



# Los desafíos tecnológicos del detector de ondas gravitatorias Virgo-Avanzado

Julia Casanueva  
INFN Pisa

# Índice

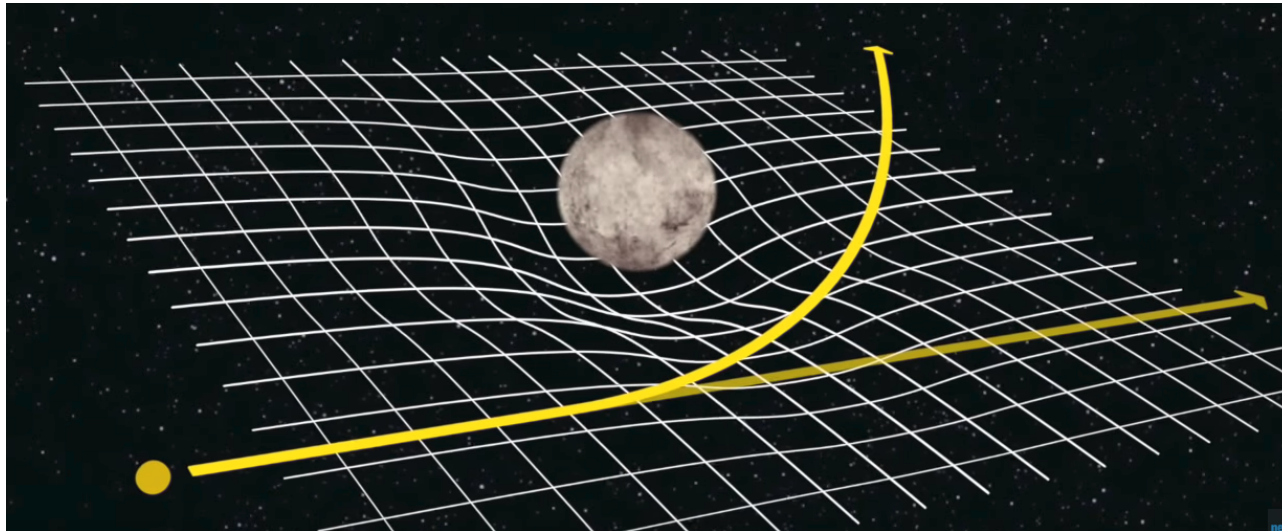


- Introducción
- Principio de detección
- Mitigación de ruido
  - Ruidos fundamentales
  - Ruidos técnicos
  - Presentación de los subsistemas y su rol en la mitigación de estos ruidos
- Puesta en funcionamiento
  - Histórico del detector Virgo
  - Commissioning de la primera fase de Virgo Avanzado
  - Primera toma de datos científica de Virgo Avanzado
- Perspectivas

# Introducción

# Relatividad General

- Einstein en 1916 plantea una nueva teoría de la gravitación → **Relatividad General**
- Imagina el espacio-tiempo como un “tejido”
- *La presencia de objetos masivos modifica la curvatura de este “tejido” del espacio-tiempo*
- Esta curvatura modifica la trayectoria de otras masas



# Ondas Gravitacionales (OGs)

→ Consecuencia de la Relatividad General

¿ QUÉ SON ?

- *Perturbación de la geometría del espacio-tiempo*
- Causadas por masas en aceleración
- Se propagan a la velocidad de la luz

→ **Efecto** del paso de una OG → *cambio en la distancia entre masas en caída libre*

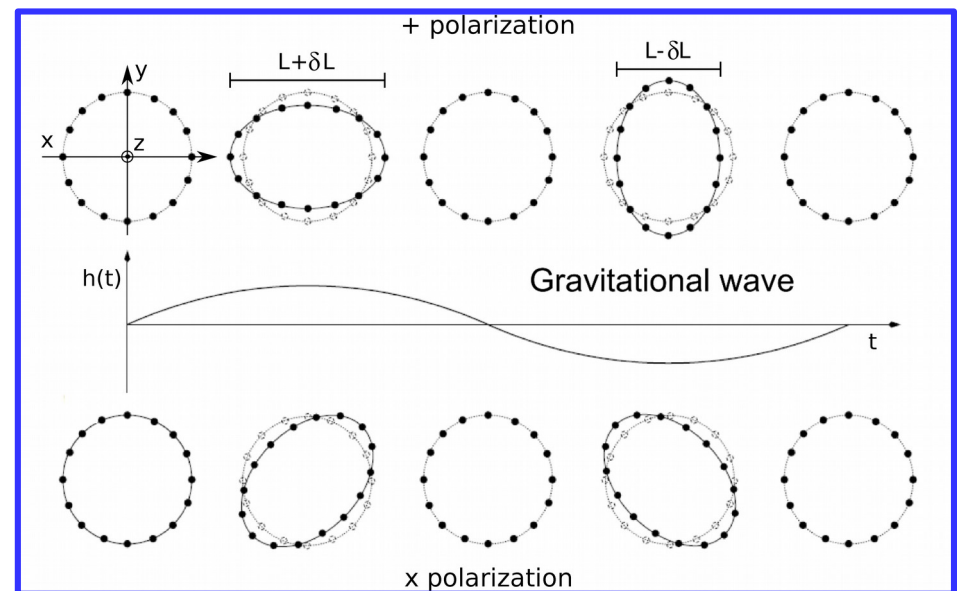
*Masas que experimentan únicamente la interacción gravitatoria*

$$\delta L / L \sim \textcircled{h}$$

*Amplitud de la OG*

→ **Efecto diferencial:**

Julia Casanueva



# Emisores de OGs

## ¿POR QUÉ NOS INTERESAN?

- Nueva fuente de observaciones astrofísicas → complementarias al espectro EM + *nuevos fenómenos*
- Poner a prueba la Relatividad General

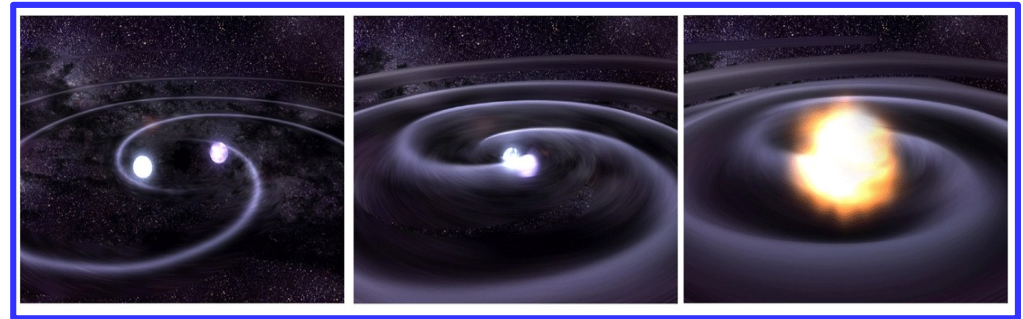
→ **Potencia emitida:**  
distribución asimétrica  
de masa, compacto y  
relativista.

→  $h$  disminuye como  $\frac{1}{r}$  →  
 $h \sim 10^{-21}$

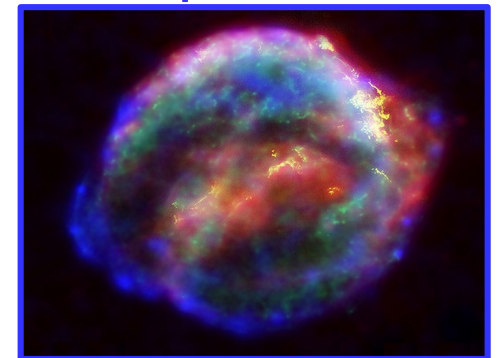
Algunos emisores interesantes para los detectores de OGs terrestres



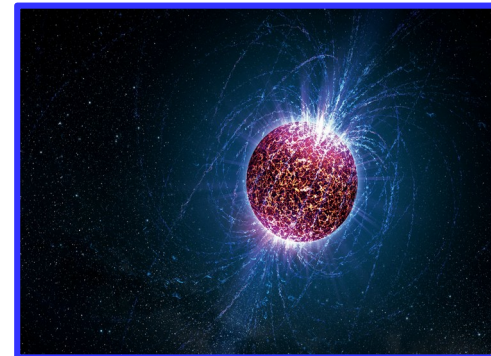
Fusión de un sistema binario



Supernova



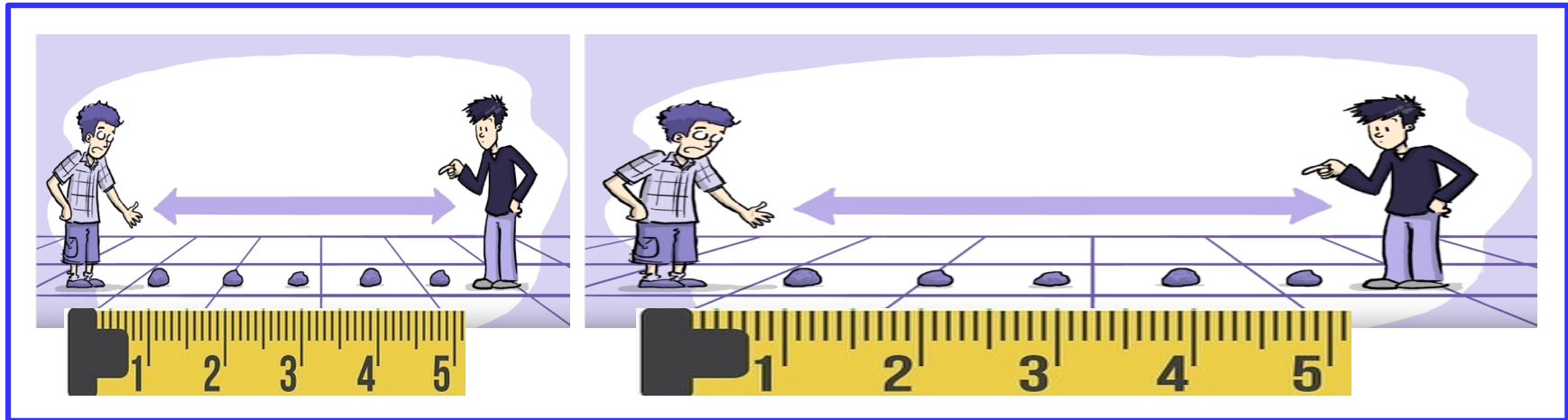
Estrella de Neutrones en rotación



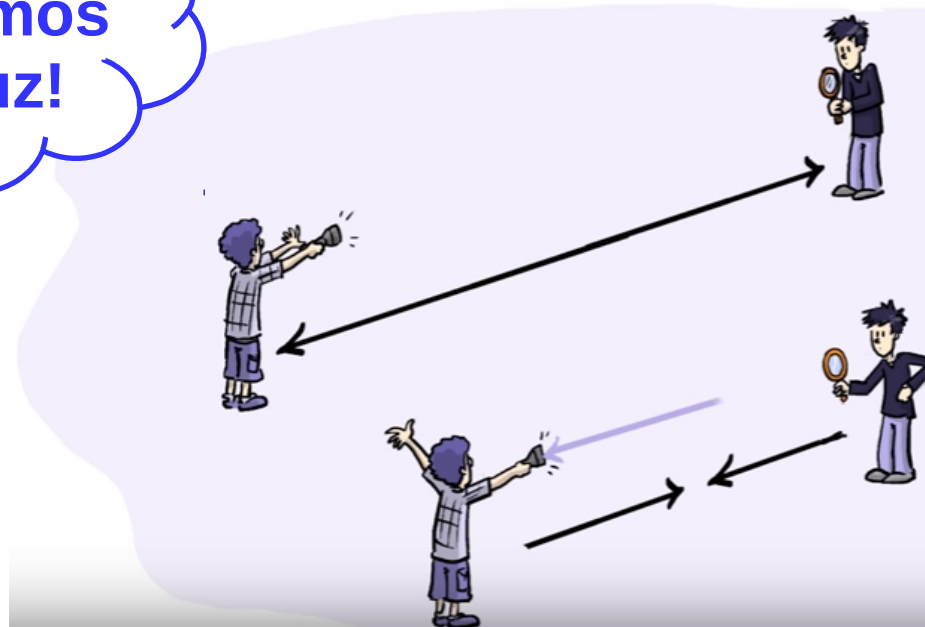
# Principio de detección

# ¿Cómo se detectan?

→ No podemos usar un metro → ¡sufre también los efectos de la OG!



¡Usemos  
la luz!



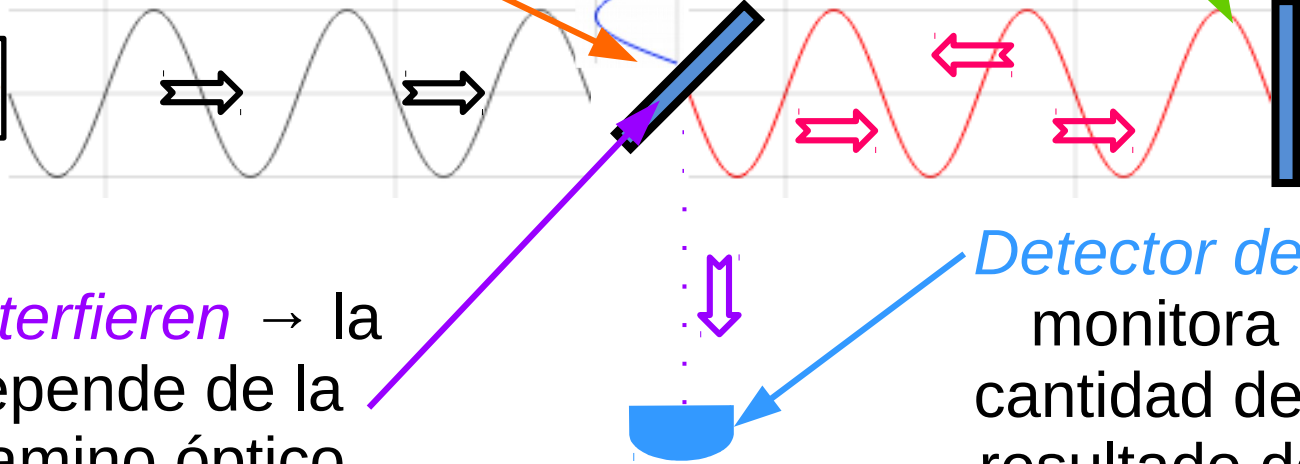
¡El tiempo que  
tarda la luz a  
recorrer la  
distancia entre  
las dos  
personas  
cambia!



