



Los desafíos tecnológicos del detector de ondas gravitatorias Virgo-Avanzado

Julia Casanueva
INFN Pisa

Índice

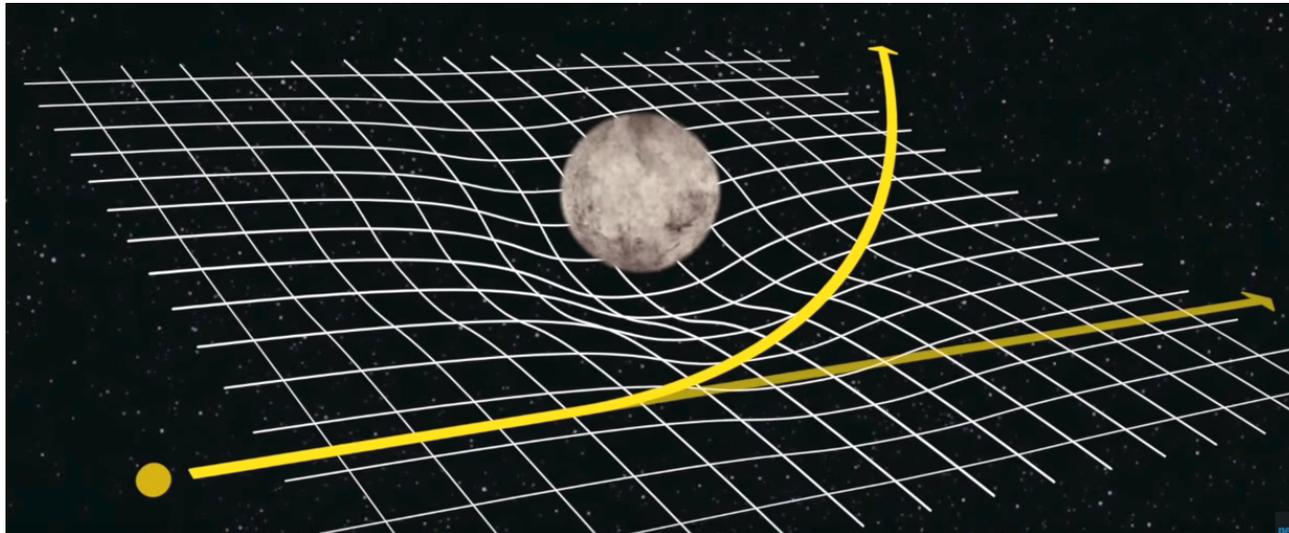


- Introducción
- Principio de detección
- Mitigación de ruido
 - Ruidos fundamentales
 - Ruidos técnicos
 - Presentación de los subsistemas y su rol en la mitigación de estos ruidos
- Puesta en funcionamiento
 - Histórico del detector Virgo
 - Commissioning de la primera fase de Virgo Avanzado
 - Primera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

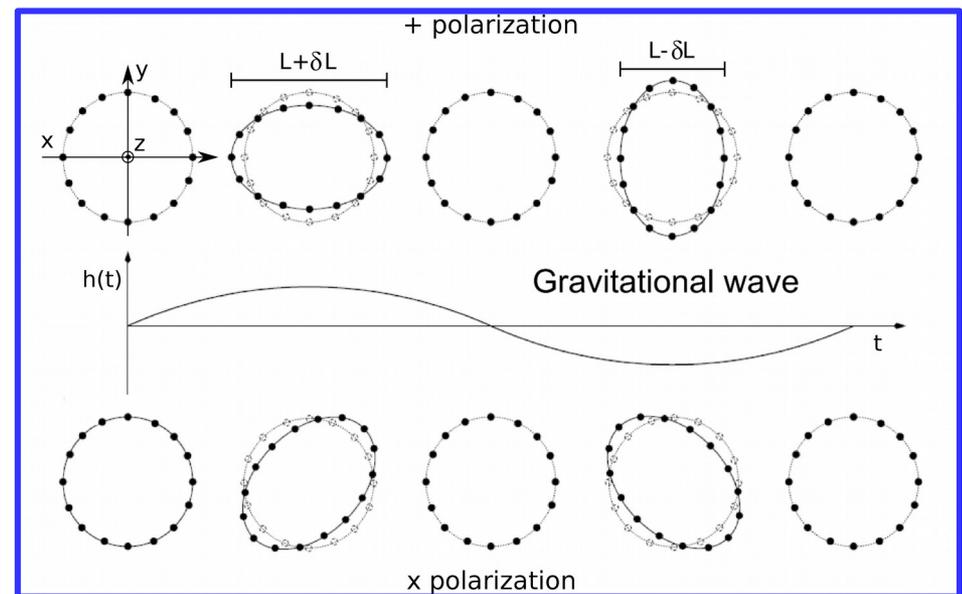
Masas que experimentan únicamente la interacción gravitatoria

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

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 $\frac{1}{r}$ →
 $h \sim 10^{-21}$

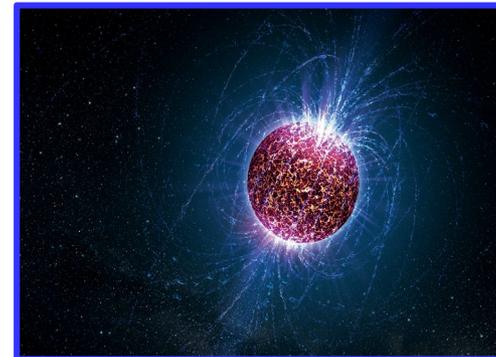
Algunos emisores interesantes para los detectores de OGs terrestres



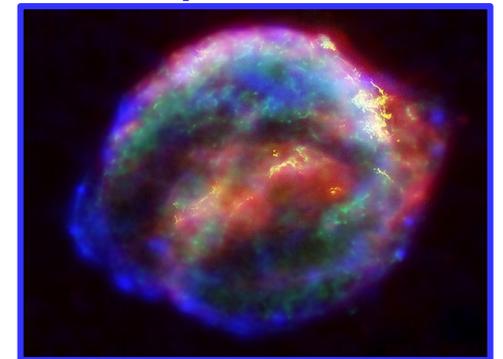
Fusión de un sistema binario



Supernova



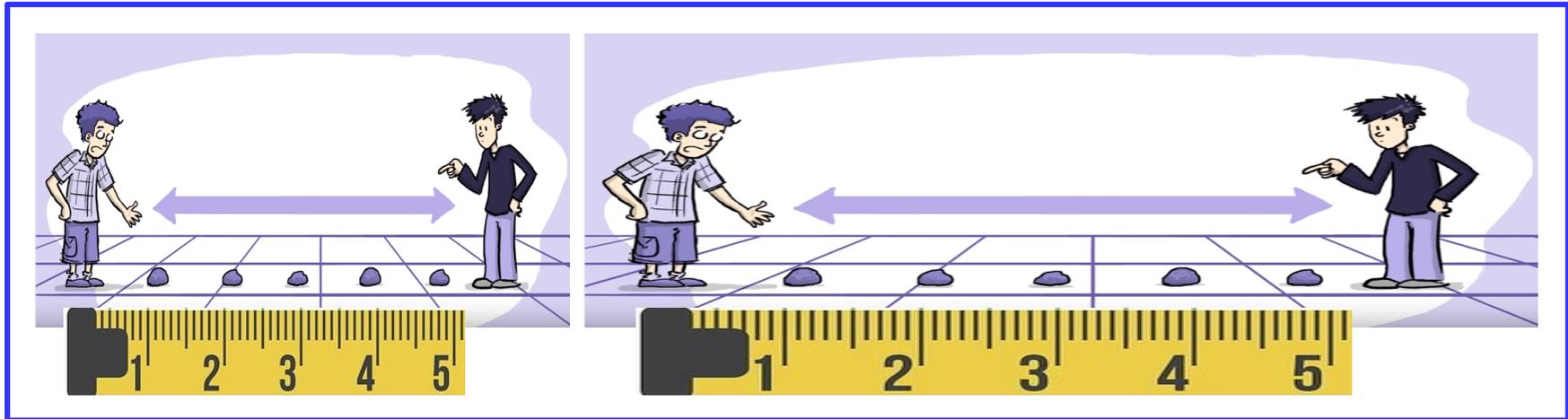
Estrella de Neutrones en rotación



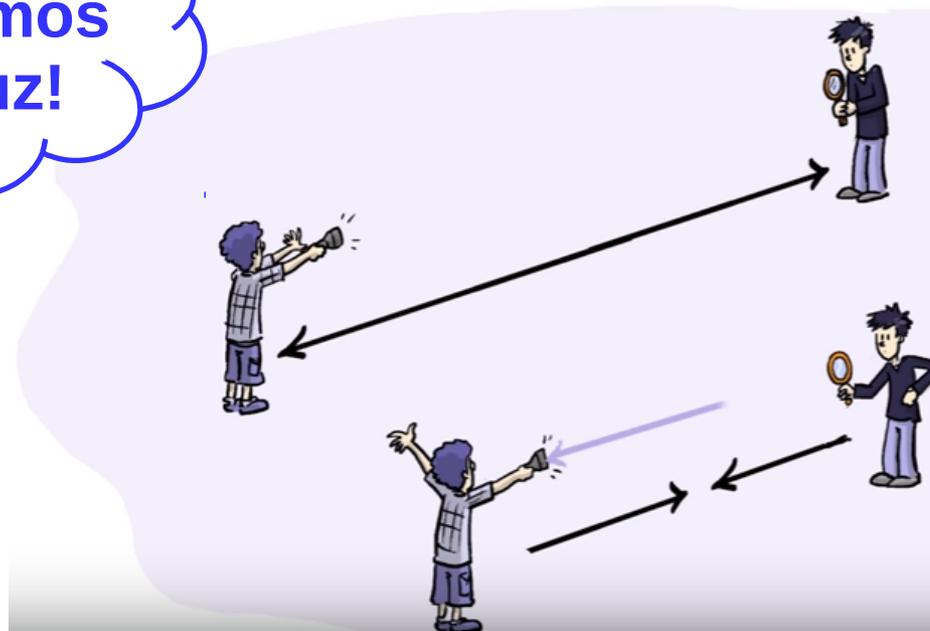
Principio de detección

¿Cómo se detectan?

