

# Capítulo 1

## Introducción

### 1.1. La Misión LISA

En 1916 Albert Einstein describió en su Teoría General de la Relatividad un nuevo modelo de Gravitación. La gravitación ofrece a partir de este momento soluciones radiativas. Las fuentes de esta radiación son grandes masas aceleradas que emiten vibraciones como parte de su energía que se propagan a la velocidad de la luz en forma de ondulaciones del espacio-tiempo, conocidas como *ondas gravitacionales*.

La radiación gravitacional acompaña una aceleración cuadrupolar de cualquier tipo de masa o energía (figura 1.1). Este momento cuadrupolar perturba el espacio-tiempo con una deformación o *strain* de amplitud adimensional (variación de distancia relativa  $h = \Delta L/L$ ). En el caso del paso de una onda gravitacional este strain es del orden de  $h = \Delta L/L \approx 10^{-21}$ . Debido al mínimo acoplamiento de su interacción, la detección de ondas gravitacionales es uno de los mayores retos de la física moderna. Con esto, y a pesar de su baja interacción se espera obtener una información muy importante del Universo a través de ellas [2].

### 1.2. Ondas gravitacionales: sus fuentes

Las fuentes de ondas gravitacionales son objetos celestes altamente masivos. Su radiación se propaga a través del Universo sin verse alterada por la materia que atraviesa. Las fuentes de ondas gravitacionales se dividen en dos grupos, las de baja y las de alta frecuencia.

Las ondas emitidas en la región de alta frecuencia pueden ser detectadas por detectores de ondas gravitacionales en la Tierra y las de baja frecuencia: entre 0.1 mHz y 1 Hz sólo podrían ser detectadas por un detector de ondas gravitacionales espacial (ver figura 1.2.). Esto es debido al ruido gravitacional terrestre.

La Misión LISA [3] en el marco en el cuál se ha realizado este proyecto será capaz de detectar las ondas gravitacionales de baja frecuencia, producidas por la coalescencia de agujeros negros supermasivos, o cuerpos celestes binarios; enanas blancas en órbita mútua o estrellas de neutrones.

### 1.3. Detectores de ondas gravitacionales: LISA

Los experimentos para demostrar directamente la existencia de ondas gravitacionales se basan de esta forma en la detección de la variación de la distancia entre masas que forman un sistema de partículas que son excitadas mecánicamente al paso de ondas gravitacionales. Los detectores de ondas gravitacionales terrestres actuales como LIGO (Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory) [4], TAMA300 [5], GEO600 [6] o VIRGO [7] utilizan técnicas interferométricas a la hora de tratar la detección de estas ondas (ver figura 1.3).

LISA (una colaboración entre la ESA (European Space Agency) y la NASA (National Aeronautics and Space Administration)) será el primer observatorio de ondas gravitacionales en el espacio, y está basado en un interferómetro de Michelson a enorme escala. LISA detectará la variación relativa entre dos brazos del interferómetro al paso de una onda gravitacional. La constelación de LISA (figura 1.4) forma un triángulo equilátero con un satélite en cada vértice y de lado igual a 5 millones de kilómetros. Es precisamente la longitud del brazo del interferómetro lo que le proporciona su extrema sensibilidad. Los espejos del interferómetro gigante que forman los tres satélites de la constelación de LISA están definidos por “masas de prueba”, dos pequeños cubos (4 cm) muy densos de oro y platino. Cada satélite consta de dos telescopios y cada uno de ellos sigue la trayectoria de uno de los dos satélites restantes que conforman la constelación.

LISA debe ser capaz de medir un strain variable del orden de  $10^{-21}$ , o lo que es lo mismo un cambio de distancias de alrededor de 10 picómetros sobre una distancia de 5 millones de kilómetros. Se requiere una sensibilidad en la medida de translación de las “masas de prueba” de  $\sim 10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$  y de  $\sim 20 \text{ nrad}/\sqrt{\text{Hz}}$  en la medida de ángulo de inclinación de la misma.

Dado que los telescopios forman parte de la distancia de separación entre el banco óptico de un satélite y el del otro satélite contiguo entre los que se realizan las medidas (ver figura 1.5), la estabilidad de los mismos conocida la sensibilidad requerida ha de ser enormemente alta.