# Interferómetro de Michelson

- Efecto diferencial → **Interferómetro de Michelson**
- Caída libre → **Espejos suspendidos**

El rayo se divide en dos idénticos gracias a un *divisor de haz*



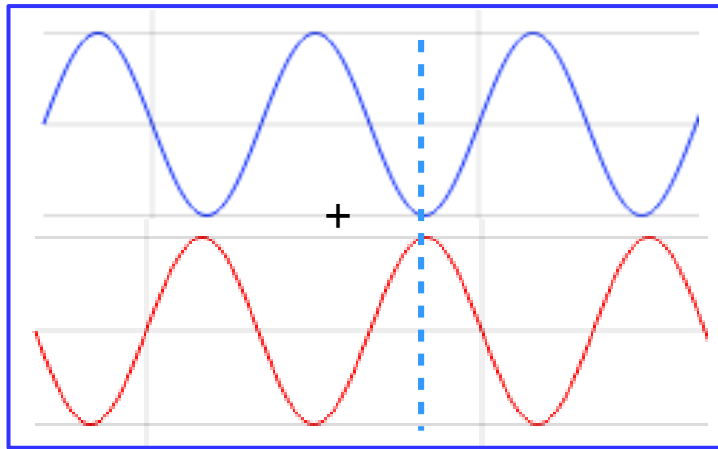
Ambos rayos son *reflejados por un espejo*, volviendo al divisor de haz

*Los dos rayos interfieren* → la interferencia depende de la diferencia de camino óptico recorrido

*Detector de luz* monitorea la cantidad de luz resultado de la interferencia

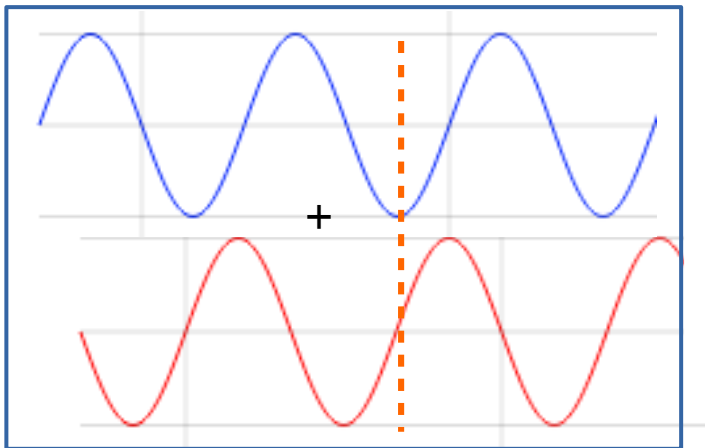
# Interferencias

- Si los dos “brazos” del interferómetro son **igual de largos**



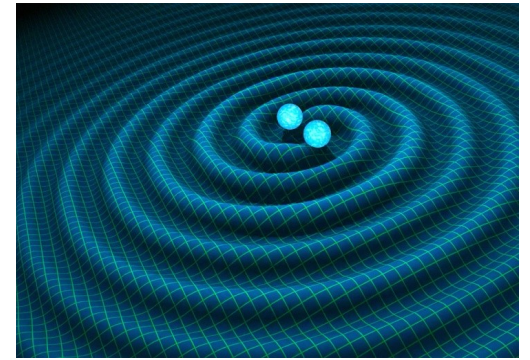
Los dos haces están en **oposición de fase** y se **cancelan** perfectamente → **no hay luz en el detector**

- Si hay **un brazo más largo que el otro**

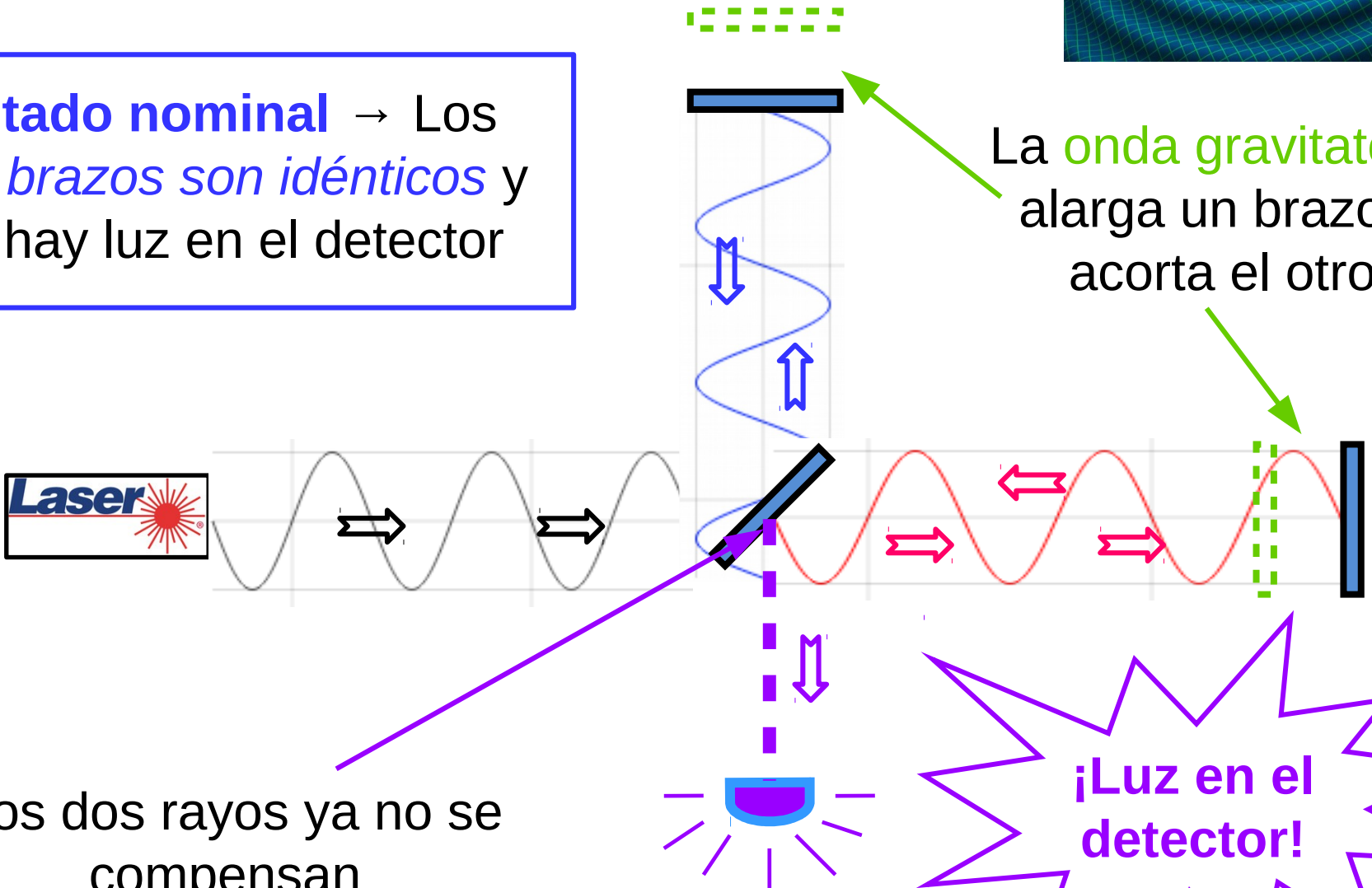


La **suma** de los dos haces es **distinta de cero** → **algo de luz se filtra al detector**

# Principio de detección



**Estado nominal** → Los *dos brazos son idénticos* y no hay luz en el detector



# Punto de trabajo

→ Cuando pasa una **onda gravitatoria** → vemos un cambio en la cantidad de luz detectada (Potencia),  $\delta P_{det}$

¿Cuál es el punto de trabajo ideal ?

→ **Objetivo:** alcanzar la **sensibilidad máxima** → *maximizar la SNR* en el detector

**Sensibilidad** → mínima amplitud de una OG detectable,  $h$

**SNR** = Relación señal/ruido

**Factor limitante:**

→ **Ruido shot:** ruido fundamental, consecuencia del *carácter cuántico de la luz* → fluctuaciones estadísticas en el número de fotones detectados

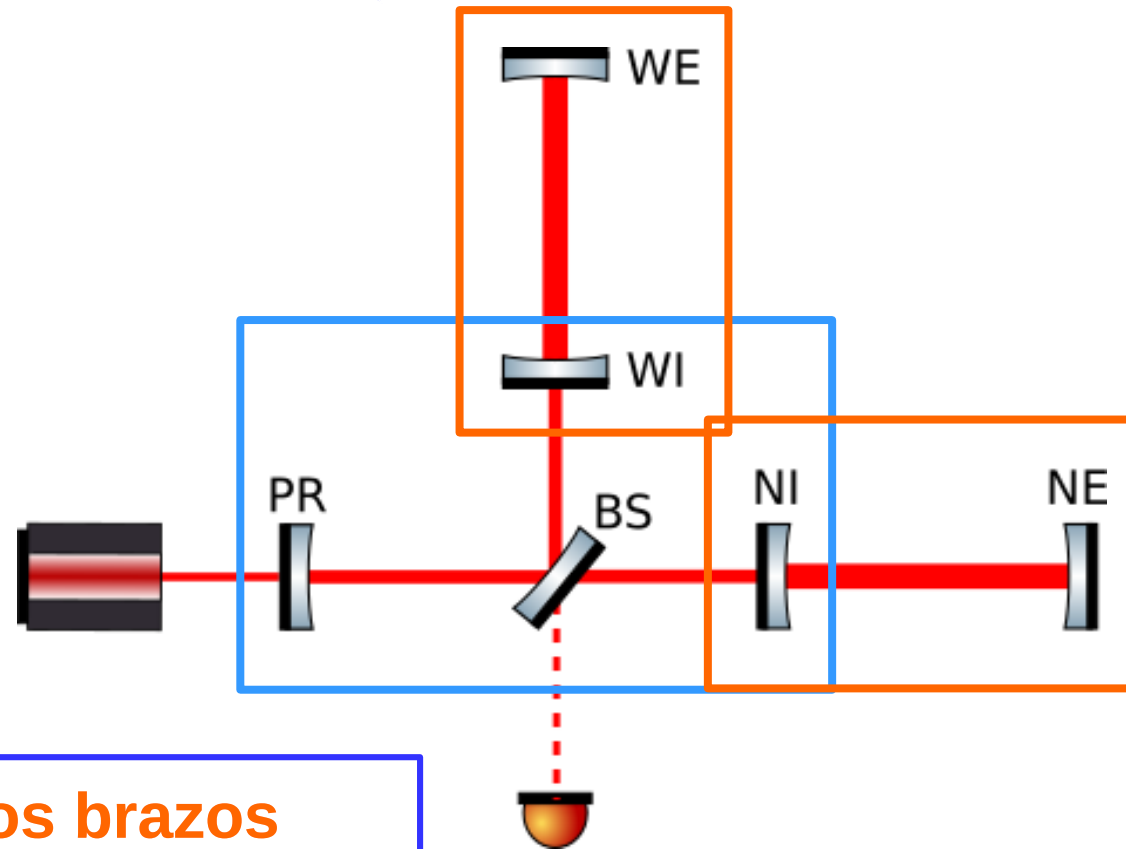
# Aumento de la sensibilidad

Michelson de laboratorio  
no es lo bastante  
sensible  $\rightarrow h \sim 10^{-17}$

$$h_{\text{shot}} \propto 1 / (L \cdot \sqrt{P})$$

## MEJORAS:

- 1) **Cavidad Fabry-Perot en los brazos del Michelson (3 km)**  $\rightarrow$  aumento del camino óptico
- 2) **Cavidad de reciclaje de la potencia**  $\rightarrow$  aumenta la potencia en circulación



3  
Cavidades  
ópticas  
suspendidas y  
acopladas

# Cavidad Fabry-Perot

→ Resonador óptico: obliga a la luz a permanecer confinada

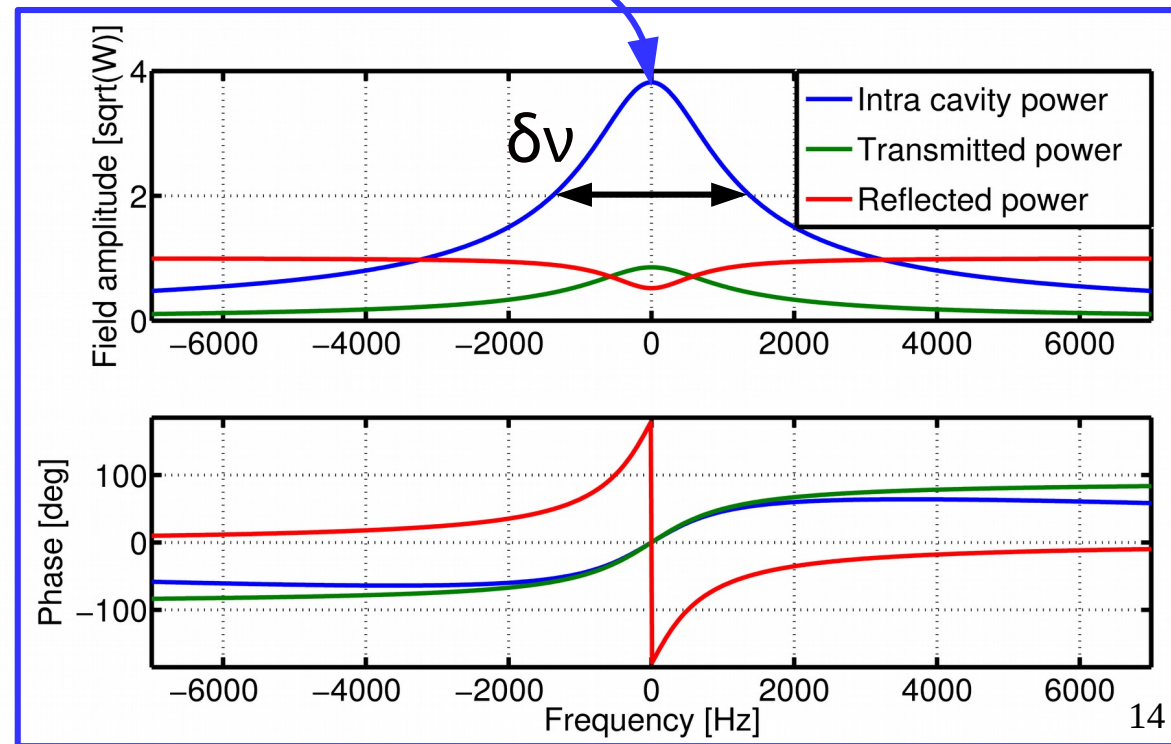
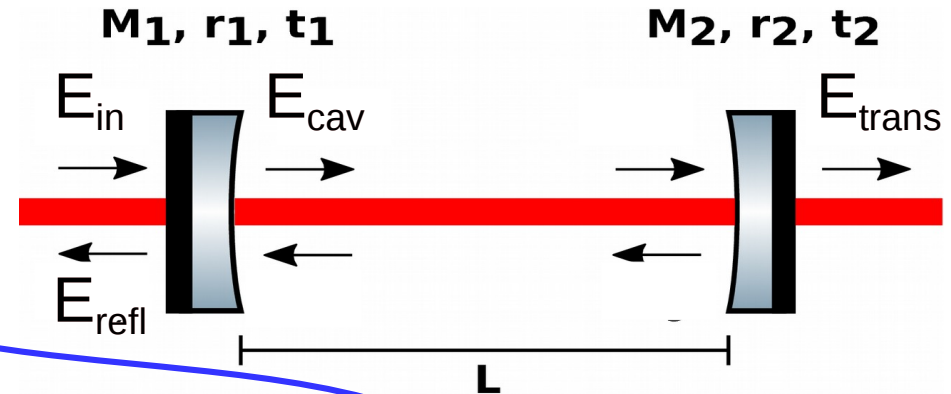
→ **Resonancia:** máxima potencia resonando en la cavidad