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



¡Usemos
la luz!

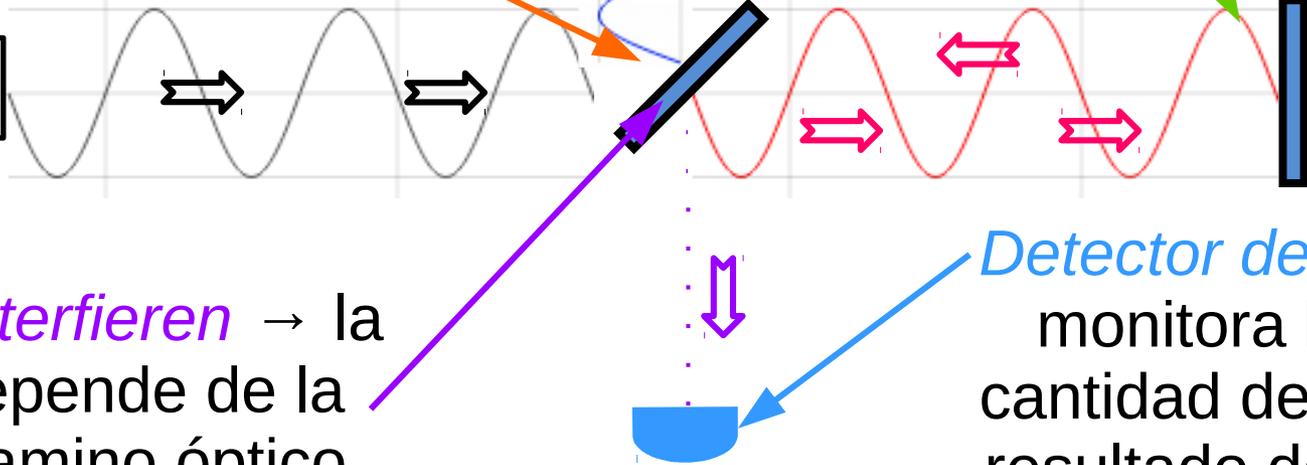


¡El tiempo que
tarda la luz a
recorrer la
distancia entre
las dos
personas
cambia!

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*



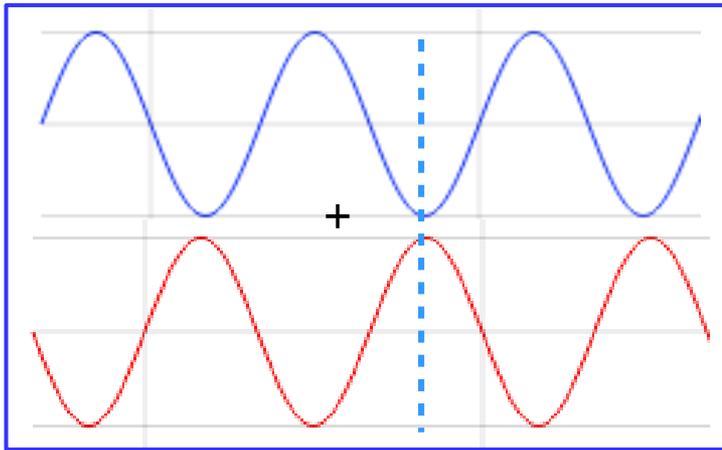
Ambos rayos son *reflejados por un espejo*, volviendo al divisor de haz

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

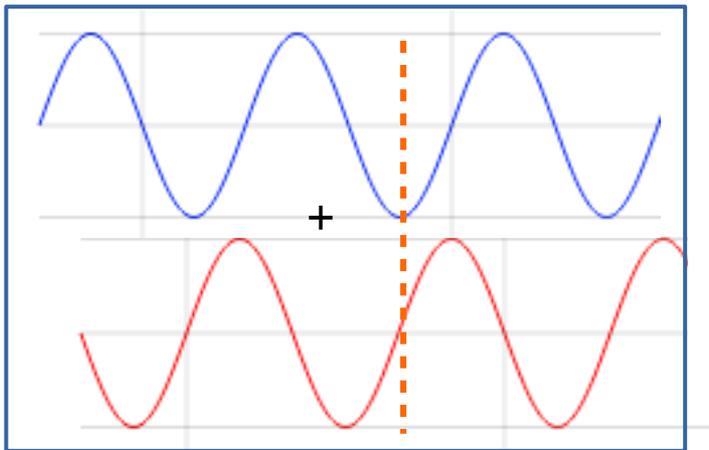
Interferencias

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



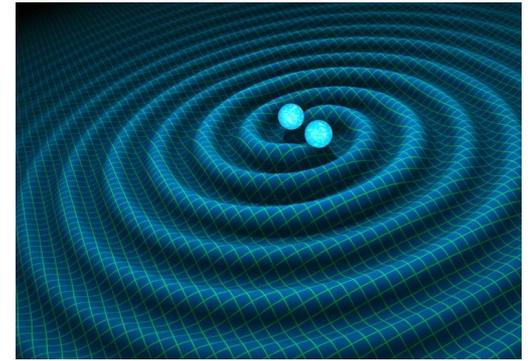
Los dos haces están en **oposición de fase** y se **cancelan** perfectamente → **no hay luz en el detector**

- 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



La **onda gravitatoria** alarga un brazo y acorta el otro

Los dos rayos ya no se compensan



Punto de trabajo

→ Cuando pasa una **onda gravitatoria** → vemos un cambio en la cantidad de luz detectada (Potencia), δP_{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