### 1.4. El telescopio de LISA

Para lograr una resolución de picómetros se requieren caminos ópticos extremadamente estables. Los brazos del interferómetro de LISA están expuestos a fluctuaciones que deben permanecer por debajo de un 1% sobre la longitud total, esto es  $5 \times 10^4 \text{ km}$  sobre 5 millones de km.

Es necesario por tanto minimizar la aportación a esta variación debido a inestabilidades termomecánicas del material de separación entre los espejos primario y secundario de los telescopios de LISA. La variación de esta distancia debe ser de alrededor de  $\sim 10 \text{ pm}/\sqrt{\text{Hz}}$  para frecuencias mayores que 1 mHz.

La distorsión total del “single link” debido a la expansión térmica del material que forma el telescopio es

$$\Delta L = 2L_{\text{Spacer}} \cdot CTE_{\text{Spacer}} \cdot \Delta T, \quad (1.1)$$

donde  $L_{Spacer}$  es la distancia entre los espejos primario y secundario del telescopio y  $CTE_{Spacer}$  es el coeficiente de expansión térmica del material separador.

Dentro del Estudio de Formulación de Diseño llevado a cabo por Astrium GmbH en contrato con la ESA, el límite asignado a cambios geométricos en el camino óptico debido a deformación del telescopio es:

$$L_{Spacer} \cdot CTE_{Spacer} \stackrel{!}{<} 200 \quad [\text{nm/K}]. \quad (1.2)$$

La temperatura en operación del área externa del telescopio será de  $-60$  °C mientras que la del banco óptico debe ofrecer un entorno a temperatura ambiente ( $\approx 20$  °C).

El coeficiente de expansión térmica (CTE) del material separador del telescopio puede ser a lo sumo de  $0,2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  para asegurar la realizabilidad de las medidas. Dada su gran rigidez y robustez junto con una gran ligereza y las cualidades termomecánicas que ofrecen los tubos de fibra de carbono reforzado de plástico (CFRP), es éste material el elegido para la fabricación de los telescopios de LISA (figura 1.6).

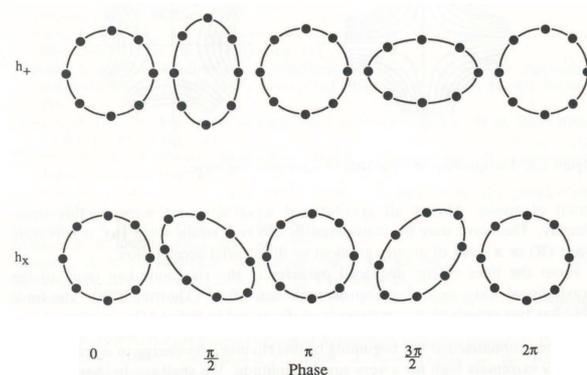


Figura 1.1: Un sistema de partículas formado por un anillo de “masas de prueba” se excitará de esta manera durante un ciclo de una onda gravitacional pasante (la fase de la onda se indica debajo). Se muestran las polarizaciones lineales “plus” ( $h_+$ ) y “cross” ( $h_x$ ) [2].

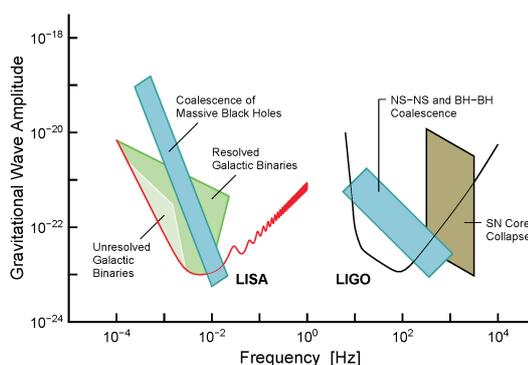


Figura 1.2: Fuentes de ondas gravitacionales. Amplitud de las ondas generadas (strain) y su rango de frecuencias. Asimismo se muestran las curvas de sensibilidad para el detector ligado a la Tierra LIGO y para el detector espacial LISA [8].