$$\delta\Phi \propto ( \nu \cdot \delta L + L \cdot \delta\nu )$$

→ **Finesse:** cuantifica el factor de calidad de la cavidad

$$P_{\text{cav}} / P_{\text{in}} \approx 2 \cdot \mathcal{F} / \pi$$

Cavidades  
de AdV  $\mathcal{F} =$   
450



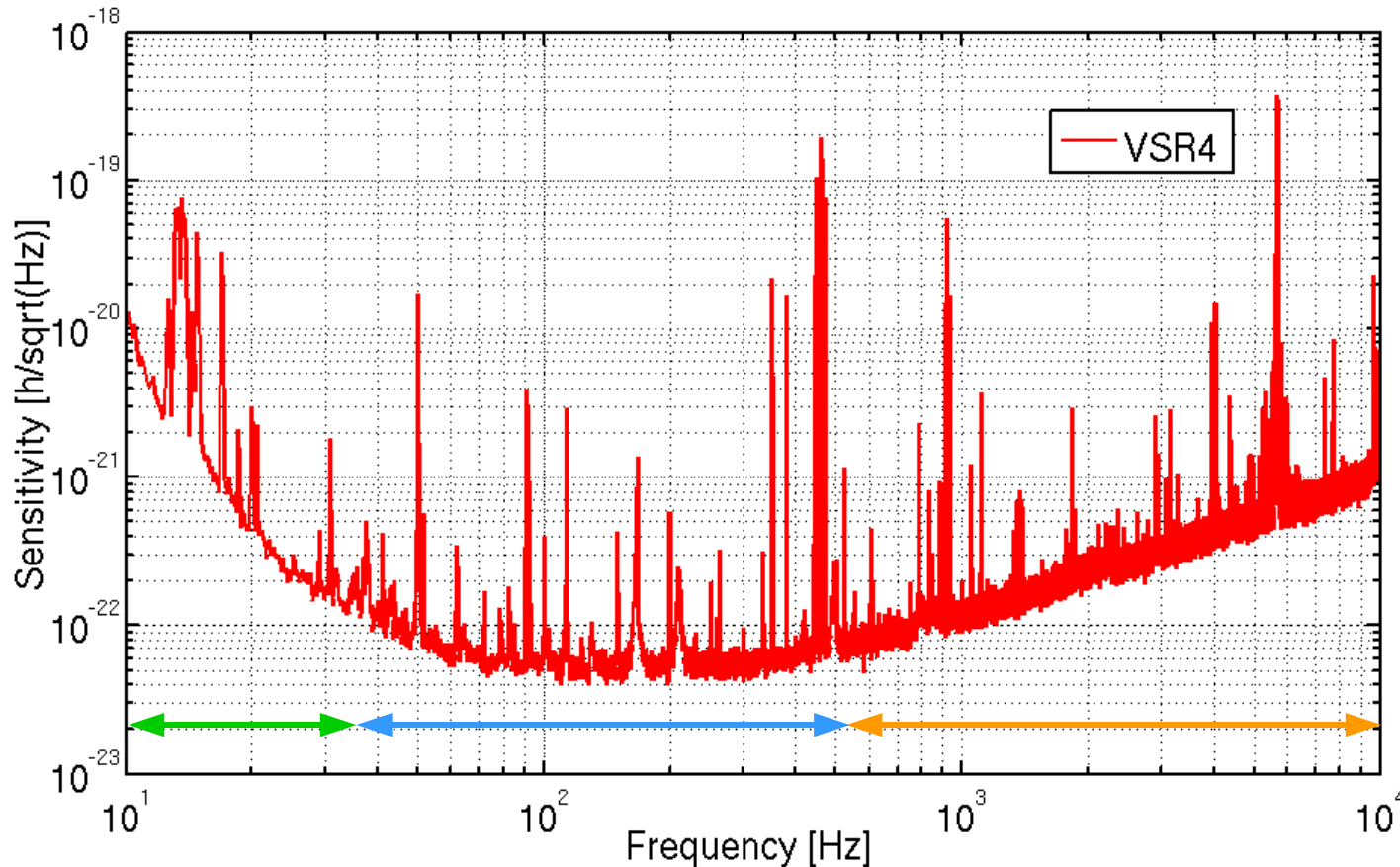
# Mitigación del ruido

# Ruidos fundamentales

→ Mejor curva de sensibilidad de Virgo inicial (2011) → *limitada por ruidos fundamentales!*

Ruido térmico (recubrimiento)

Ruido térmico (suspensiones)



Ruido shot

→ **Ruido térmico:** provocado por el *movimiento browniano de las moléculas* a temperatura ambiente



# Ruidos técnicos

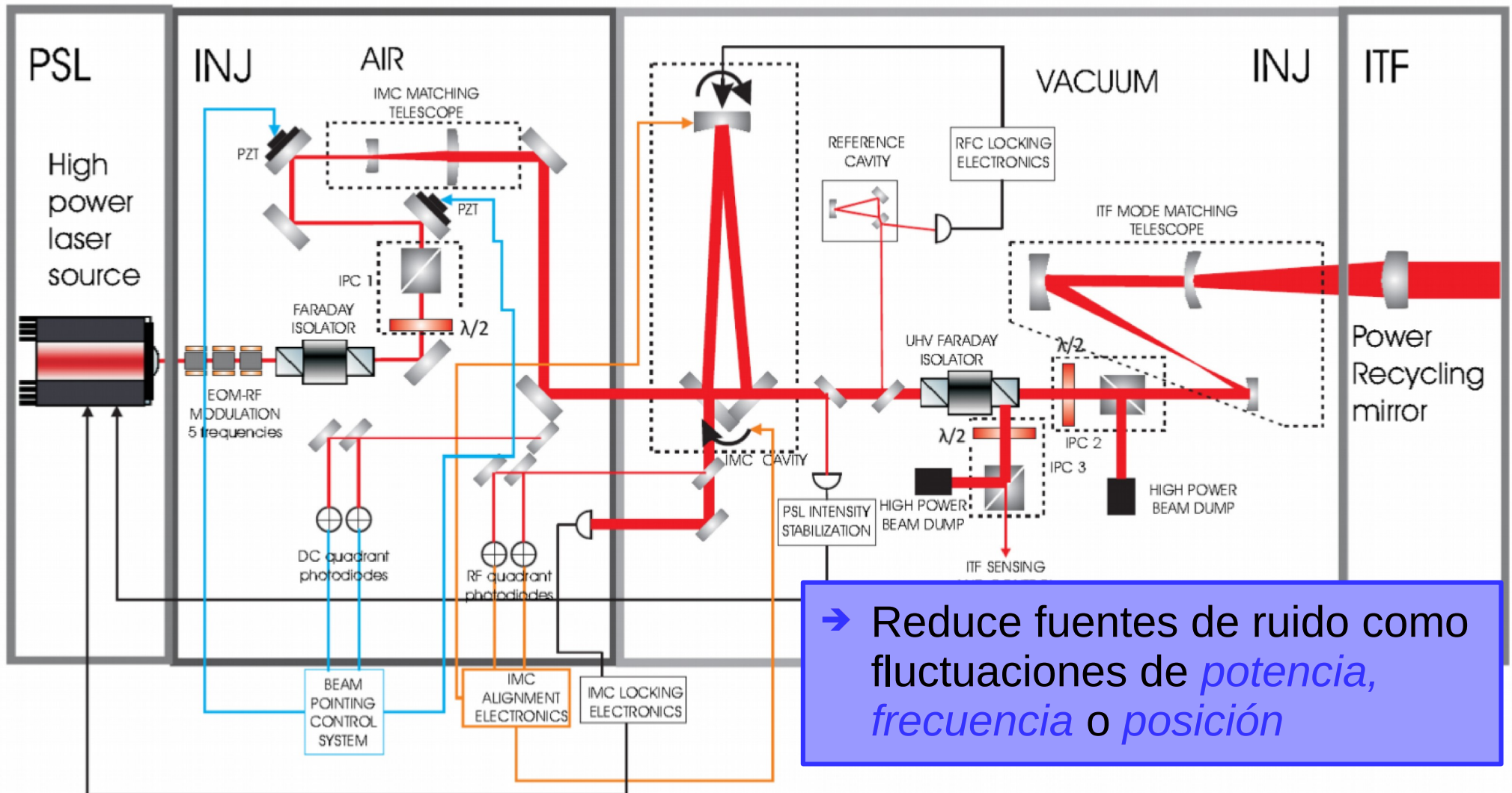
- El objetivo es *medir una diferencia de longitud de  $\sim 10^{-18}$  m* → casi cualquier fuente de ruido se convierte en limitante
- Para Virgo se han desarrollado técnicas extremas para *mitigar las distintas fuentes de ruido:*

- **Ruido sísmico:** a baja frecuencia el movimiento terrestre sería dominante →  $10^{12}$  de atenuación a partir de 10 Hz
- **Fluctuaciones de presión:** es necesario trabajar en vacío →  $P = 10^{-9}$  mbar
- **Fluctuaciones del láser:** necesario un rayo láser estable (v, alineamiento, P...) y “limpio” (alto contenido de TEM00)
- **Calidad de los espejos:** baja rugosidad →  $10^{-10}$  m RMS

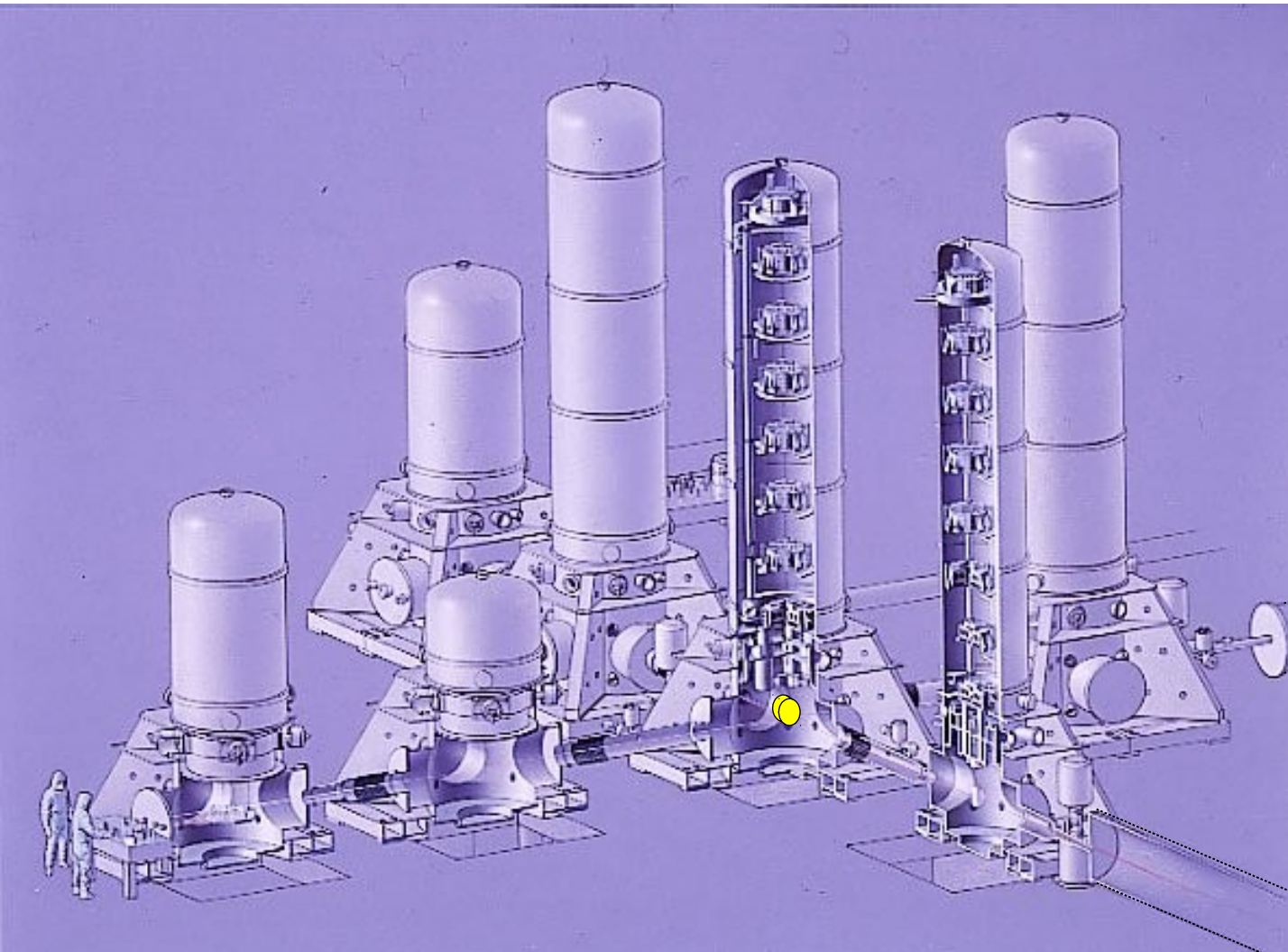
→ ...