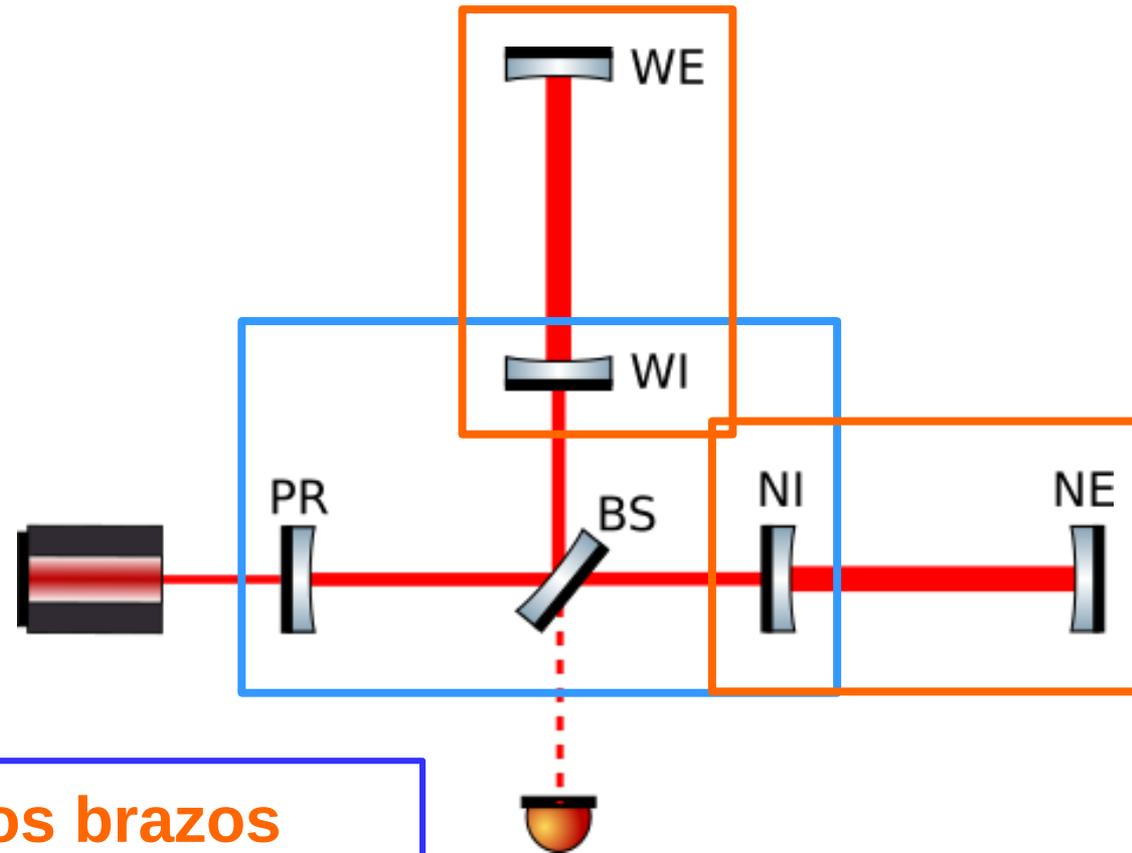
Aumento de la sensibilidad

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

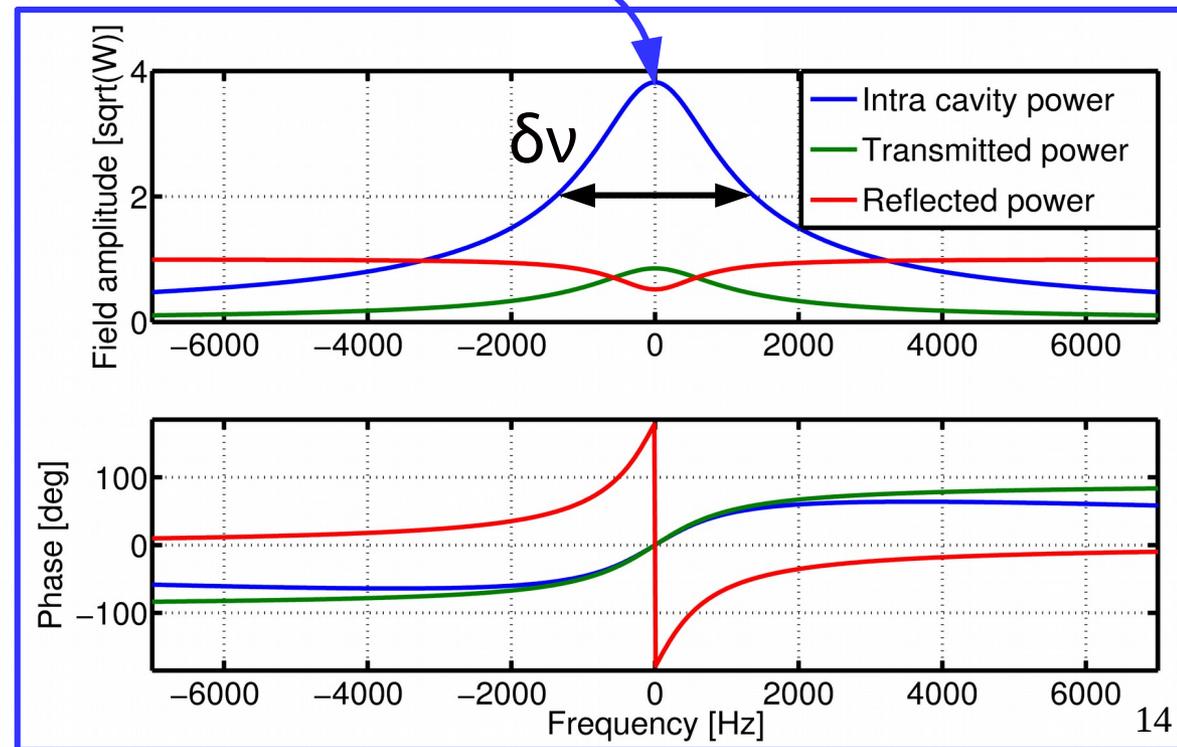
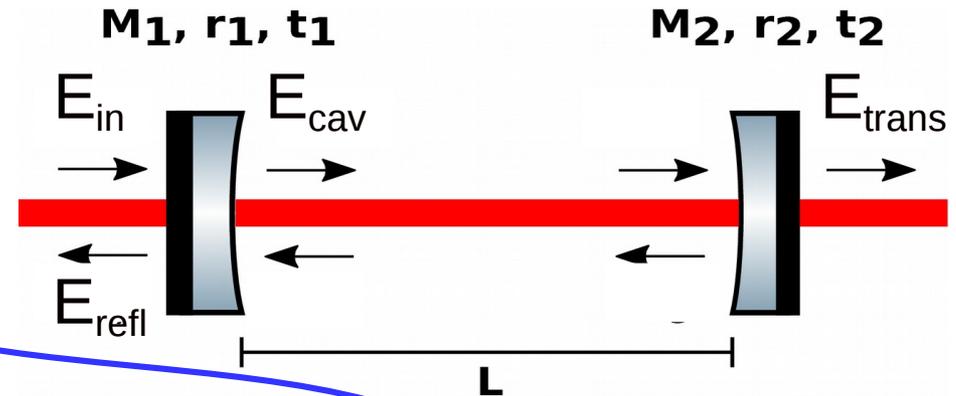
→ **Resonancia:** máxima potencia resonando en la cavidad

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

→ **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



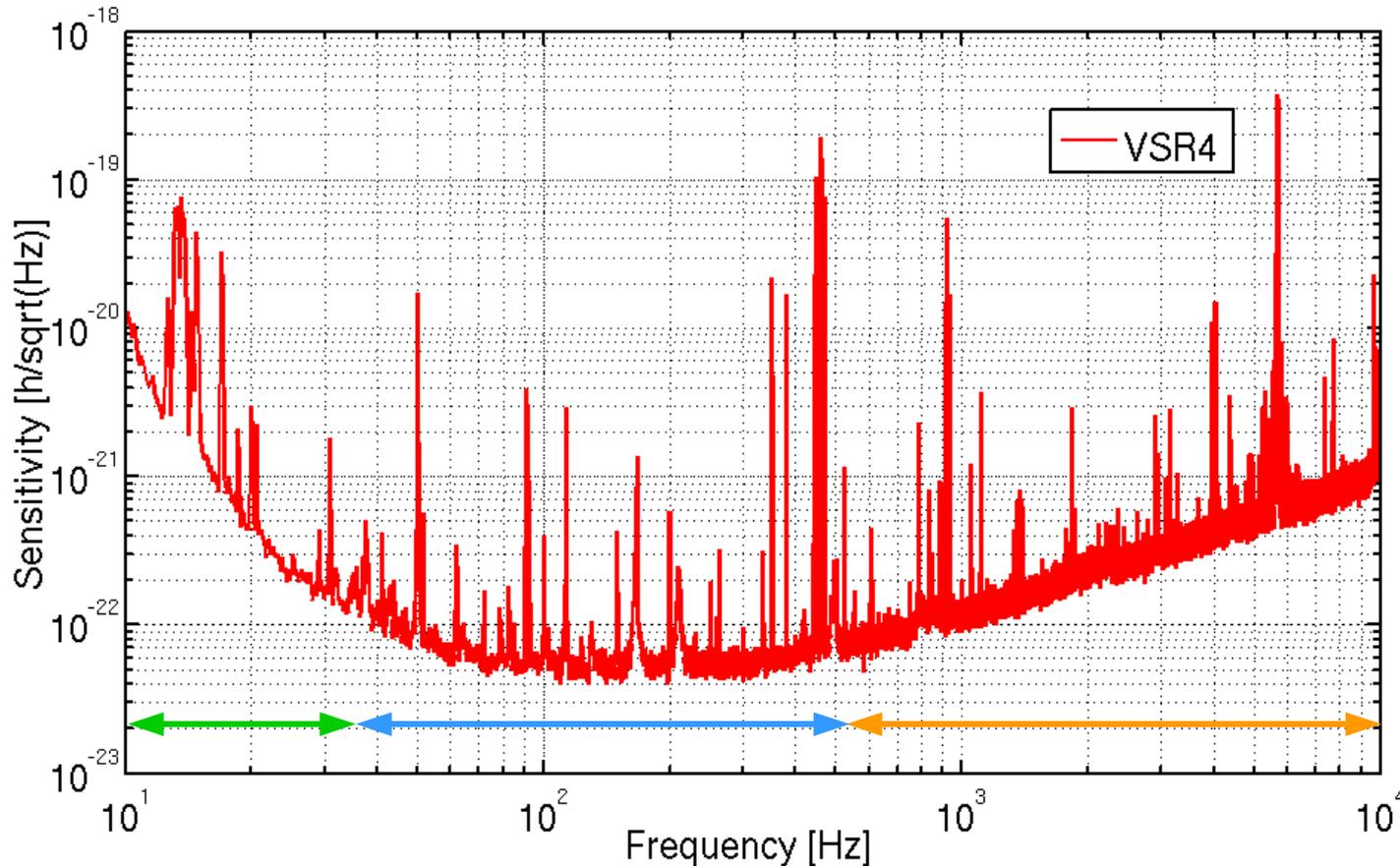
Mitigación del ruido

Ruidos fundamentales

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

Ruido
térmico
(recubri
miento)

Ruido
térmico
(suspens
iones)



Ruido
shot

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

Ruidos técnicos

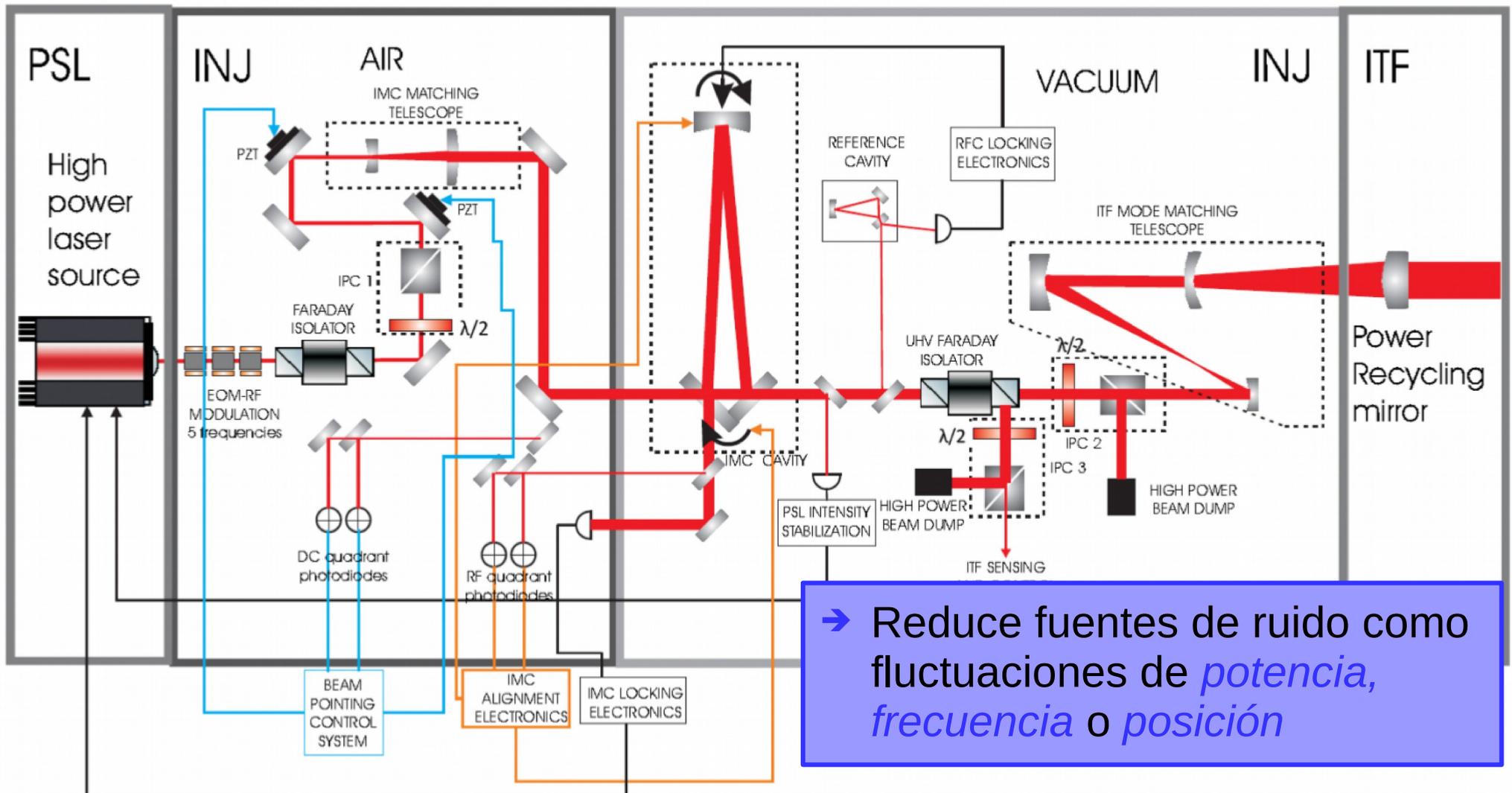
- El objetivo es *medir una diferencia de longitud de $\sim 10^{-18}$ m* → casi cualquier fuente de ruido se convierte en limitante
- Para Virgo se han desarrollado técnicas extremas para *mitigar las distintas fuentes de ruido:*

- **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

→ ...

