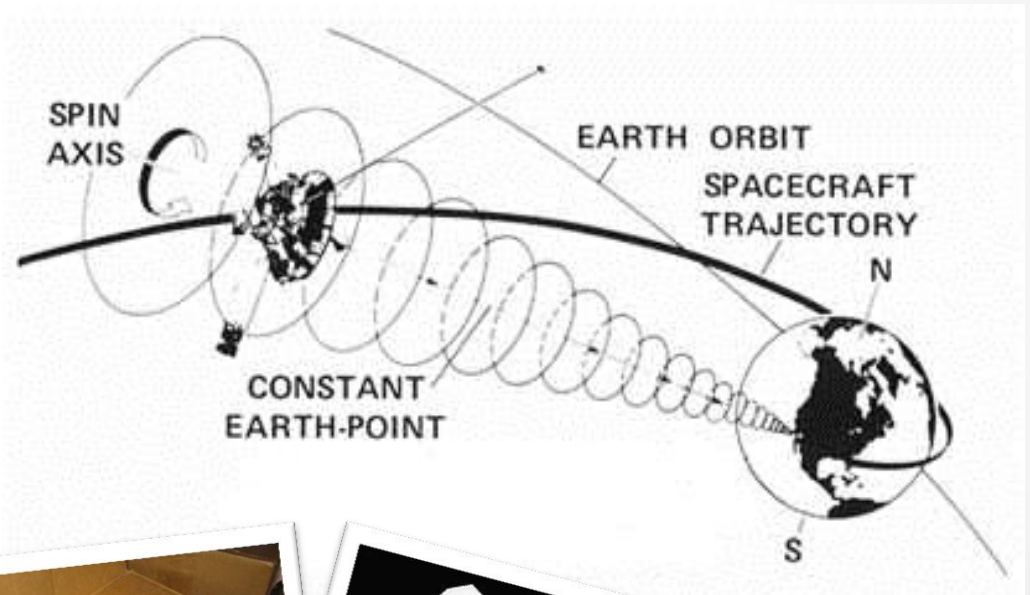
- Modificación la definición de la gravedad
 - Modificación de la definición de inercia
 - Modificación de la definición de tiempo
- etc...



Arqueología de datos

La antena apunta siempre a Tierra, y los componentes eléctricos están del lado opuesto. esto sugiere a la radiación asimétrica como culpable de la anomalía. En 1998 se comienza a pensar en esta idea. Pero:

- No estaban los registros de temperatura
- No se podían hacer modelos detallados para corroborarlo



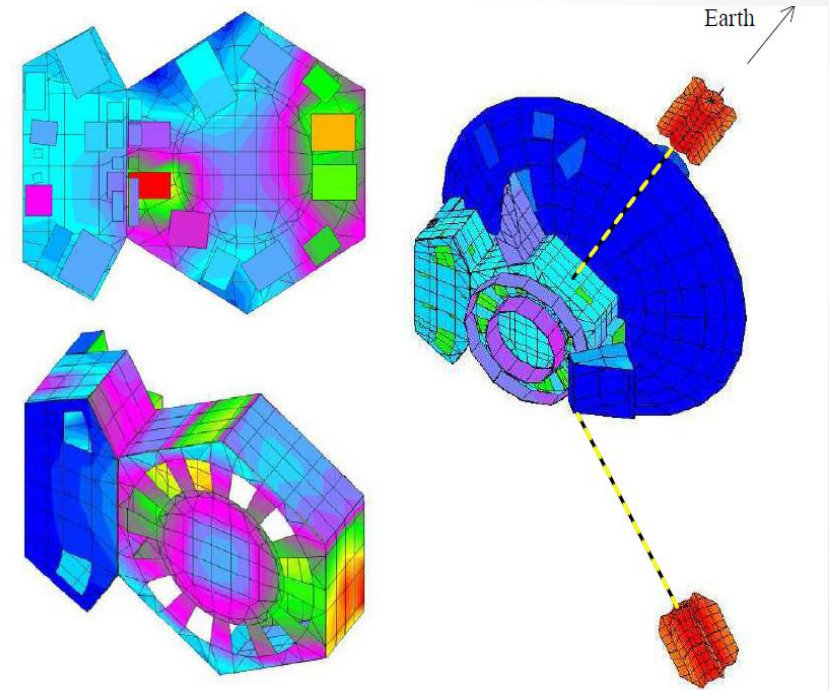
La respuesta: radiación térmica asimétrica