# Sistema de Inyección

- Emisor láser @ 1064nm (Nd:YAG), emisión continua
- Sistema muy complejo para adaptar el tamaño, la posición y la potencia mandada al ITF



# Sistema de vacío



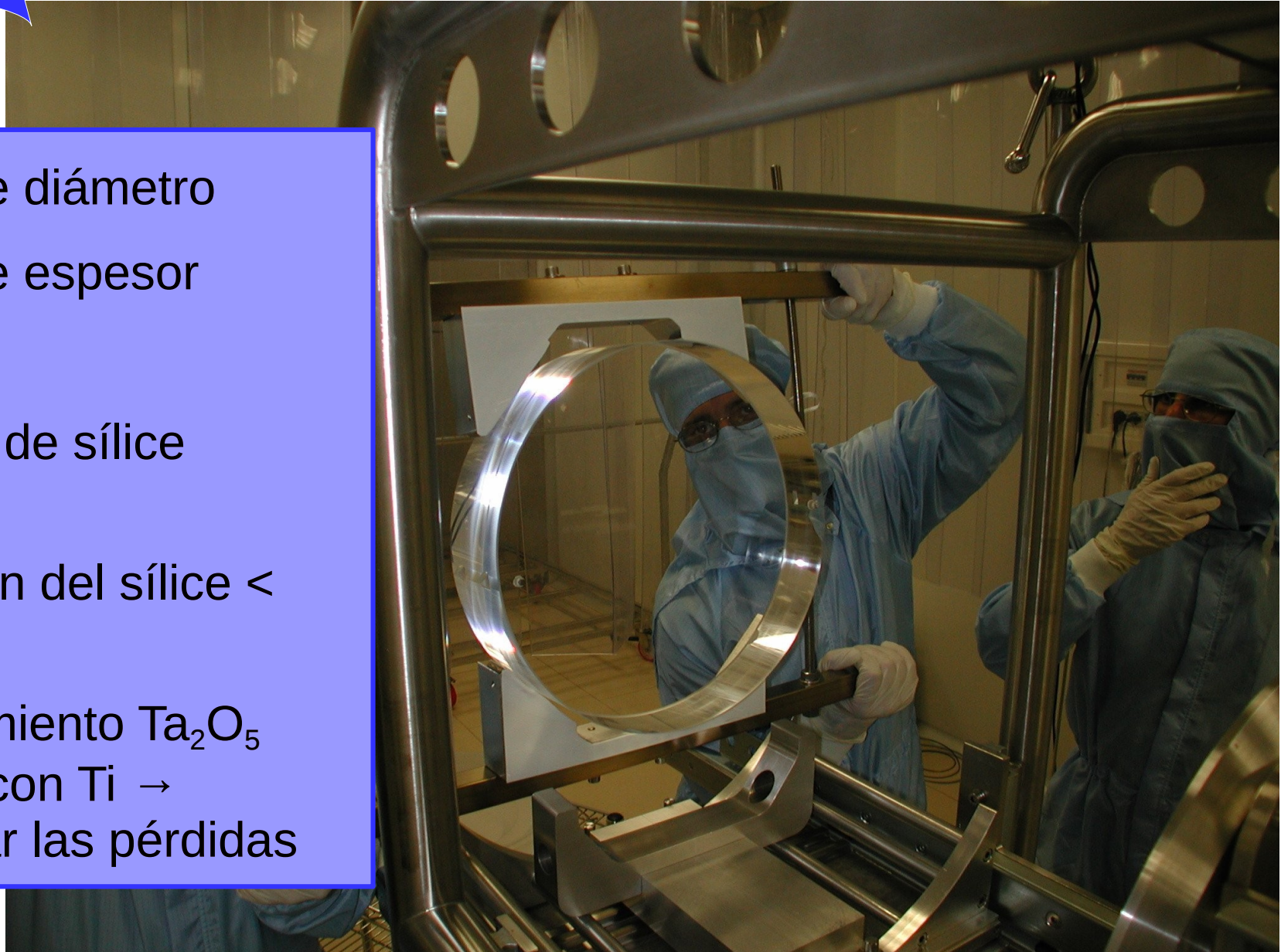
→ Hay 7000m<sup>3</sup> de vacío → es el mayor sistema de ultra-vacío de Europa

Tubo Ovest  
3 km

Tubo Nord  
3 km

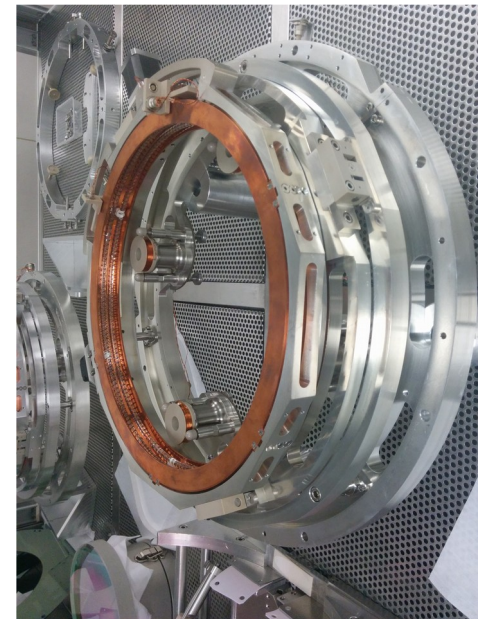
# Espejos

- 35 cm de diámetro
- 20 cm de espesor
- 42 kg
- Sustrato de sílice fundida
- Absorción del sílice < 1ppm
- Recubrimiento  $Ta_2O_5$  dopado con Ti → minimizar las pérdidas



# Sistema de Compensación Térmica

- El rayo láser calienta los espejos provocando un cambio en el índice de refracción → **lente térmica**
- Este efecto puede deformar el rayo → Compensación Térmica
- Dos mecanismos de compensación:
  - **Ring Heater** → induce una lente divergente, calentando la parte externa de los espejos
  - **Double Axicon System** → induce una lente convergente = imita el efecto del laser principal

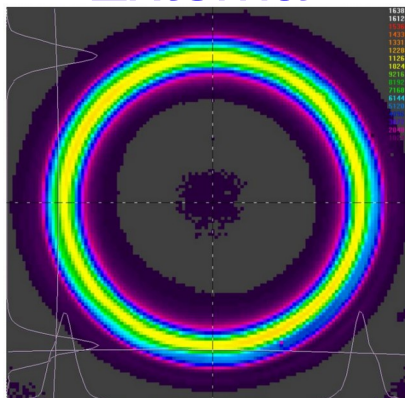


Ring Heater

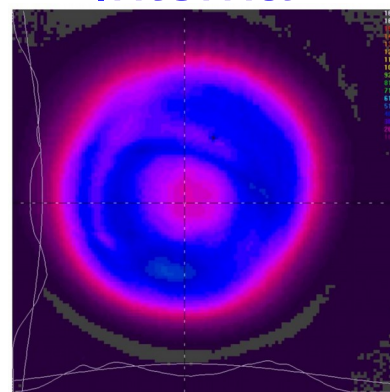


Axicon

External



Internal



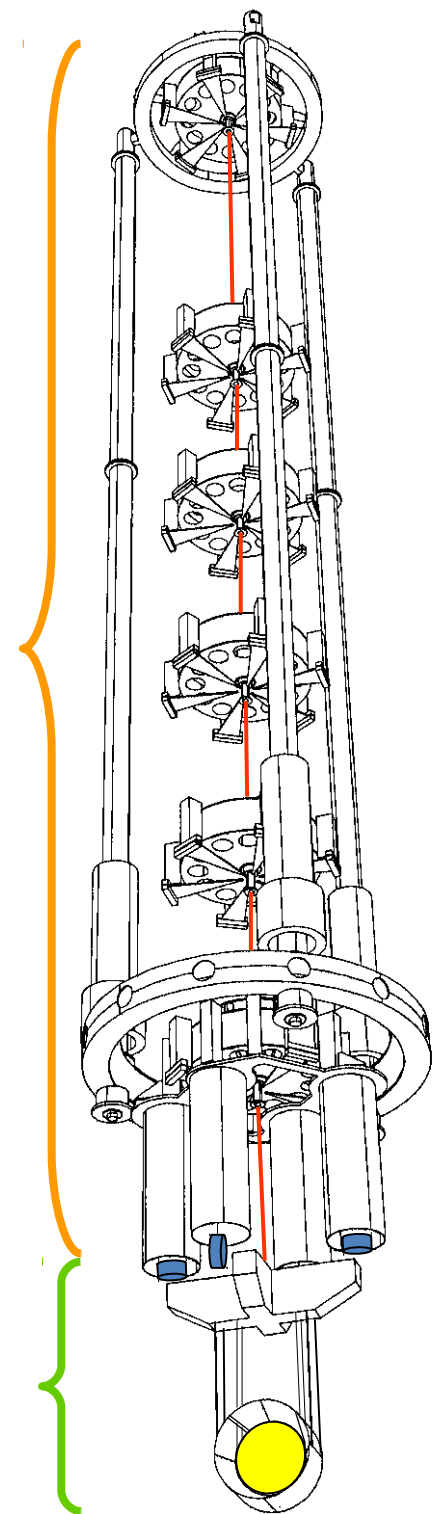
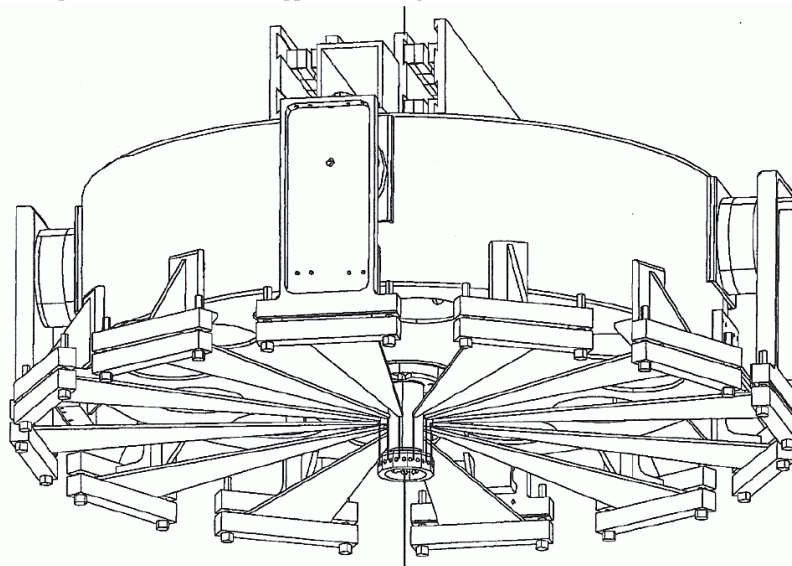
# Fibras monolíticas



- Las fibras usadas para suspender los espejos también en sílice fundida
- Su diámetro es de  $400\ \mu\text{m}$ !

# Superatenuadores

- Tienen ~9m de altura
- **Parte superior:** seis filtros mecánicos + péndulo invertido
  - Factor de atenuación total es la multiplicación de cada uno,  $(f/f_0)^2$
- **Parte inferior:** Marionetta + Espejo
  - Se controlan usando la interacción Electromagnética (parejas bobina-imán)



# Movimiento residual

## OBJETIVO:

Mantener el interferometro en su punto de trabajo:  
Dark Fringe + Cavidades en resonancia

## PROBLEMA:

- El ruido sísmico residual mueve los espejos longitudinal ( $\sim 1\mu m$  rms,  $\sim 1\mu m/s$ ) y angularmente → el punto de trabajo de cada grado de libertad se cruza de forma aleatoria
- **Un control activo** es necesario para mantener el interferómetro en el punto de trabajo
  - 4 grados de libertad longitudinales (distancias) + estabilización en frecuencia (láser)
  - 16 grados de libertad angulares (Cavidades, PR, BS y rayo de ingreso)