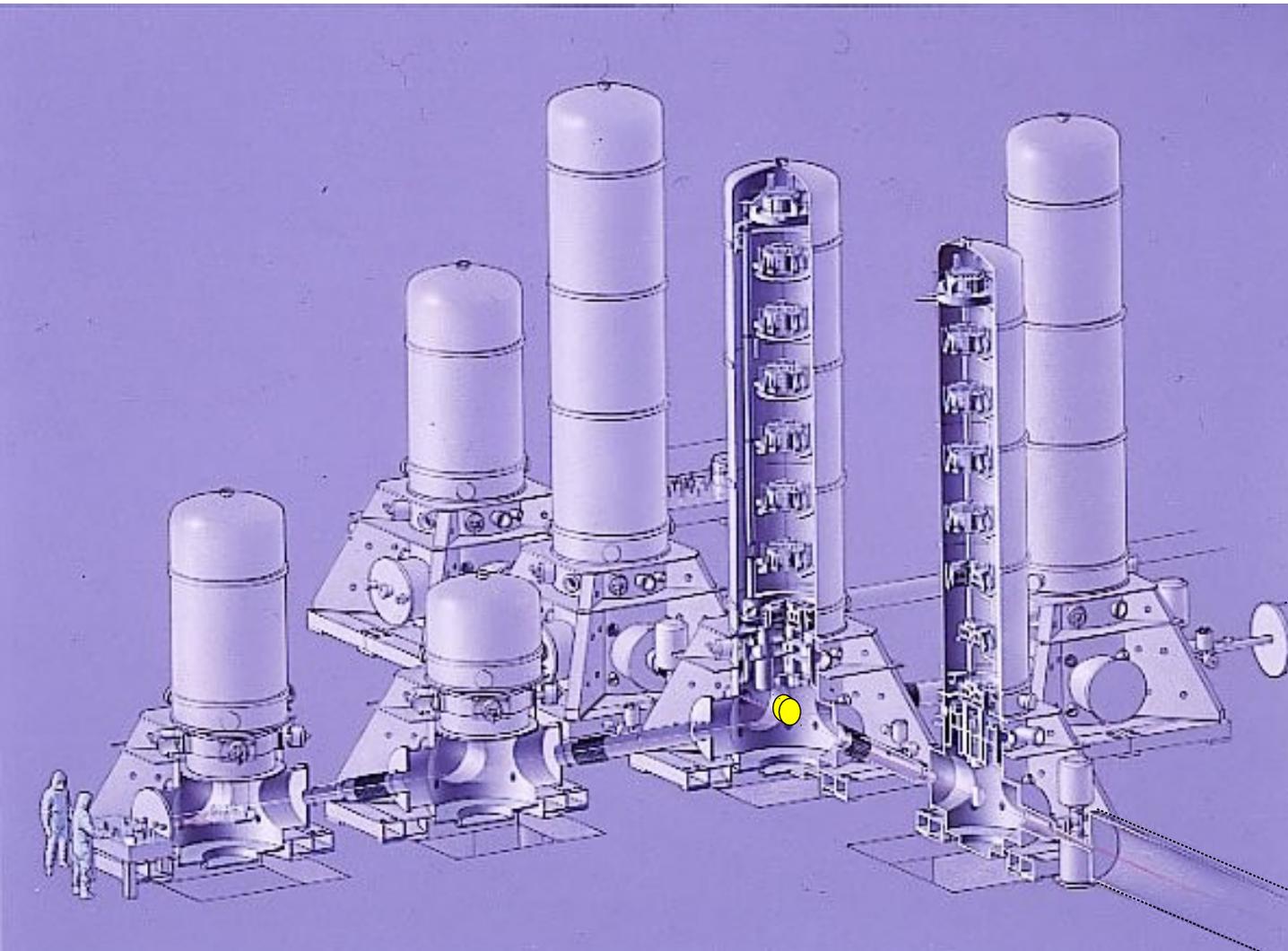
Sistema de Inyección

- 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 7000m³ de vacío → es el mayor sistema de ultra-vacío de Europa