Se obtuvieron los datos de:

- Velocidad de las naves (Efecto Doppler)
- Temperatura de varios sensores
- Potencia consumida o generada por los distintos componentes para diferentes distancias respecto del Sol

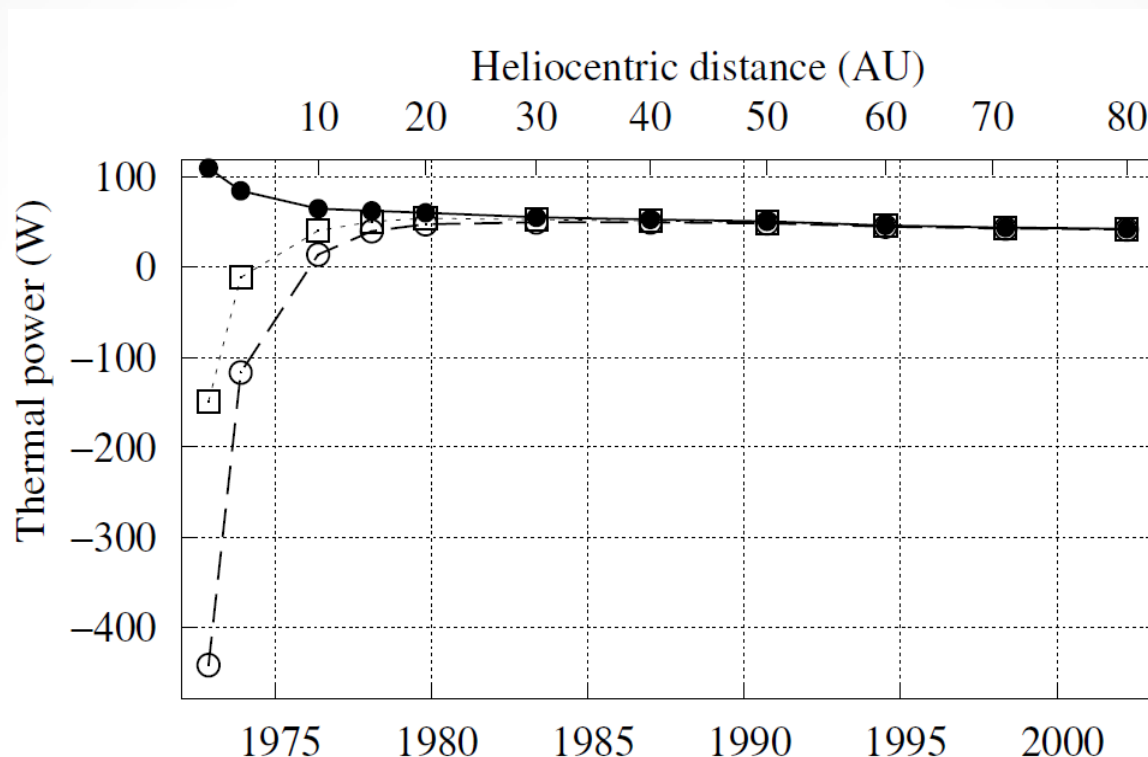
| Description | Power (W) | | | | |
|--------------------------|--------------|--------------|--------------|-------------|-------------|
| | 3 AU | 10 AU | 25 AU | 40 AU | 70 AU |
| Science, internal | 12.6 | 12.6 | 11.9 | 8.8 | 0.8 |
| Science, external | 6.4 | 8.4 | 6.4 | 6.4 | 0.0 |
| Subsystems | 20.2 | 20.2 | 20.4 | 20.2 | 19.5 |
| Electrical, internal | 63.2 | 46.3 | 35.5 | 28.4 | 17.5 |
| Electrical, external | 8.1 | 4.7 | 2.7 | 2.3 | 0.1 |
| TWT ^a thermal | 18.6 | 18.6 | 19.8 | 19.5 | 21.2 |
| Transmitter | 9.2 | 9.2 | 8.0 | 8.3 | 6.6 |
| Total consumed | 138.3 | 120.0 | 104.7 | 93.9 | 65.8 |
| RTG generated | 148.5 | 127.1 | 107.1 | 94.0 | 67.2 |
| Cable loss | 6.9 | 5.3 | 4.0 | 3.2 | 1.7 |
| Total available | 141.6 | 121.8 | 103.1 | 90.8 | 65.5 |
| Difference | +3.4 | +1.8 | -1.6 | -3.1 | -0.4 |