# Grados de libertad longitudinales

## Punto de trabajo

- **Cavidades largas** y **PRC** → Resonancia
- **Michelson** → Dark Fringe



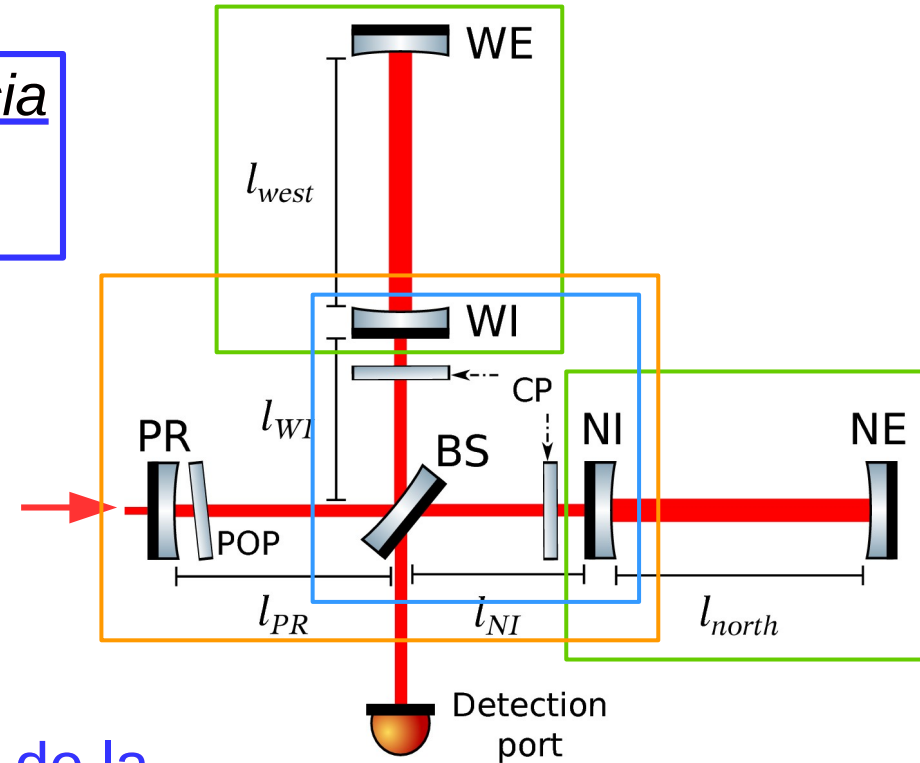
## Grados de libertad longitudinales

$$CARM = \frac{l_{north} + l_{west}}{2}$$

$$DARM = \frac{l_{north} - l_{west}}{2}$$

$$MICH = l_{NI} - l_{WI}$$

$$PRCL = l_{PR} + \frac{l_{NI} + l_{WI}}{2}$$



Estimación de la  
precisión  
necesaria



→ **CARM** ~  $4 \cdot 10^{-14}$  m

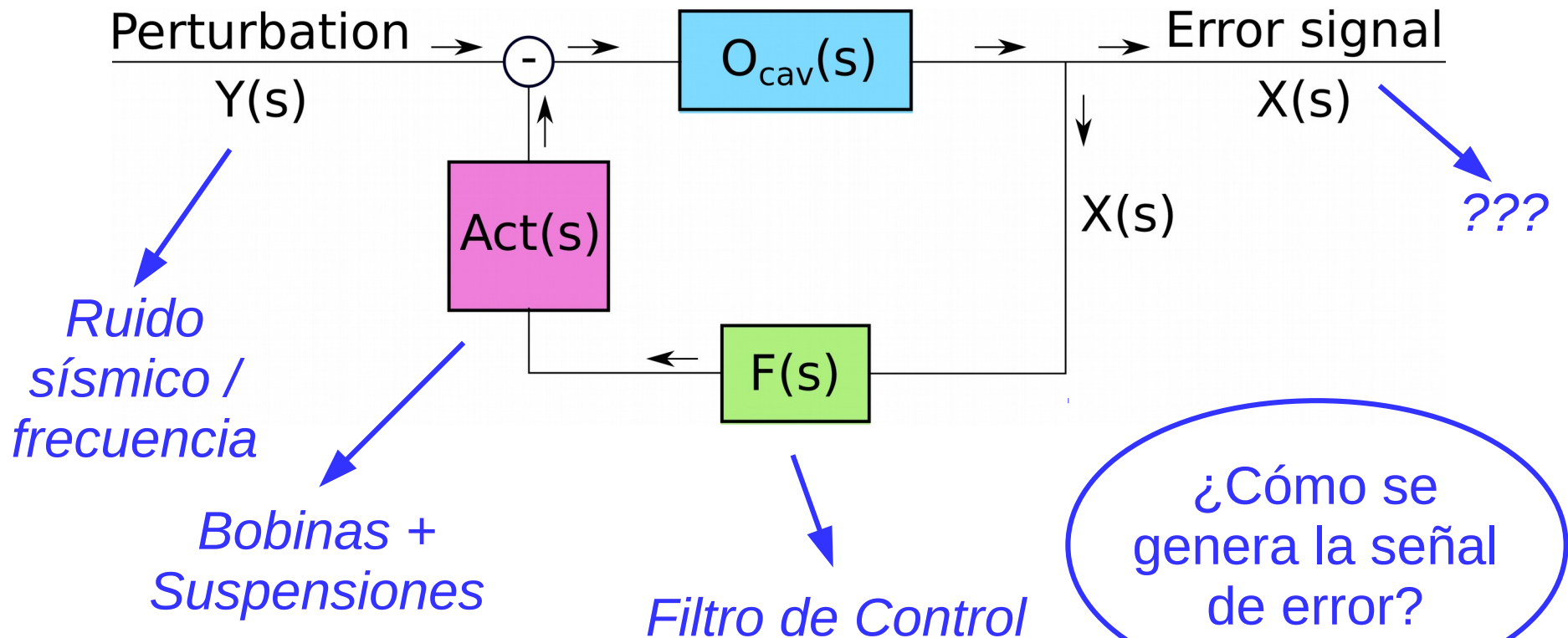
→ **DARM** ~  $6 \cdot 10^{-12}$  m

→ **MICH** ~  $2 \cdot 10^{-9}$  m

→ **PRCL** ~  $7 \cdot 10^{-11}$  m

# Control activo: retroalimentación

Los sistemas de control están compuestos de: **Sistema** → Señal de error → **Filtro de control** → **Corrector** → **Sistema**



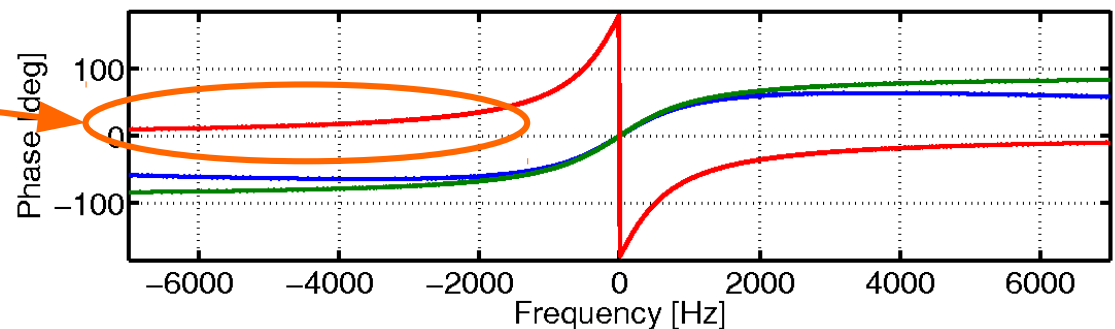
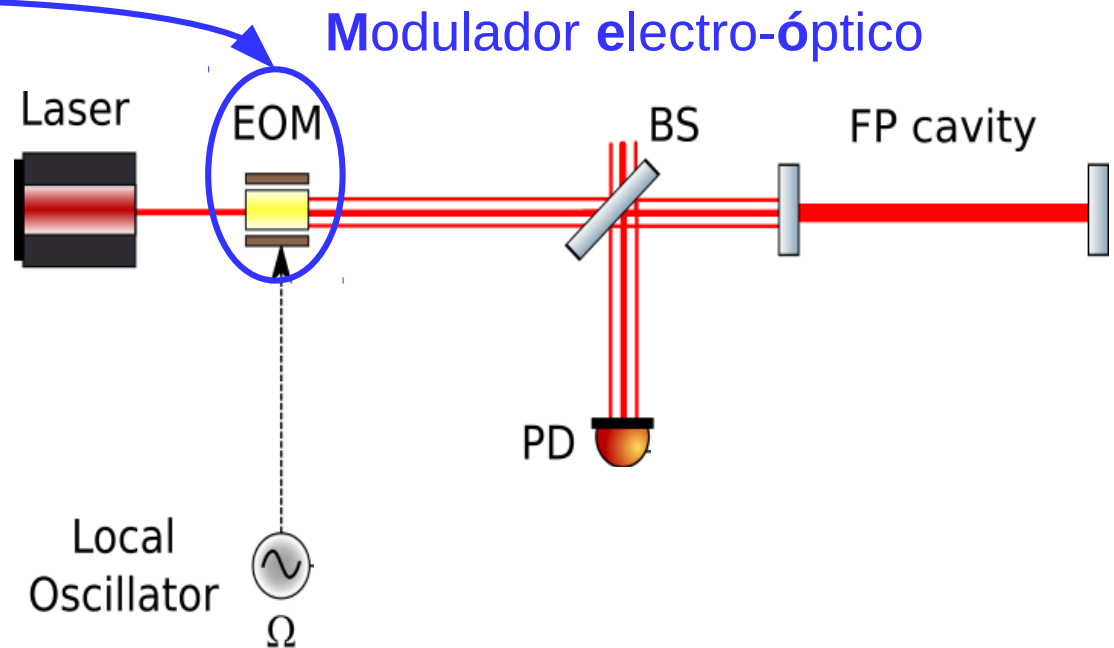
# Técnica Pound-Drever-Hall (PDH)

→ **Señal de error:** proporciona información continua sobre cuánto de lejos está la cavidad de la posición de resonancia.

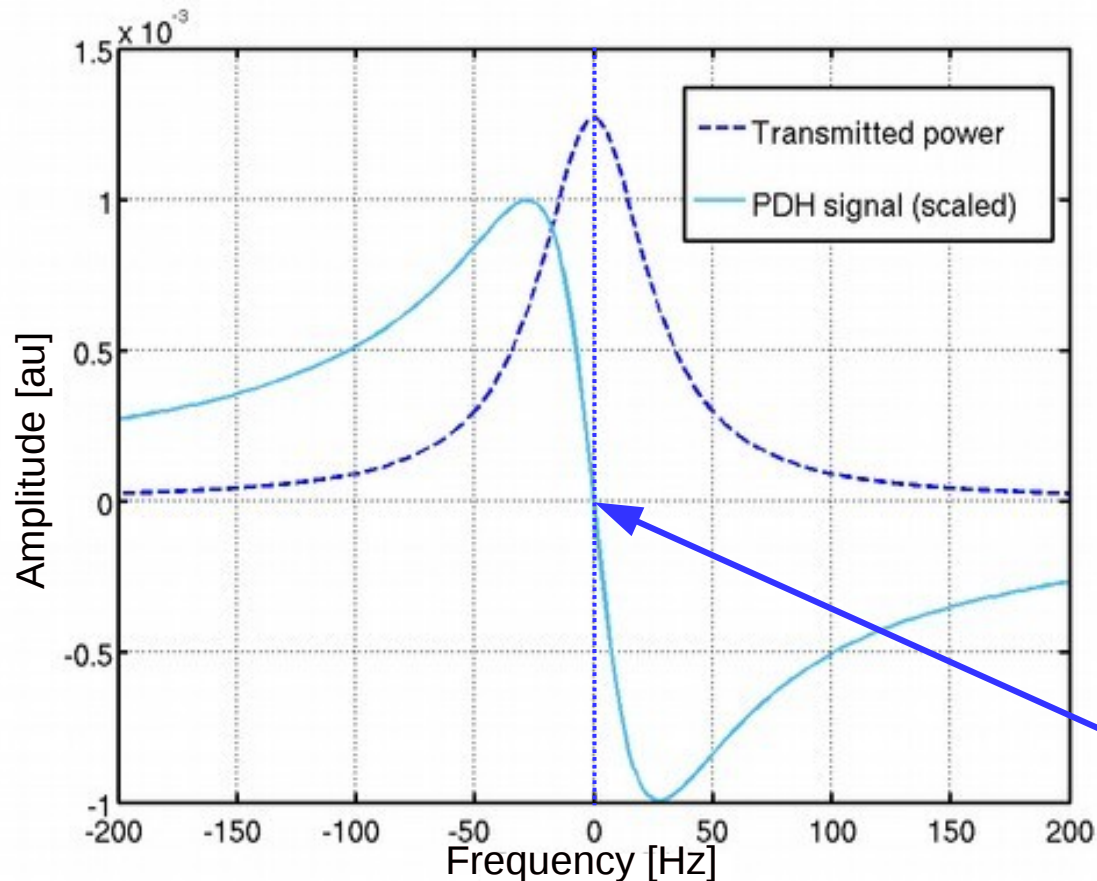
→ **Modulación de fase:** crea bandas laterales alrededor de la freq. fundamental ( $\omega_0$ ) a  $\pm$  la freq. de modulación,  $\Omega$ .

→ **Señal de error** → *batimiento* entre la freq. fundamental y las *bandas laterales no-resonantes*

**¡Referencia de fase!**



# Señal de error: PDH

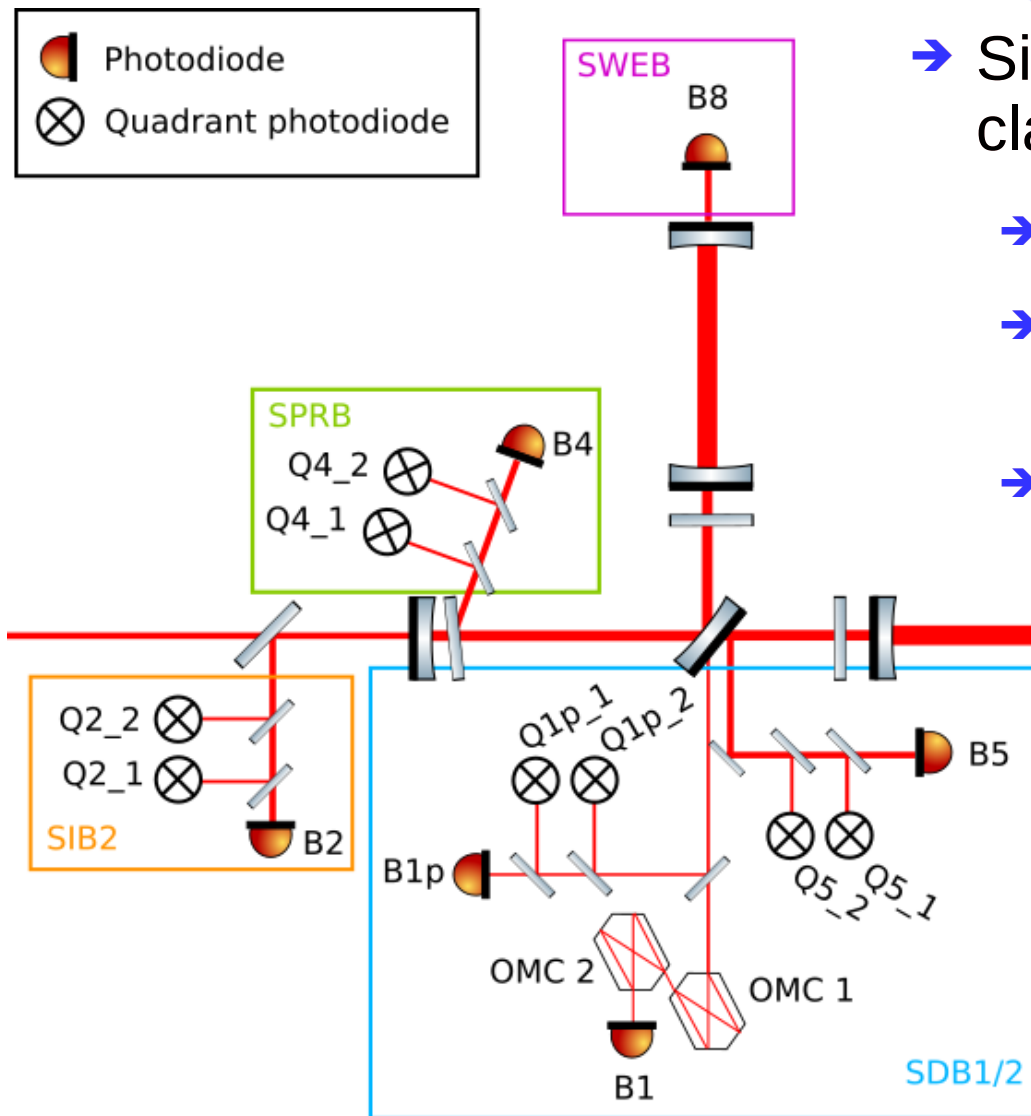


## Buena señal de error:

- *Linear* en torno al punto de trabajo
- *Bipolar*
- *Cruza cero* en la resonancia