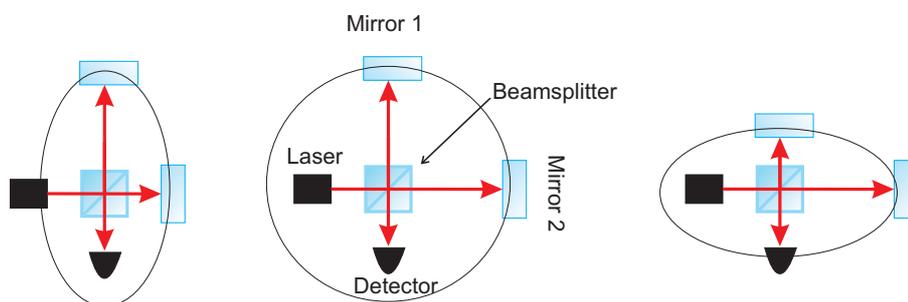


Figura 1.3: Detección interferométrica de ondas gravitacionales. Al paso de una onda gravitacional varía la longitud del brazo del interferómetro (en el centro se muestra el estado original) siendo detectable en el patrón de interferencias. Comparar con la distorsión causada sobre un anillo de masas, figura 1.1.

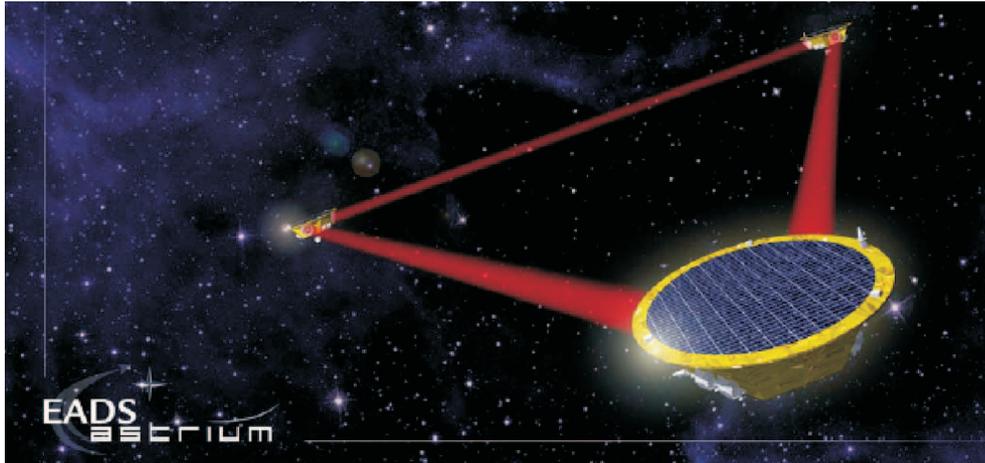


Figura 1.4: Constelación de satélites de LISA, el primer detector de ondas gravitacionales espacial.

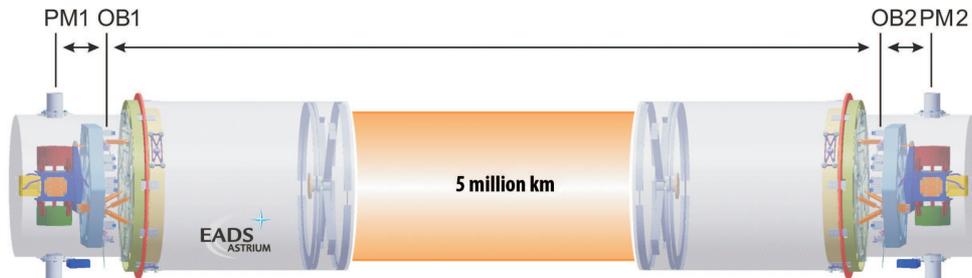


Figura 1.5: Representación de un brazo del interferómetro de LISA. 5 millones de kilómetros separan los bancos ópticos (OBs) de dos satélites contiguos, los espejos del interferómetro están definidos por “masas de prueba” (PMs).

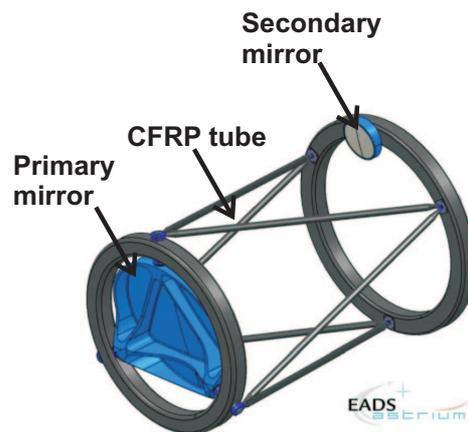


Figura 1.6: Prototipo de telescopio off-axis, estructura hexapod a base de tubos de CFRP.