Potencia generada/consumida por los distintos componentes



Modelo térmico evaluado a 40 UA
SINDA/3D

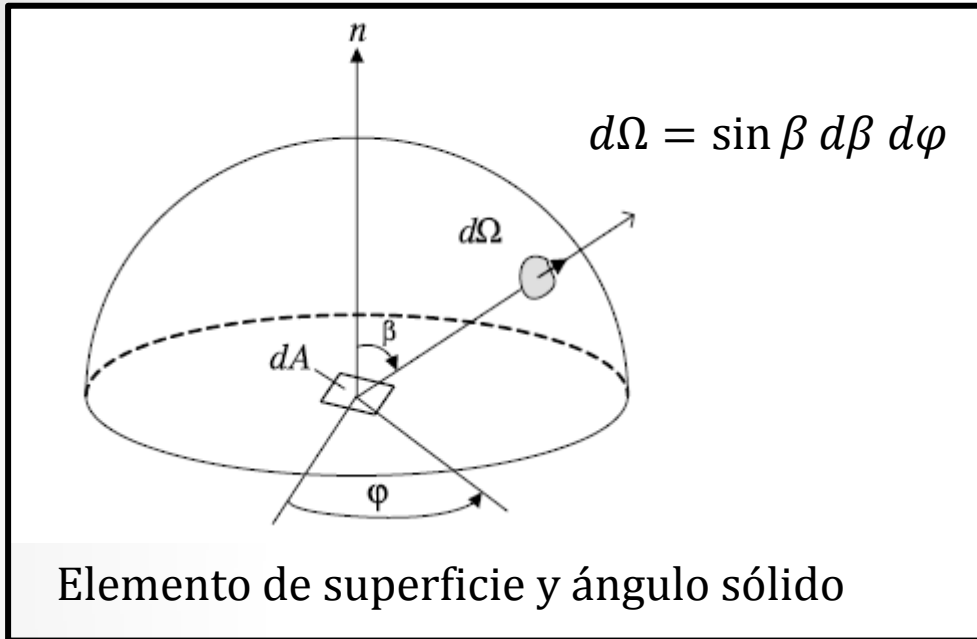
La respuesta: radiación térmica asimétrica



Potencia que contribuye a la aceleración hacia el Sol

- Calor y reflexión de la radiación solar
- Sólo calentamiento por la radiación solar
- Todos los efectos solares removidos

Radiación térmica: modelando la fuerza



$$\text{Radiancia espectral: } L_\lambda = \frac{dE}{dt d\Omega dA d\lambda}$$

$$L_\lambda = \varepsilon_\lambda \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{(hc/k\lambda T)} - 1}$$