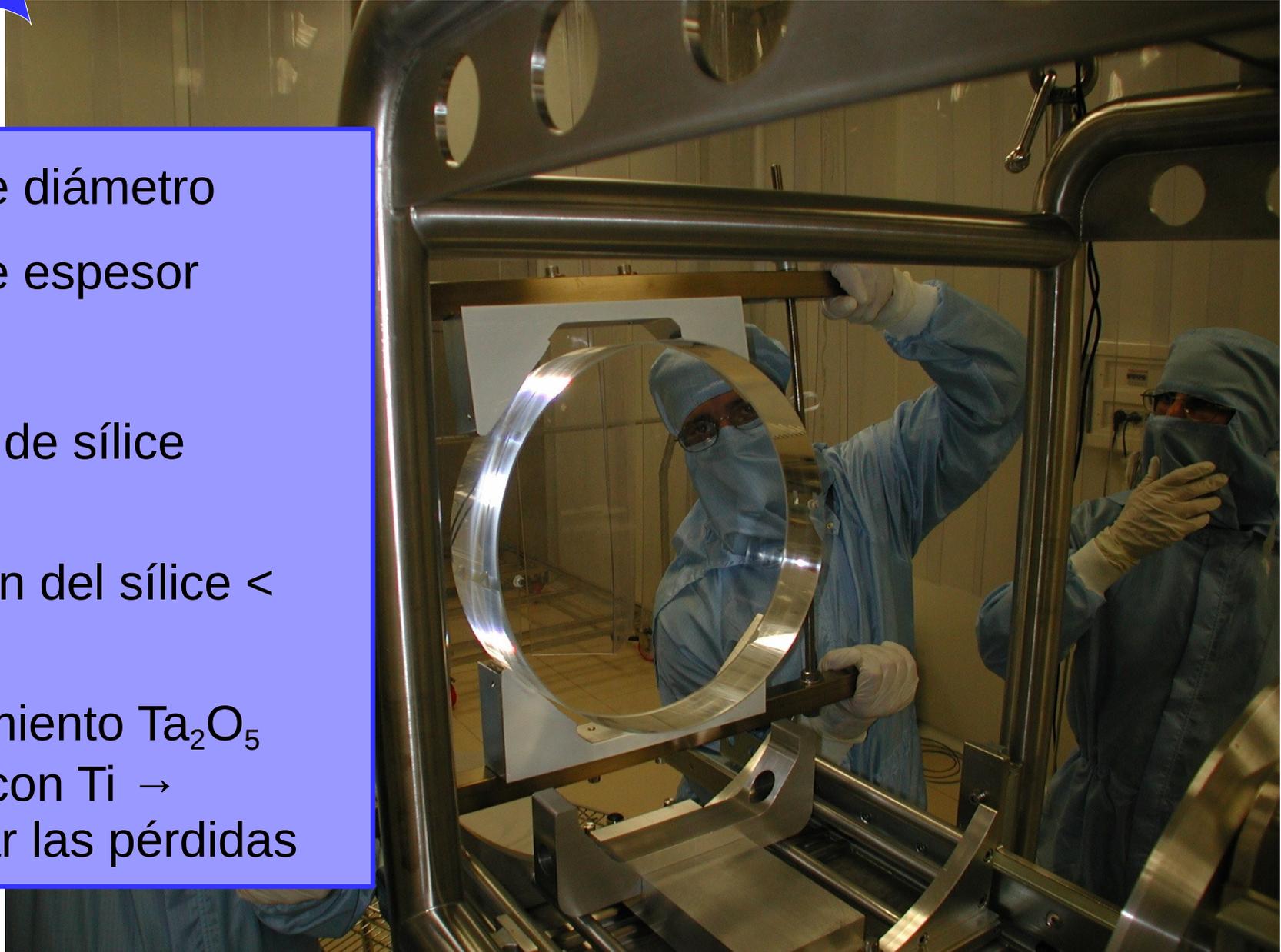


Tubo Ovest
3 km

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

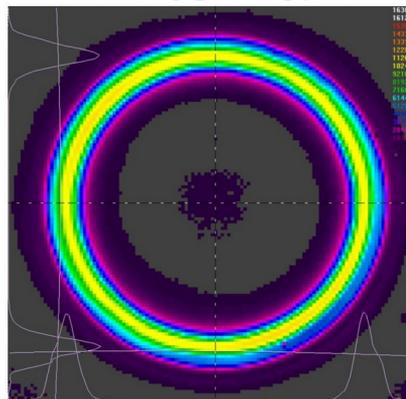


Ring Heater

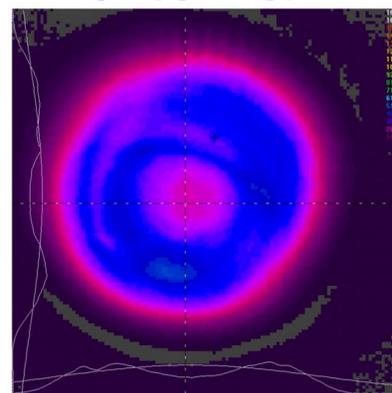


Axicon

External



Internal



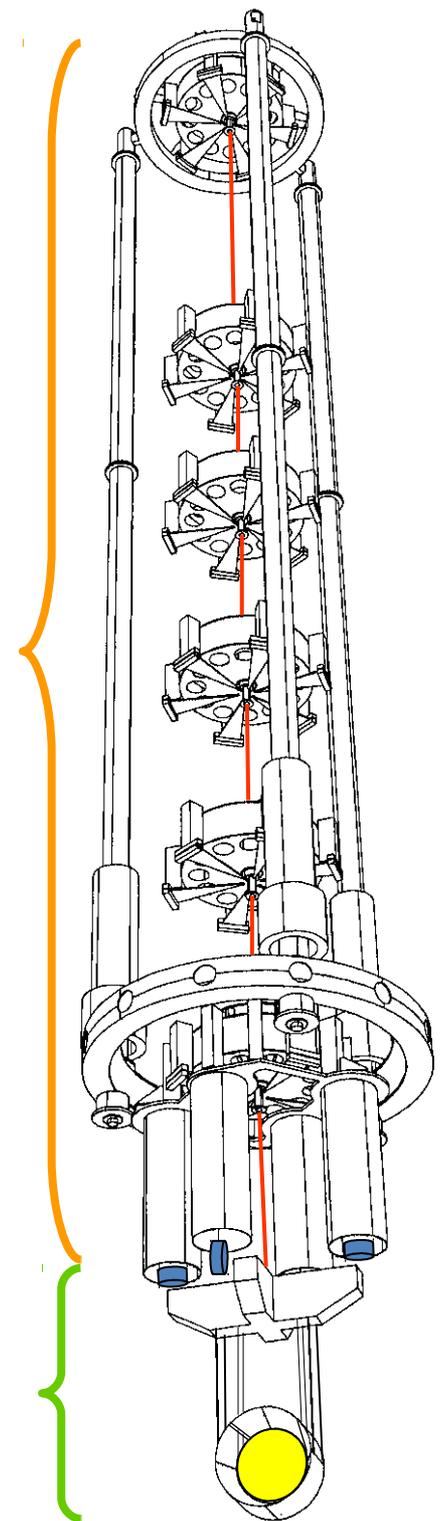
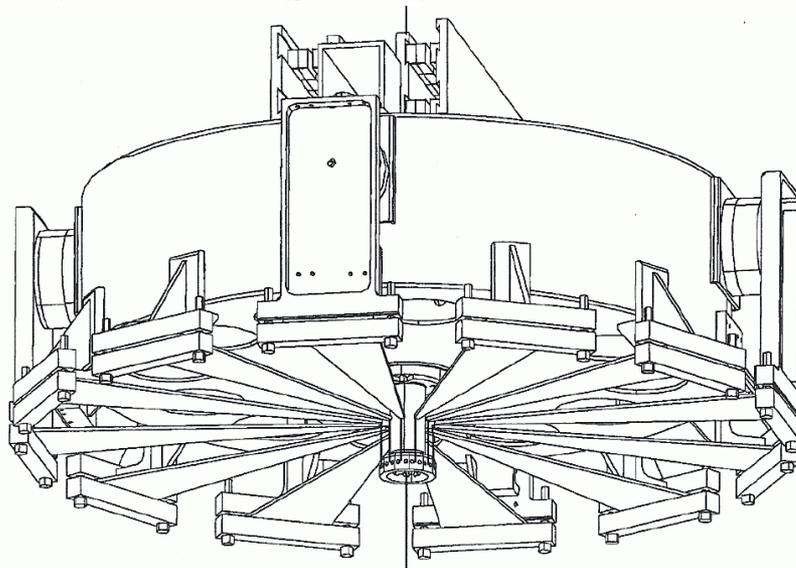
Fibras monolíticas



- 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 interferómetro 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