Punto de trabajo

# Sistema de detección



→ Sistema de monitoraje en los puntos clave del interferómetro

→ Fotodetectores

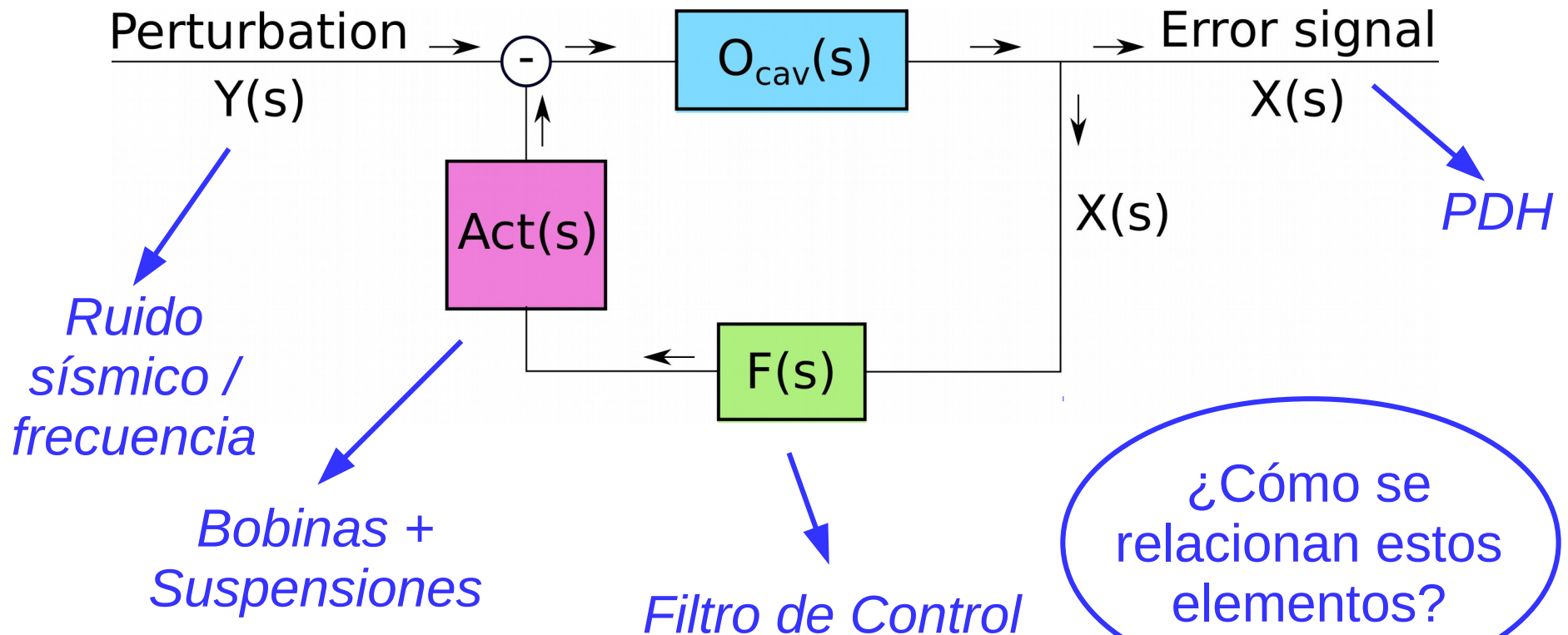
→ Fotodetectores segmentados (alineamiento)

→ Cámaras

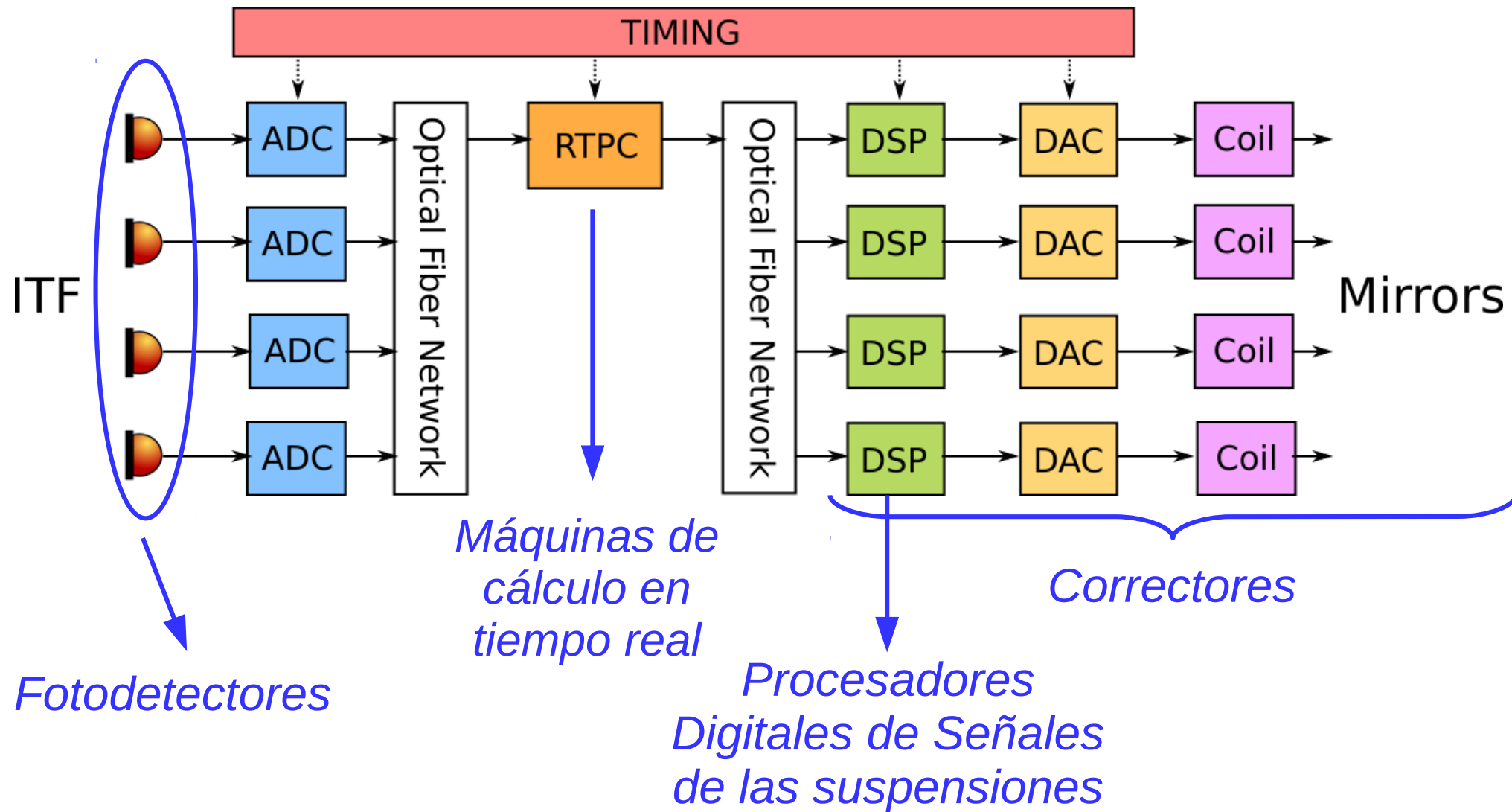
- ↓ Reducción de la luz difusa
- Bancos *suspendidos* y en *vacío*
  - Nuevo sistema de *baffles* en lugares estratégicos para *absorber la luz difusa*

# Control activo: retroalimentación

Los sistemas de control están compuestos de: **Sistema** → Señal de error → **Filtro de control** → **Corrector** → **Sistema**

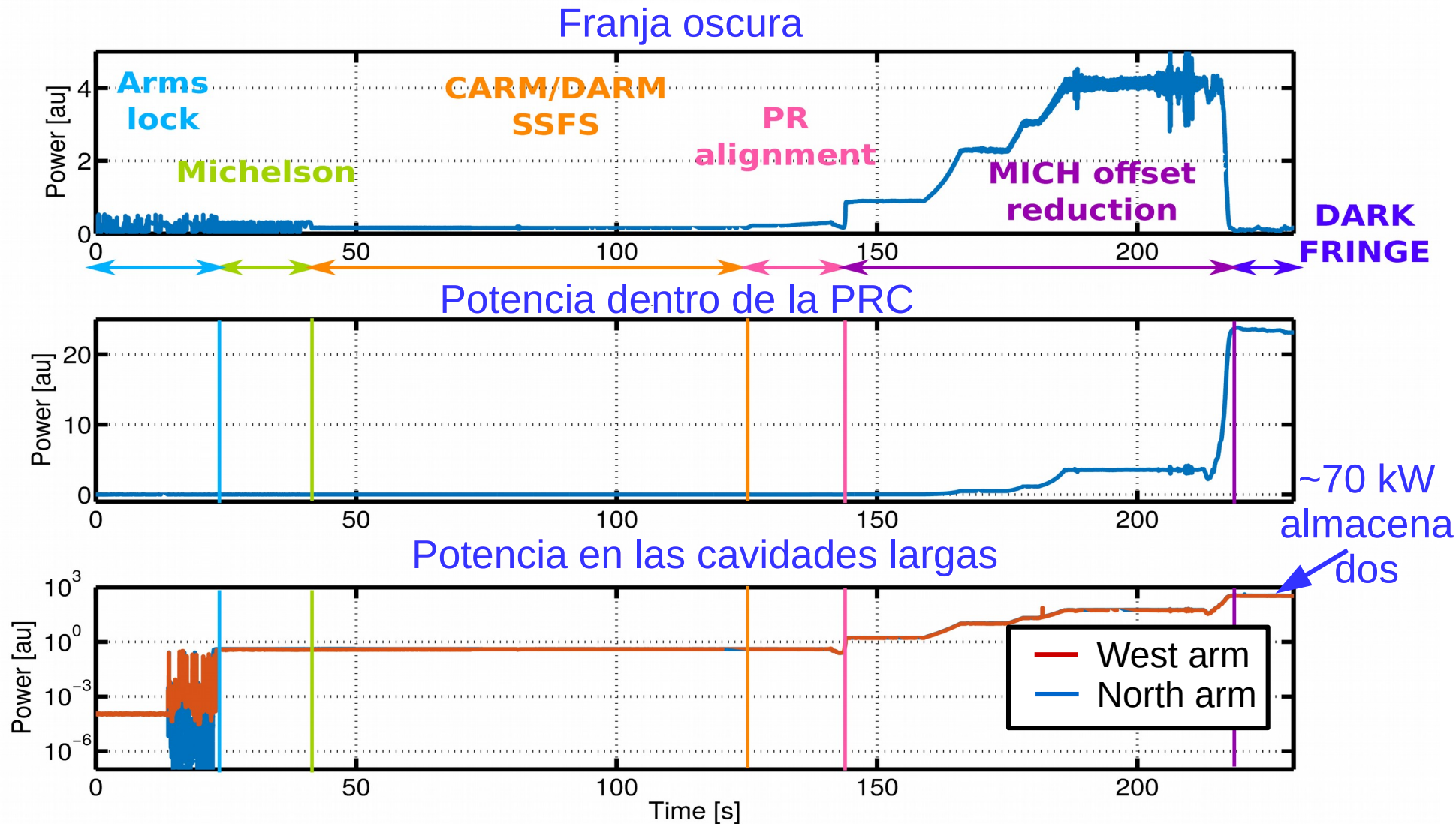


# Sistema de adquisición de datos



# Acquisición de control

- Es posible llevar el interferómetro a su posición de trabajo y mantenerlo durante largos periodos de tiempo (más de un día!)