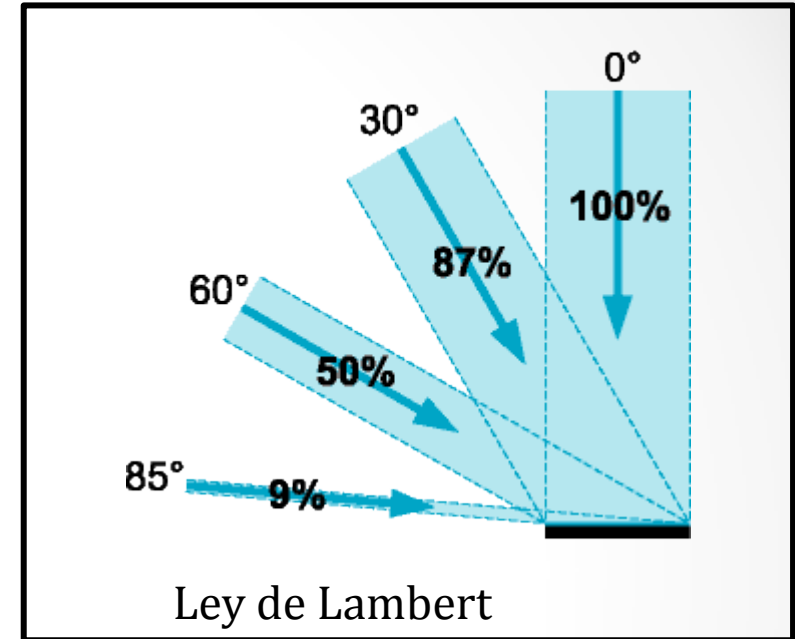
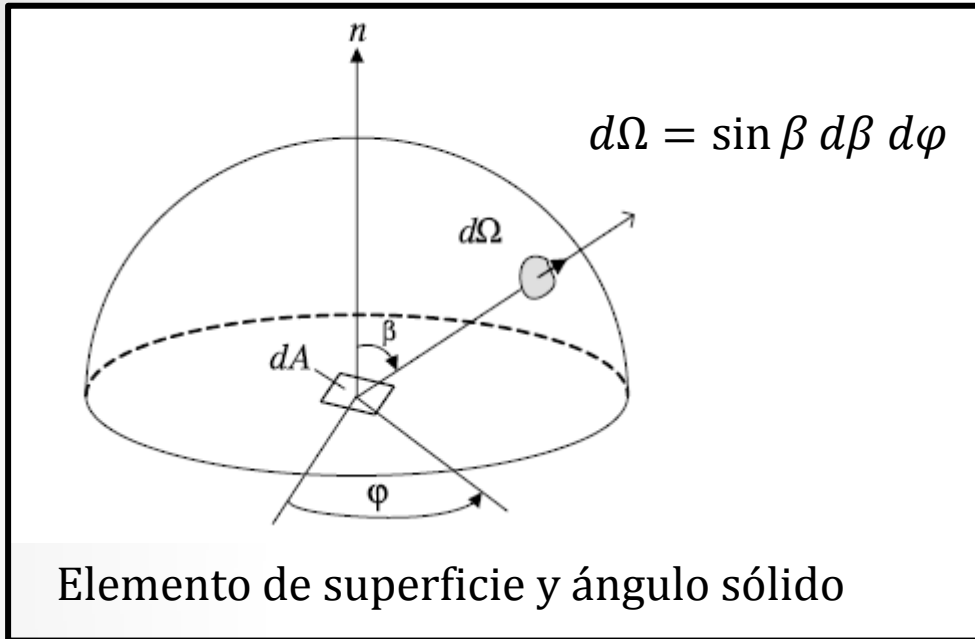
$$\text{Radiancia: } L = \frac{dE}{dt d\Omega dA}$$

$$L = \int_0^\infty L_\lambda d\lambda = \varepsilon \frac{\sigma}{\pi} T^4$$

$$\text{Intensidad normal: } I_n = \frac{dE}{dt d\Omega}$$

$$I_n = LA = \varepsilon A \frac{\sigma}{\pi} T^4$$

Radiación térmica: modelando la fuerza



Intensidad real (Ley de Lambert)