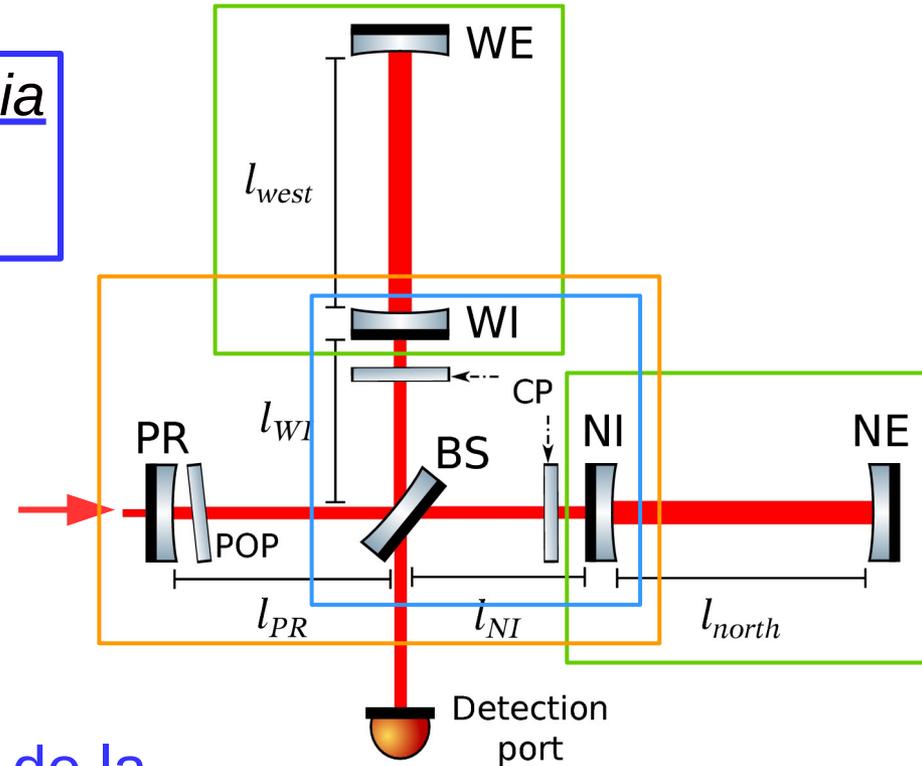
Grados de libertad longitudinales

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

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

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

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



Estimación de la
precisión
necesaria



→ **CARM** ~ $4 \cdot 10^{-14}$ m

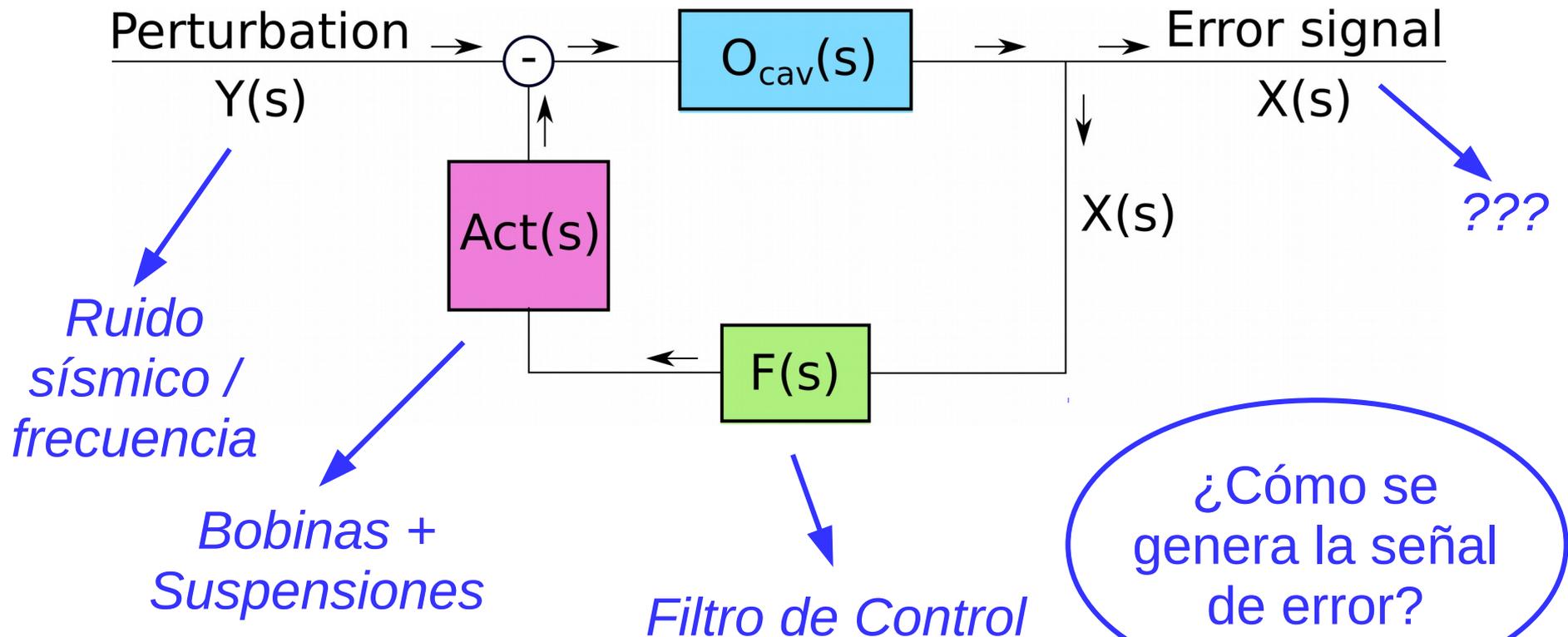
→ **DARM** ~ $6 \cdot 10^{-12}$ m

→ **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**



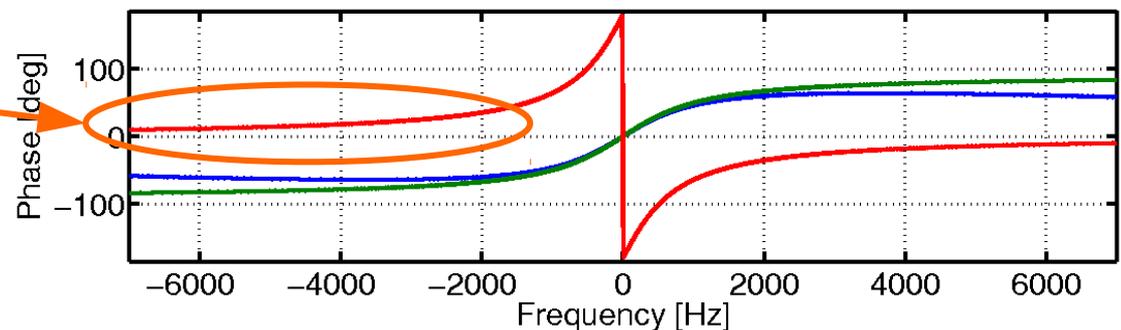
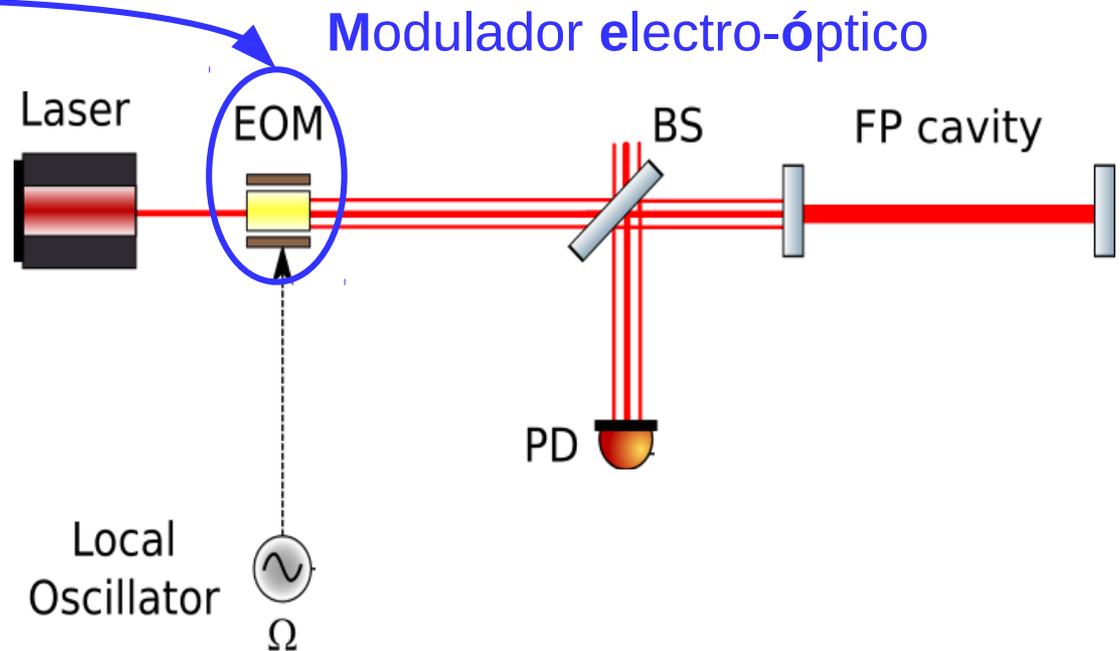
Técnica Pound-Drever-Hall (PDH)

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

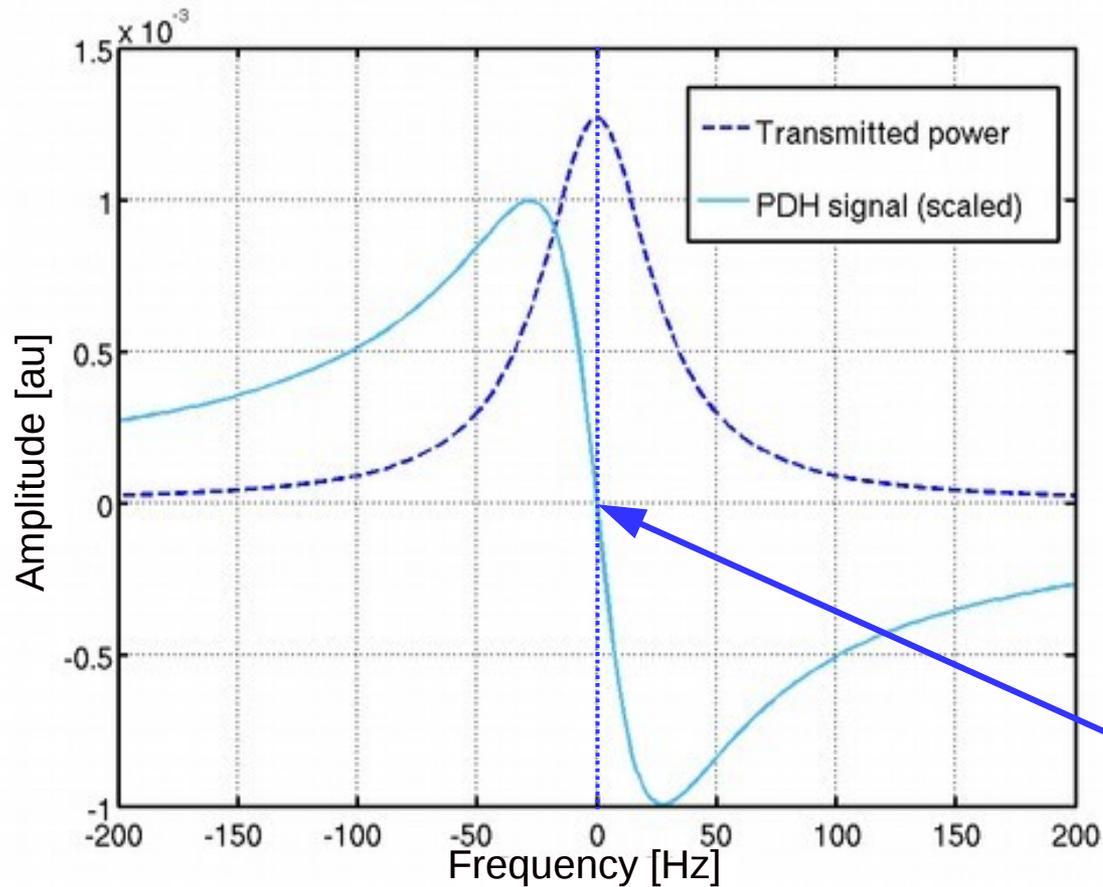
→ **Modulación de fase:** crea bandas laterales alrededor de la freq. fundamental (ω_0) a \pm la freq. de modulación, Ω .

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

¡Referencia de fase!



Señal de error: PDH

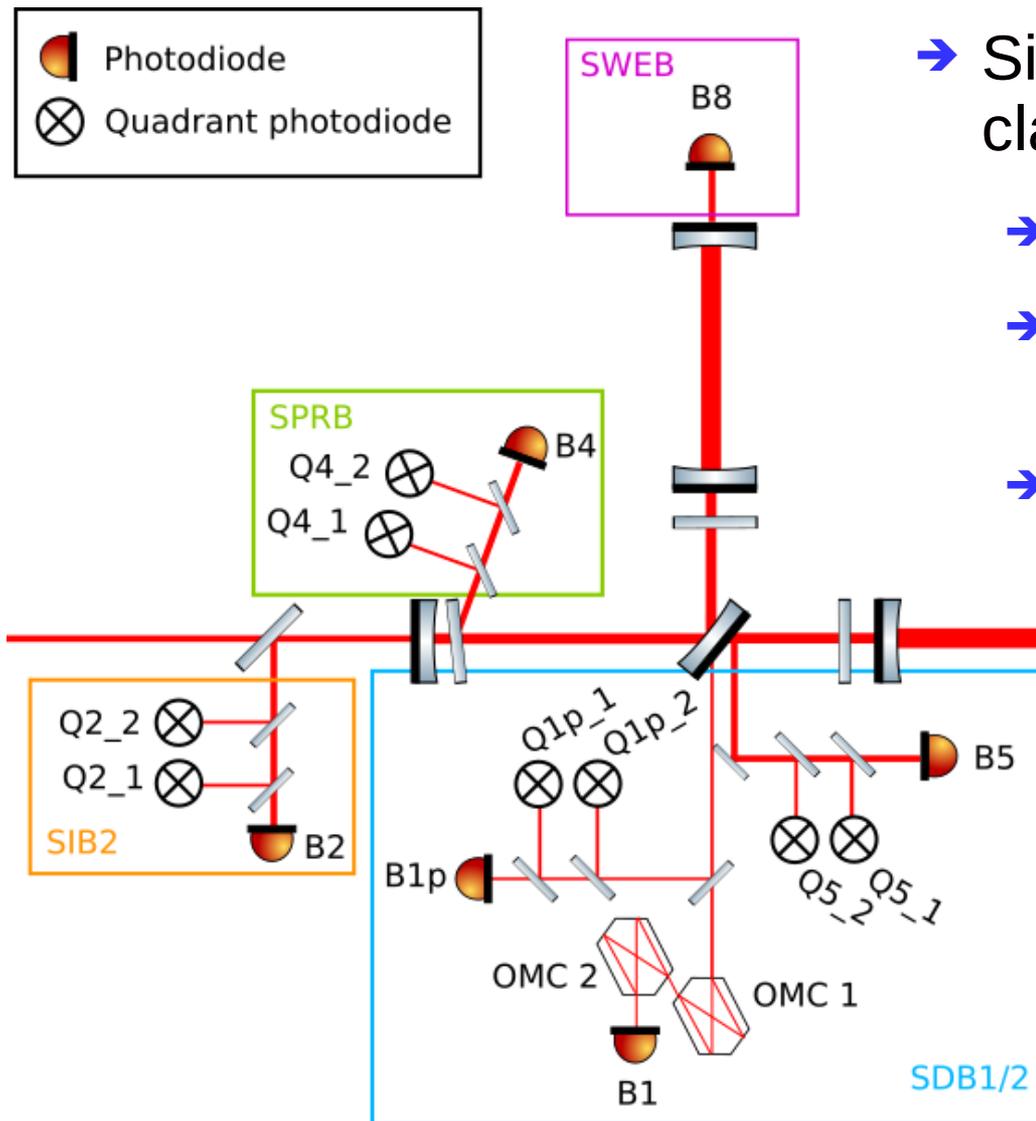


Buena señal de error:

- *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

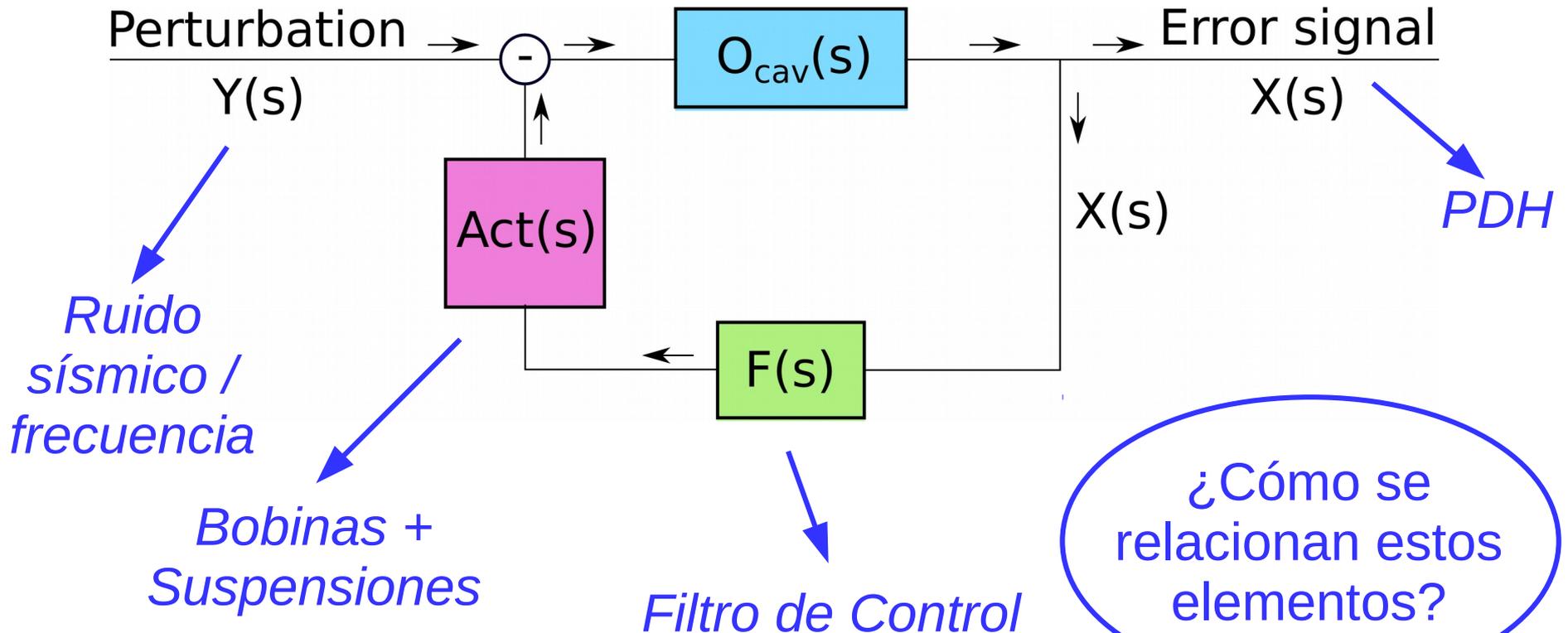
→ Fotodetectores segmentados (alineamiento)

→ Cámaras

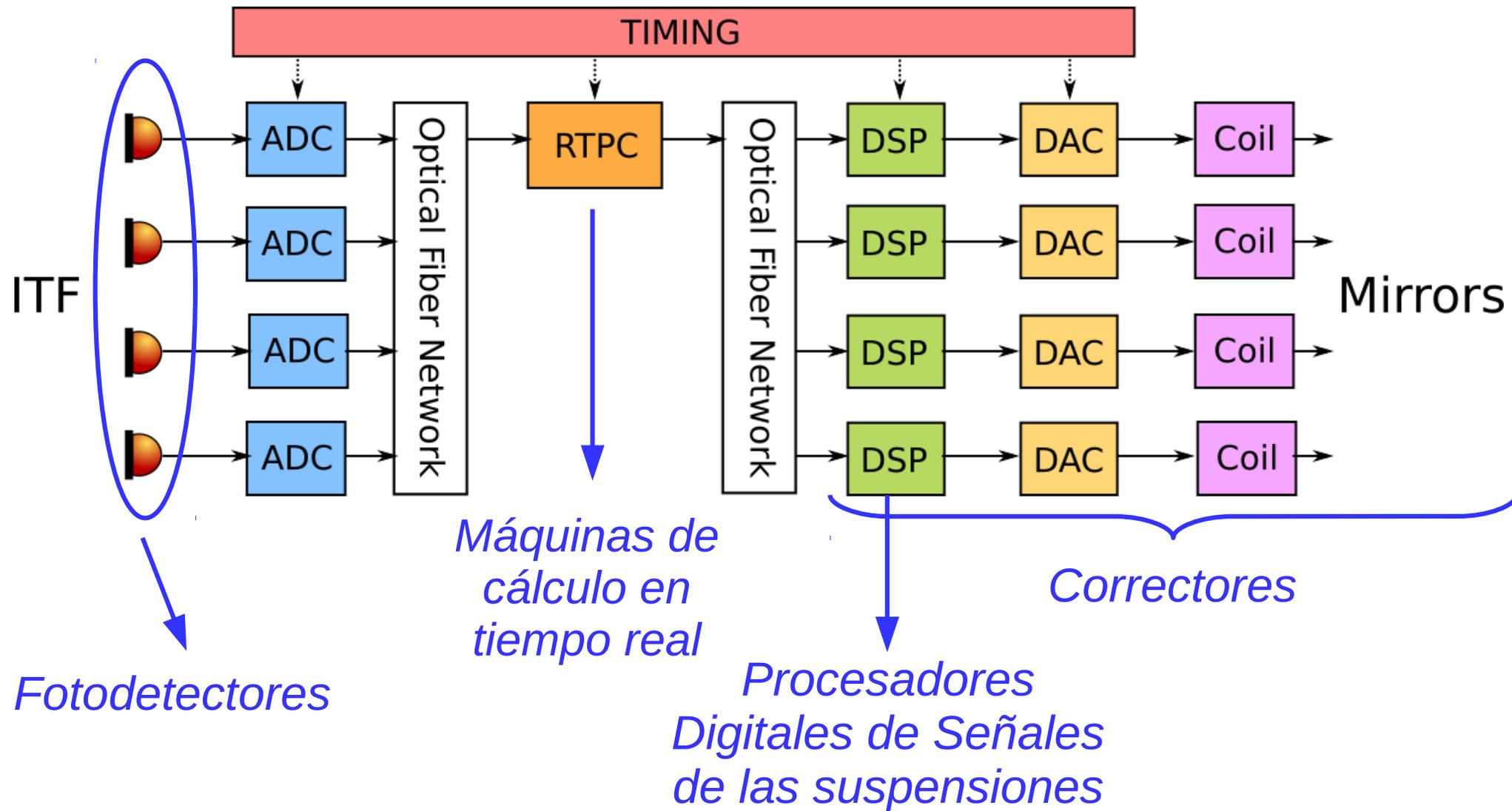
- ↓ Reducción de la luz difusa
- Bancos *suspendidos* y en *vacío*
 - Nuevo sistema de *baffles* en lugares estratégicos para *absorber la luz difusa*