# Puesta en funcionamiento

# El detector Virgo

- **1992:** El primer diseño de Virgo se entrega al INFN y al CNRS
  - **1997:** Inicio construcción
  - **2001:** Comienzo del commissioning de la parte central
  - **2004:** Inicio del commissioning del interferómetro completo
  - **2007-2011:** Cuatro tomas de datos científicas, VSR1-4
  - **2012:** Inicio del de-commissioning
- ➔ Desde entonces la colaboración se ha expandido: 7 países, 21 laboratorios, cerca de 280 miembros



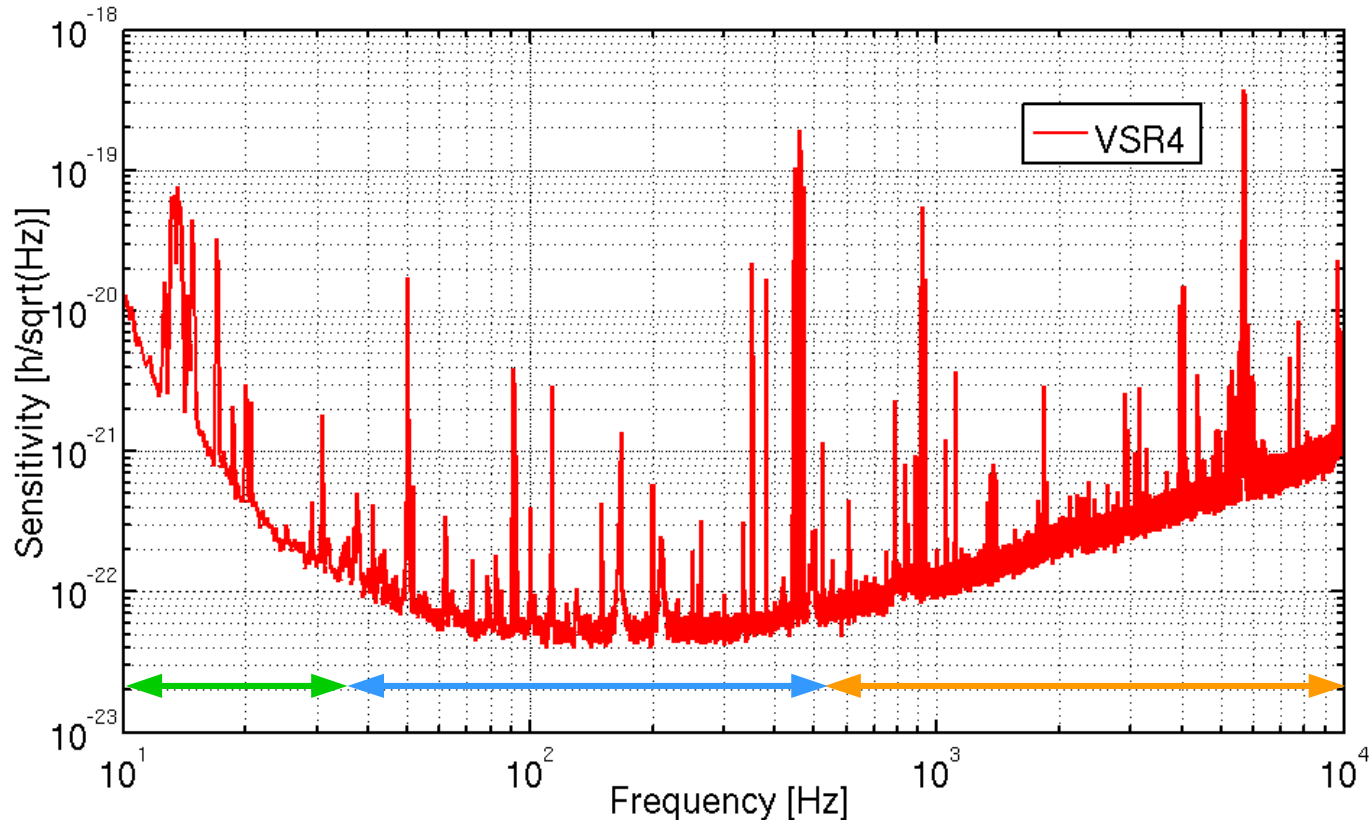
# 1<sup>a</sup> generación de detectores de OGs

- 1<sup>a</sup> generación sirvió para probar que la tecnología desarrollada era robusta y el funcionamiento el esperado
  - Ninguna detección → *interesantes observaciones astronómicas*
  - El objetivo de la 2<sup>a</sup> generación es mejorar la sensibilidad de un factor 10!

Ruido  
térmico  
(recubri  
miento)

Ruido  
térmico  
(suspens  
iones)

Julia Casanueva



Ruido  
shot

# Primera fase de Virgo Avanzado

## ⌵ Reducir el ruido térmico:

- Aumento de la *masa de los espejos*
- *Cambio de la geometría de las cavidades largas* → waist en el medio para aumentar el tamaño del rayo láser en los espejos

$$h_{\text{therm}} \propto 1 / (m \cdot w)$$

## ⌵ Reducir el ruido shot:

- *Aumento de la finesse* de las cavidades largas ~ 450 (un factor 3 más que en Virgo inicial)
- *Aumento de la potencia de ingreso*

# Desafíos del commissioning

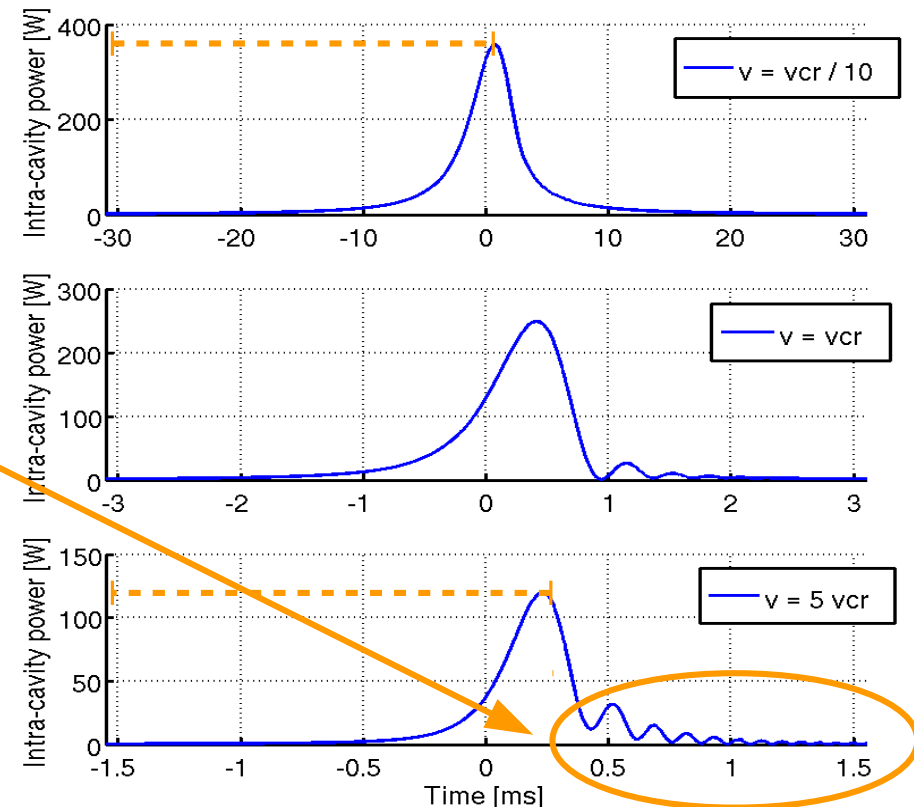
## → Aumento de la finesse de las cavidades largas

- Aparición de *efectos dinámicos* → el movimiento residual de los espejos no permite a la cavidad llenarse completamente

## → **SOLUCIÓN:** técnica especial de control → Guided Lock

## → Cambio de la geometría de las cavidades largas

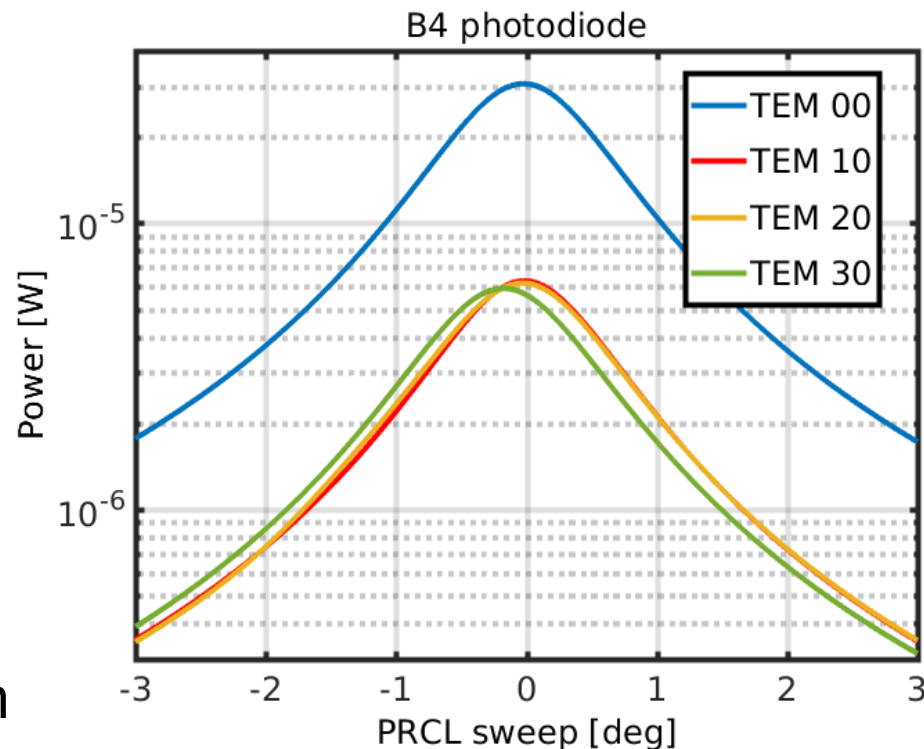
- Presencia de *presión de radiación* → re-diseño del control angular de los espejos



# Desafíos del commissioning

## → Cambio de la geometría de las cavidades largas

- La cavidad de reciclaje de potencia está muy cerca de la **inestabilidad** → En una *cavidad inestable ningún rayo gaussiano puede resonar*
- Cerca de la inestabilidad, una cavidad es casi **degenerada** → Modos transversales resuenan casi a la misma frecuencia → *Modo fundamental se degrada* en presencia de imperfecciones (matching, alineamiento, aberraciones...)



$$\delta\nu = 210\text{kHz}$$

$$\Delta\text{TEM} = 12\text{kHz}$$

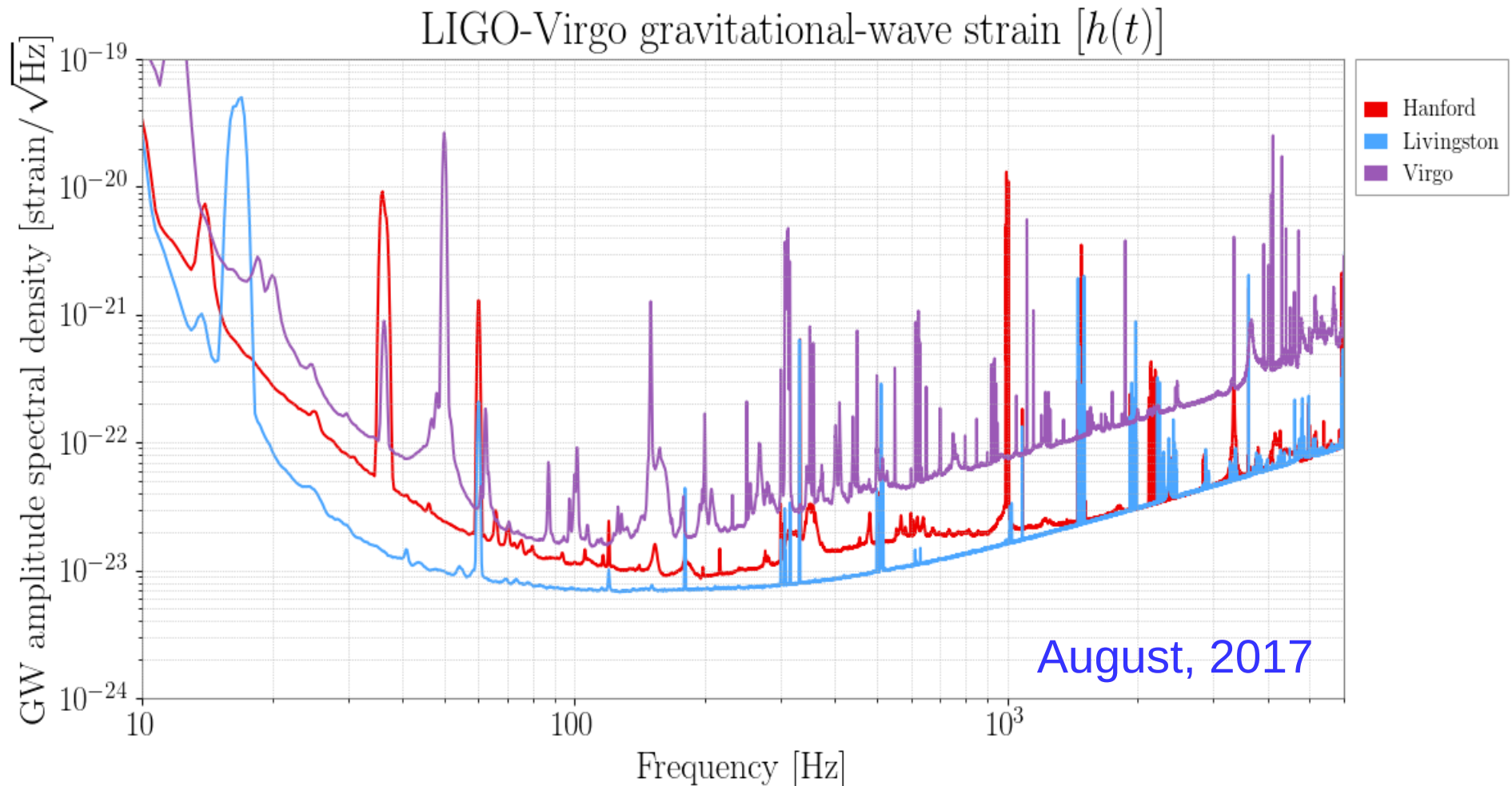
→ **SOLUCIÓN:** nuevo conjunto de señales de error poco sensibles a estos efectos