$$I = I_n \cos \beta = \varepsilon A \frac{\sigma}{\pi} T^4 \cos \beta$$

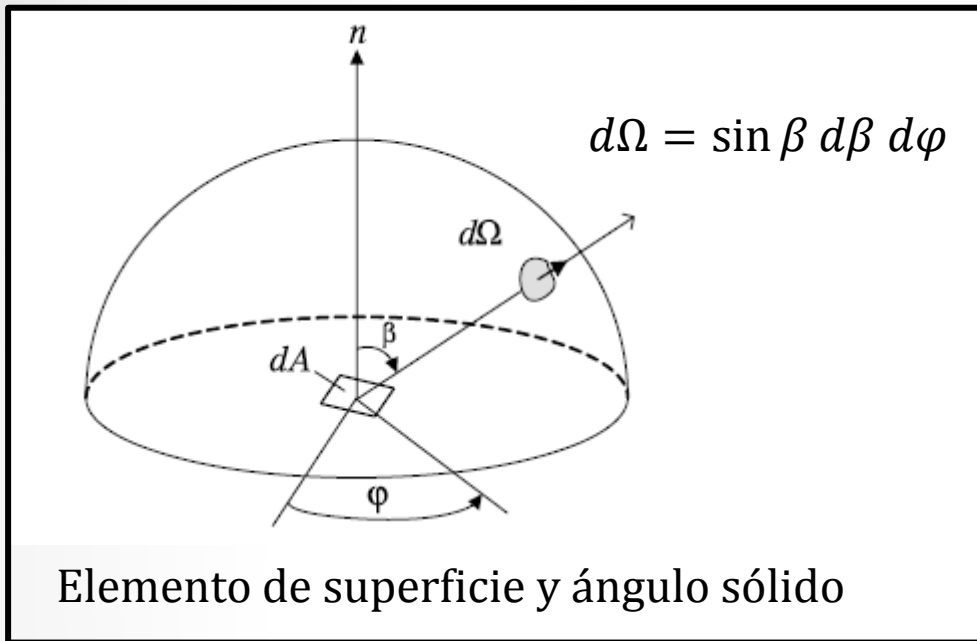
Fuerza por unidad de área y ángulo sólido:

$$dF = \frac{1}{c} \frac{I}{A} d\Omega dA = \varepsilon \frac{\sigma}{\pi} T^4 \cos \beta d\Omega dA$$

La emisión es simétrica:

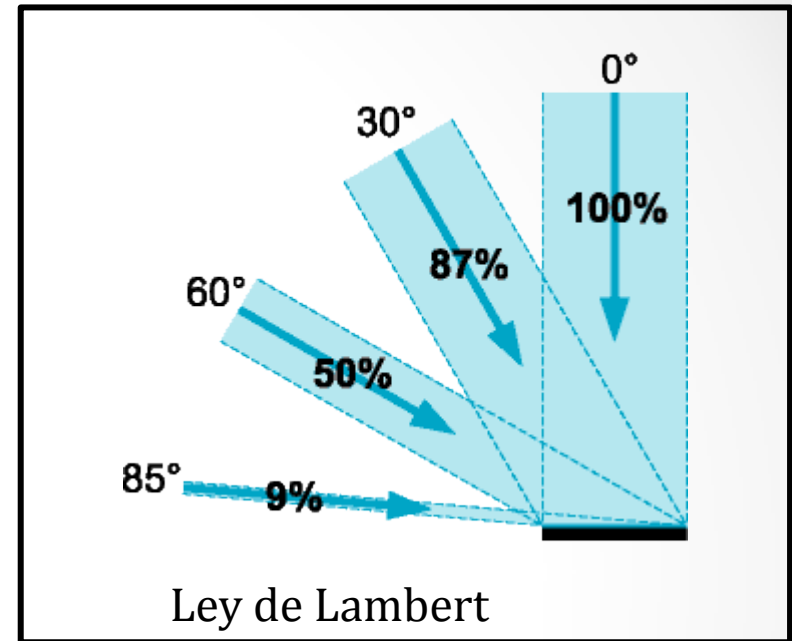
$$dF_{\perp} = dF \cos \beta = \varepsilon \frac{\sigma}{\pi} T^4 \cos^2 \beta \sin \beta d\beta d\varphi dA$$

Radiación térmica: modelando la fuerza



Integro en la semiesfera

Por la Ley de Stefan-Boltzmann

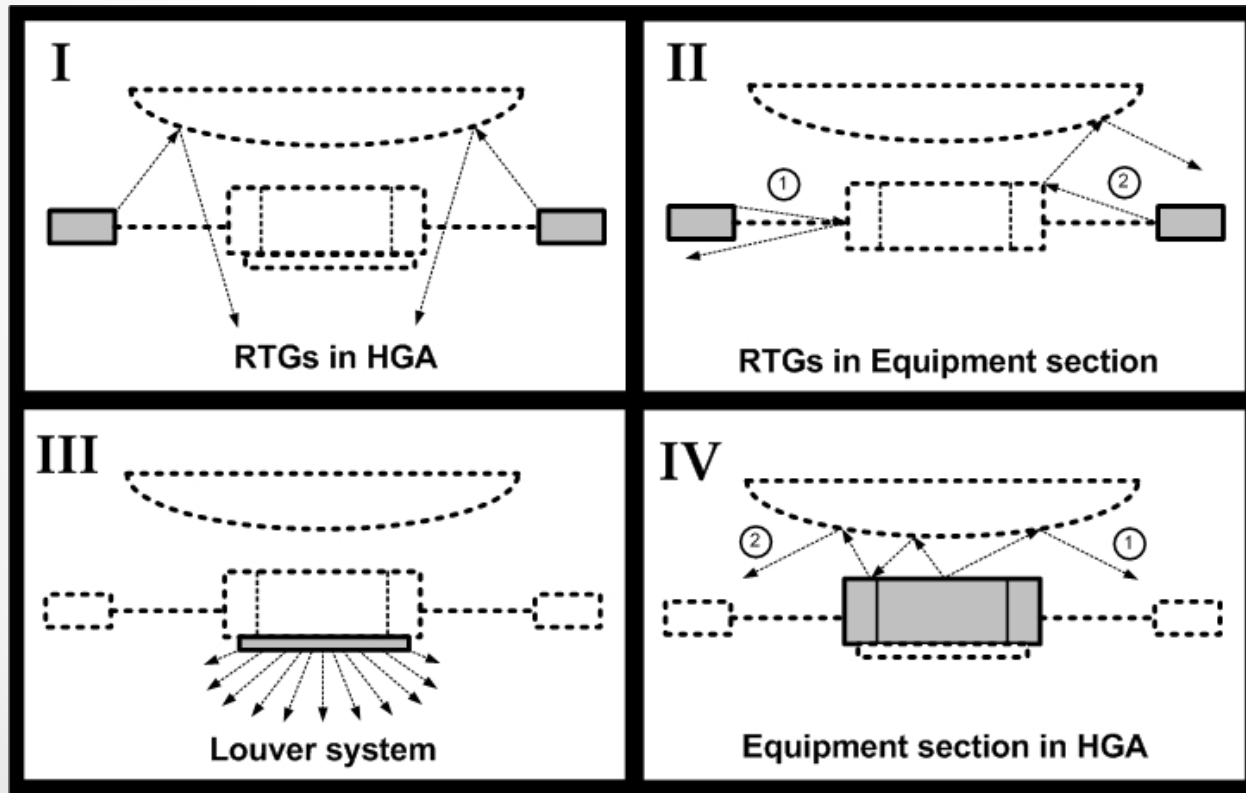


$$F_{\perp} = \frac{2}{3c} \varepsilon \sigma A T^4$$

$$F_{\perp} = \frac{2}{3c} P_{tot}$$

Radiación térmica: modelando la fuerza

Una parte la potencia emitida por cada elemento de superficie es absorbida o reflejada por otros elementos



Las principales fuentes de radiación son:

- Reflexión de los RTG en la antena
- Reflexión de los RTG en la sección de experimentos
- Emisión del sistema de ventilación
- Reflexión de la sección de experimentos en la antena

Radiación térmica: modelado de la fuerza

Se considera la **emisión, absorción y reflexión**

$$\text{Fuerza total: } \vec{F}_{\text{res}} = \sum_i^n \vec{F}_e(i) - \sum_i^n \vec{F}_{\text{abs}}(i) + \sum_i^n \vec{F}_{\text{ref}}(i)$$

$$\vec{F}_e(i) = -\frac{2}{3} \frac{1}{c} \varepsilon_A(i) A(i) \sigma T(i)^4 \vec{e}_N(i)$$