# Cronología de Virgo Avanzado



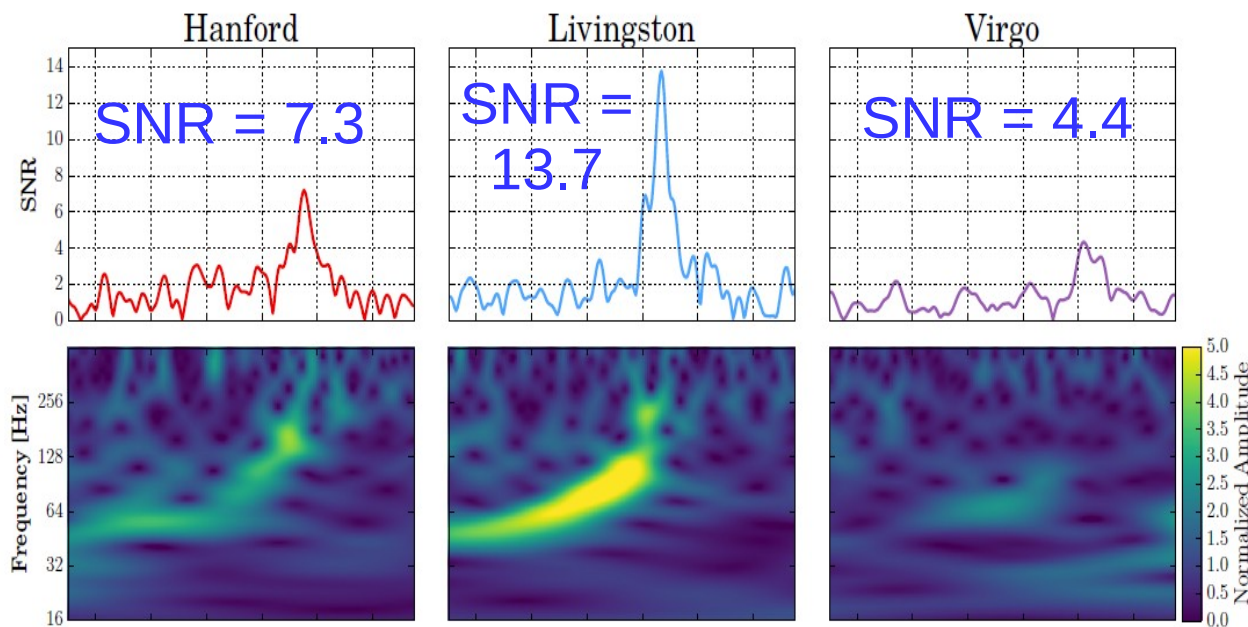
# Sensibilidad de Virgo Avanzado en O2

- Virgo avanzado se unió a los detectores Avanzados LIGO en la toma de datos O2 el 1 de Agosto de 2017 con *~80 % de ciclo útil* y *~26 Mpc de horizonte*





# Primera detección triple: GW170814



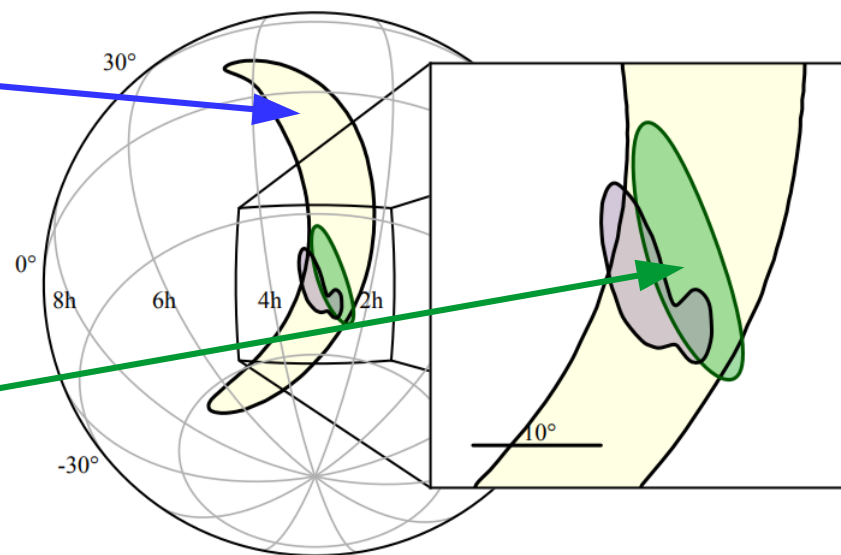
☞ Sistema binario de  
Agujeros Negros

☞ Distancia: 330-670 Mpc

☞ Masas iniciales: 27-36  
and 21-28  $M_{\odot}$

Localización en el cielo con los  
detectores LIGO sólo (1160 deg<sup>2</sup>)

Localización en el cielo  
con LIGO+Virgo (100 deg<sup>2</sup>)



# Red de detectores de OGs

*Futuros detectores*



- **Localización y estimación de parámetros** de los emisores → necesarios al menos 3 detectores

# Perspectivas

# Virgo Avanzado: segunda fase

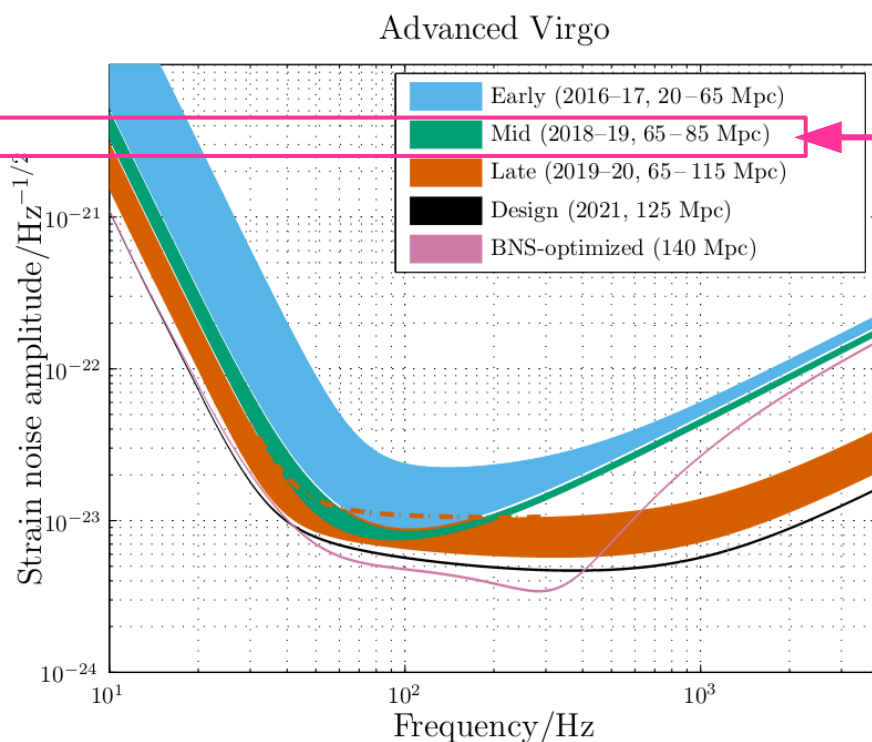
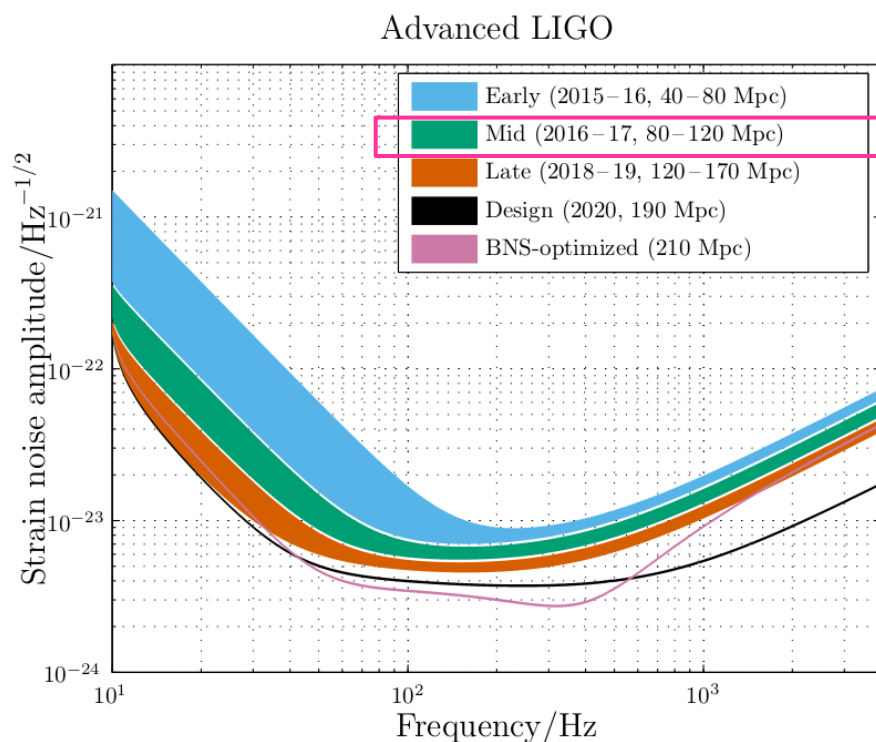
- Instalación / Commisisoning empezó en *septiembre de 2017*
- La toma de datos O3 está planificada para *febrero de 2019*

## ⏏ Reducir el ruido térmico:

- Instalar *fibras monolíticas*

## ⏏ Reducir el ruido shot:

- *Aumento de la potencia de ingreso*



# Futuras mejoras: detectores Advanced+

En **2022 se prevé alcanzar la sensibilidad de diseño** → hasta estar limitados por la infraestructura

✓ **Cavidad de reciclaje de señal:** recicla la señal provocada por una onda gravitacional

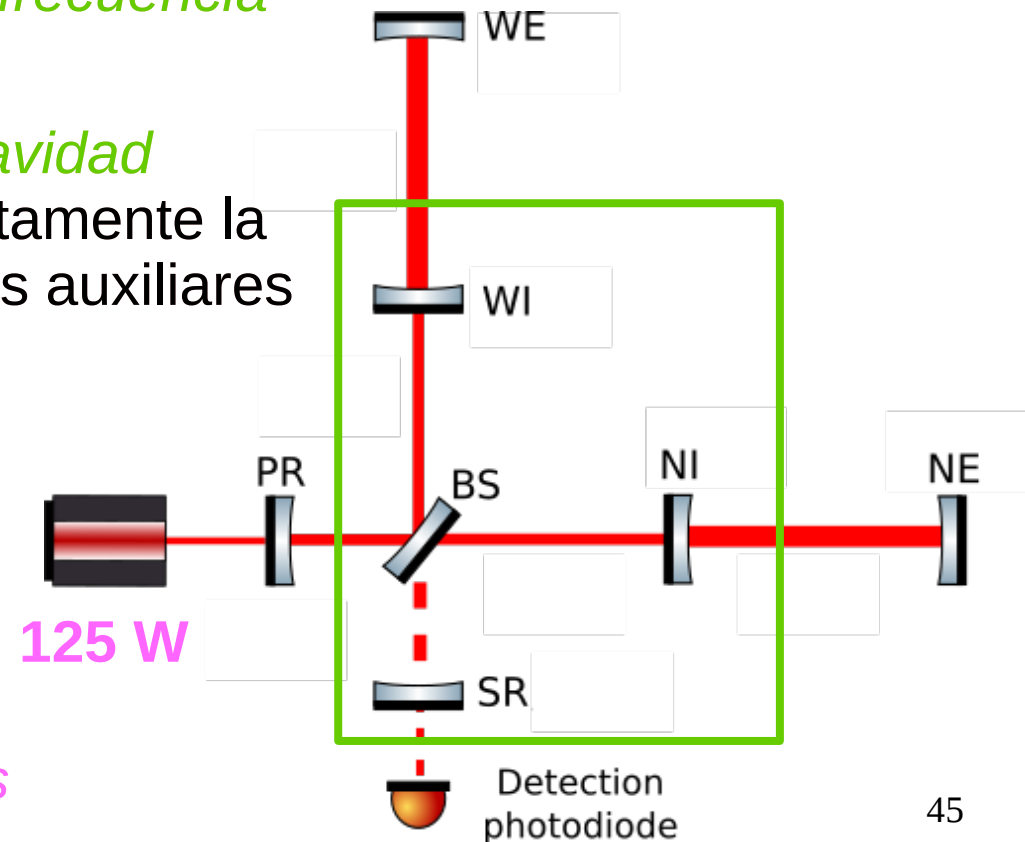
✓ Mejora la sensibilidad a *alta frecuencia* ( $>50\text{Hz}$ )

x Un espejo adicional = una *cavidad adicional* → cambiar completamente la estrategia de control: Lasers auxiliares

✓ **Laser alta potencia:** aumentar la potencia de ingreso a **125W**

✓ Disminuye el ruido shot → mejora la *alta frecuencia*

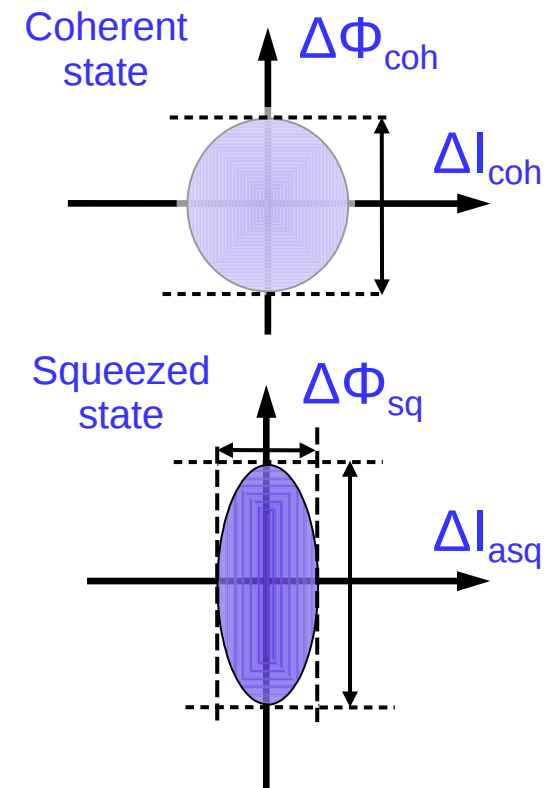
x *Presión de radiación* + *Efectos térmicos*



# Futuras mejoras: detectores Advanced+

## SQUEEZING:

- **Objetivo:** reducir el ruido cuántico actuando en las dos variables de la luz, **intensidad y fase**
- **Independiente de la freq.:** mejor a alta frecuencia pero empeora a baja frecuencia
- **Dependiente de la freq.:** permite optimizar ambas variables en el intervalo relevante



## NEWTONIAN NOISE:

- ⌚ **Transientes en el campo gravitatorio local** producen fuerzas newtonianas en los espejos → importantes por debajo de 10 Hz
- ⌚ **Una cancelación activa** está siendo estudiada → sensores son un punto clave



Continuará...