$\vec{e}_N(i)$: Versor normal al elemento de superficie i

$$\vec{F}_{\text{abs}}(i) = -\frac{1}{c} \sum_j^n \xi_{i,j} P_{\text{tot}}(i) \vec{e}_c(i, j)$$

$\vec{e}_c(i, j)$: Versor desde el elemento radiante i al absorbente j

$\xi_{i,j}$: Factor de visibilidad

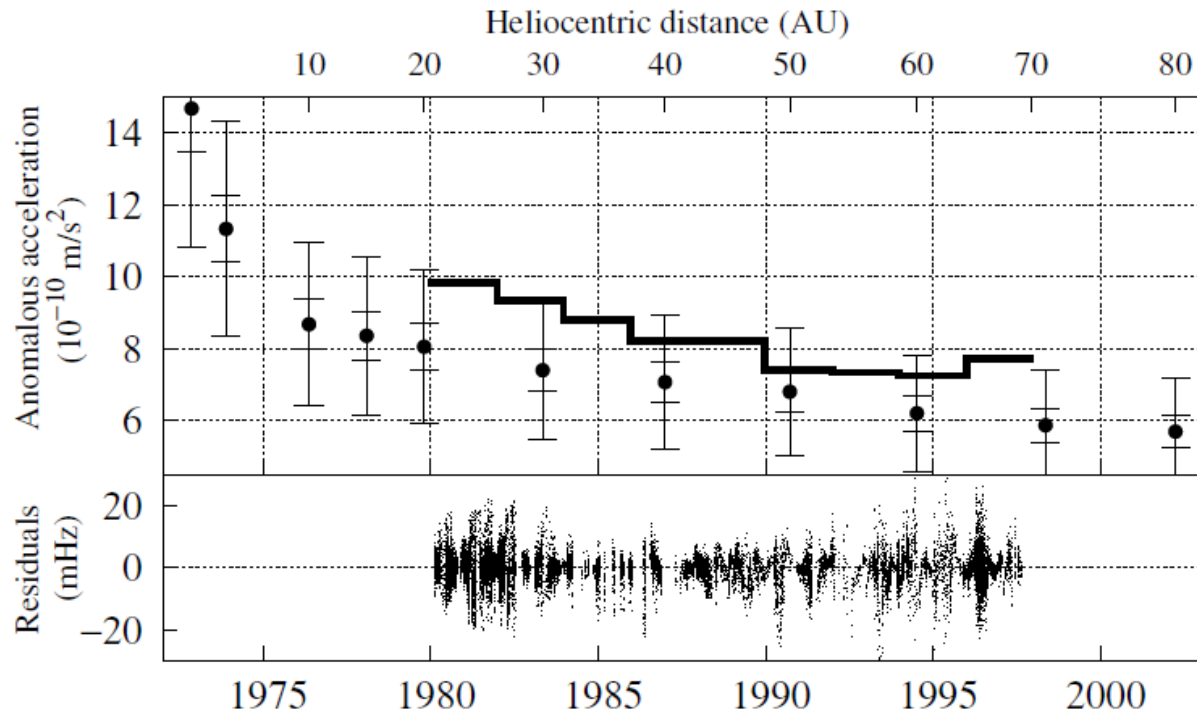
$$\vec{F}_{\text{ref}}(i) = -\frac{1}{c} \sum_k^{n_{\text{ref}}} \sum_j^n P_{\text{ref},i,j,k} \vec{r}_{\text{ref},i,j,k}$$

$$P_{\text{ref},i,j,k} = \gamma P_{i,j}$$

γ : Coeficiente de reflexión

$\vec{r}_{\text{ref},i,j,k}$: Dirección de reflexión

Radiación térmica: resultados



- Aceleración calculada con los datos de Doppler
- Aceleración estimada por la radiación asimétrica

Las aceleraciones obtenidas están abarcadas en las barras de error, pero son siempre menores que las registradas, así que pueden haber más factores que aporten a la anomalía.

¡GRACIAS!