Control activo: retroalimentación

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

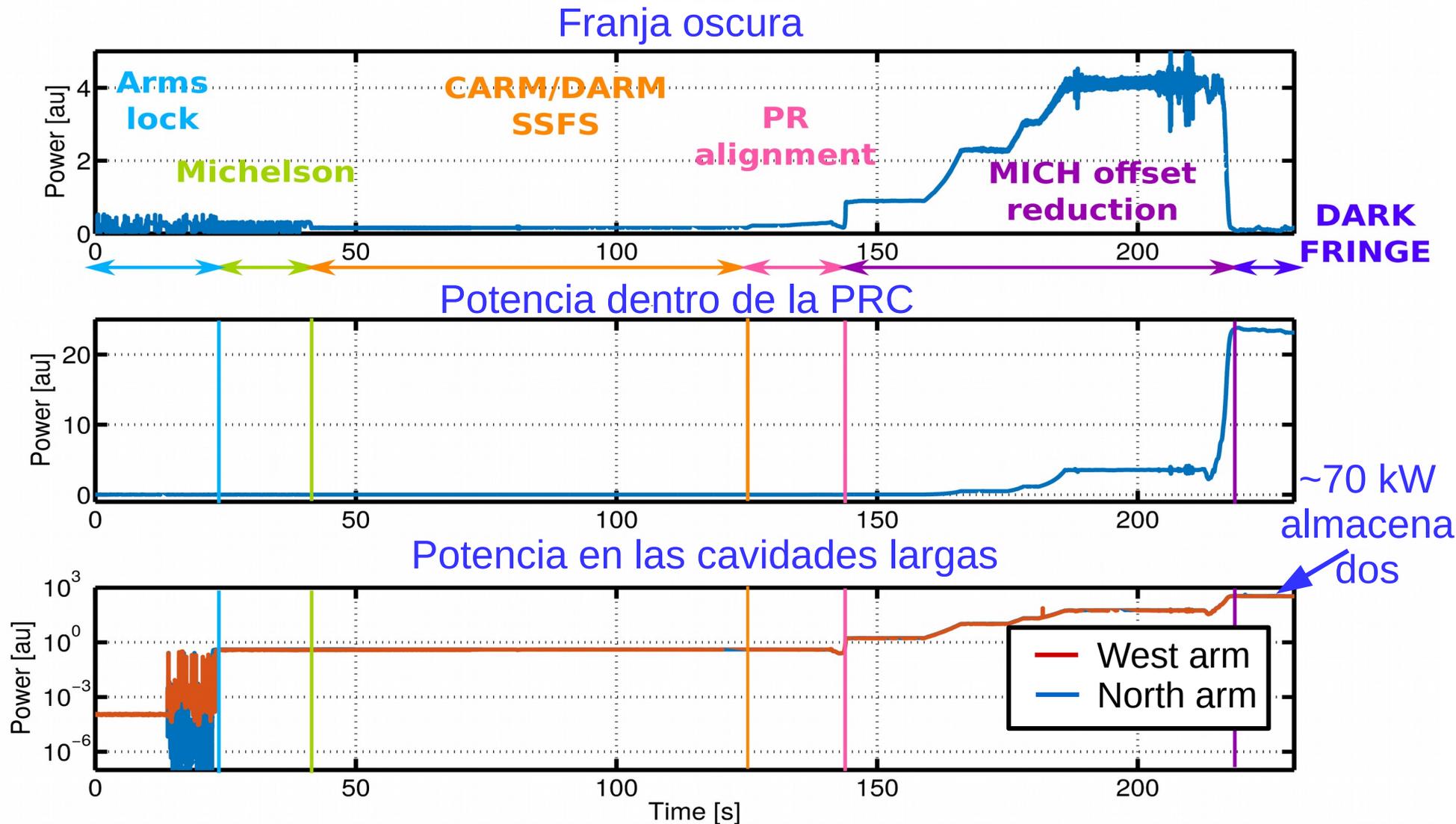


Sistema de adquisición de datos



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



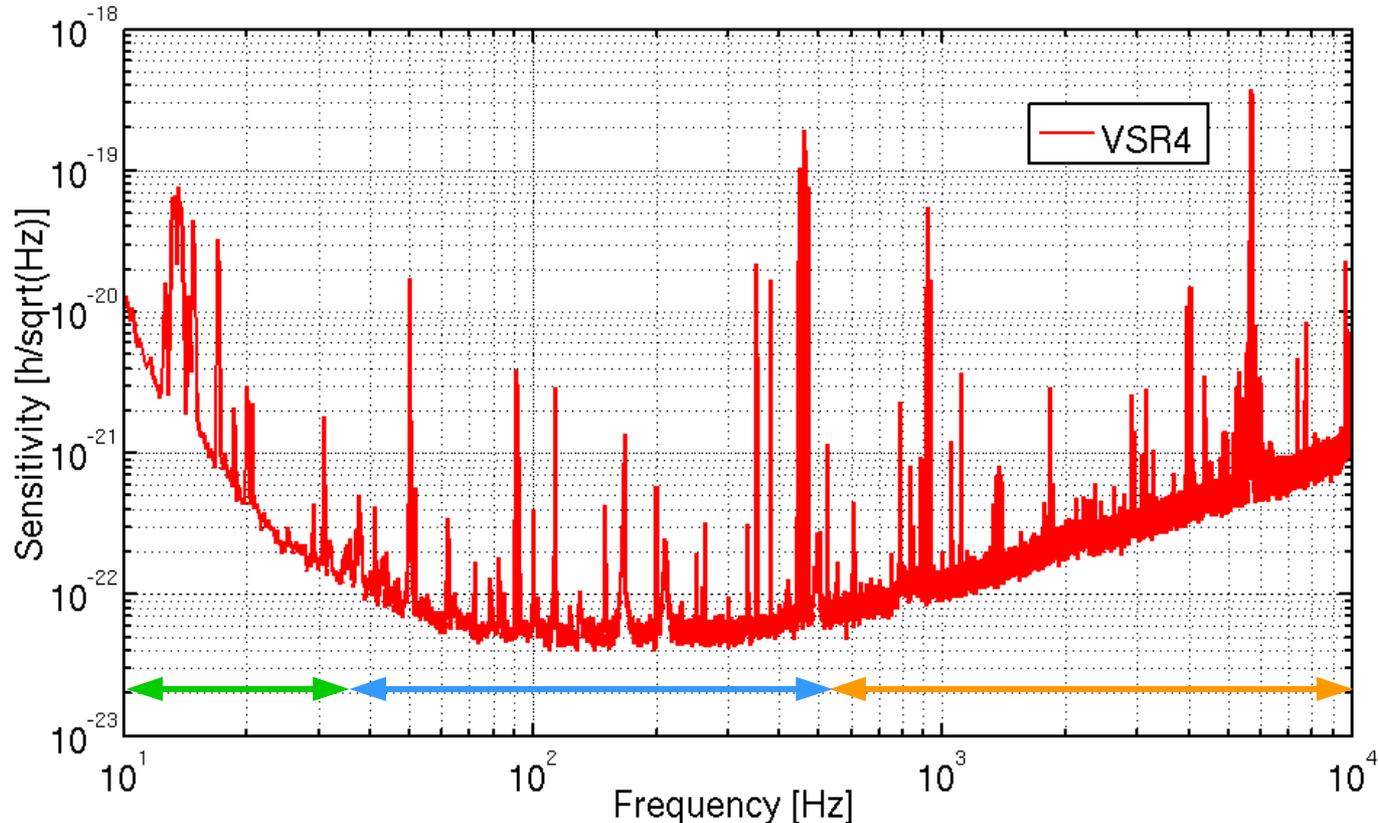
1^a generación de detectores de OGs

- 1^a 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^a 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

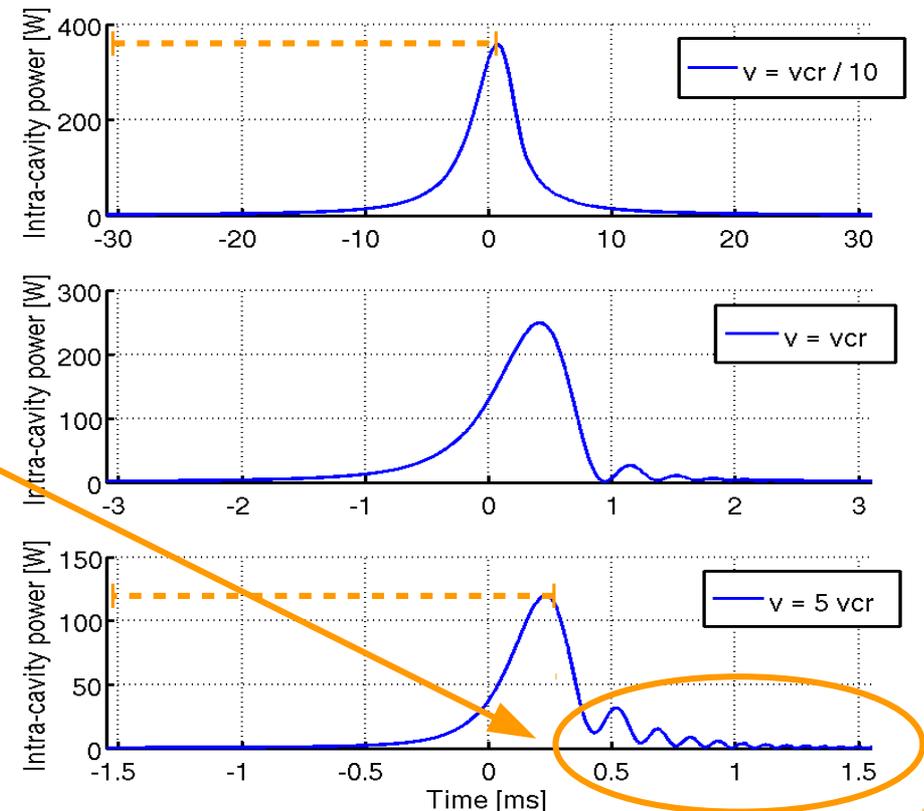
→ Aumento de la finesse de las cavidades largas

- 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

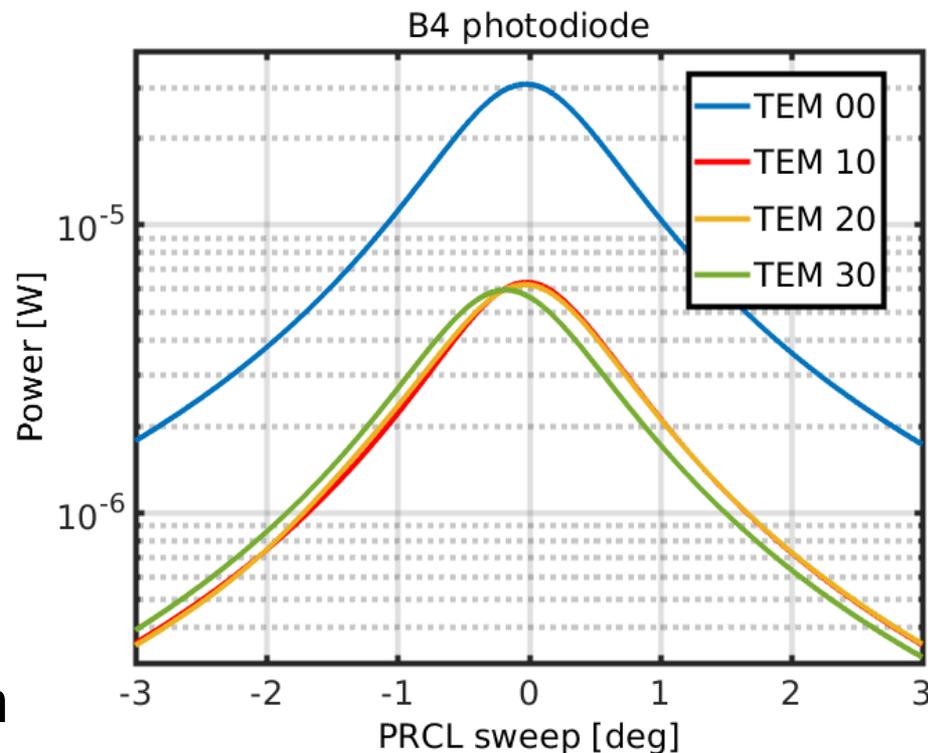
- Presencia de *presión de radiación* → re-diseño del control angular de los espejos



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...)



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

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

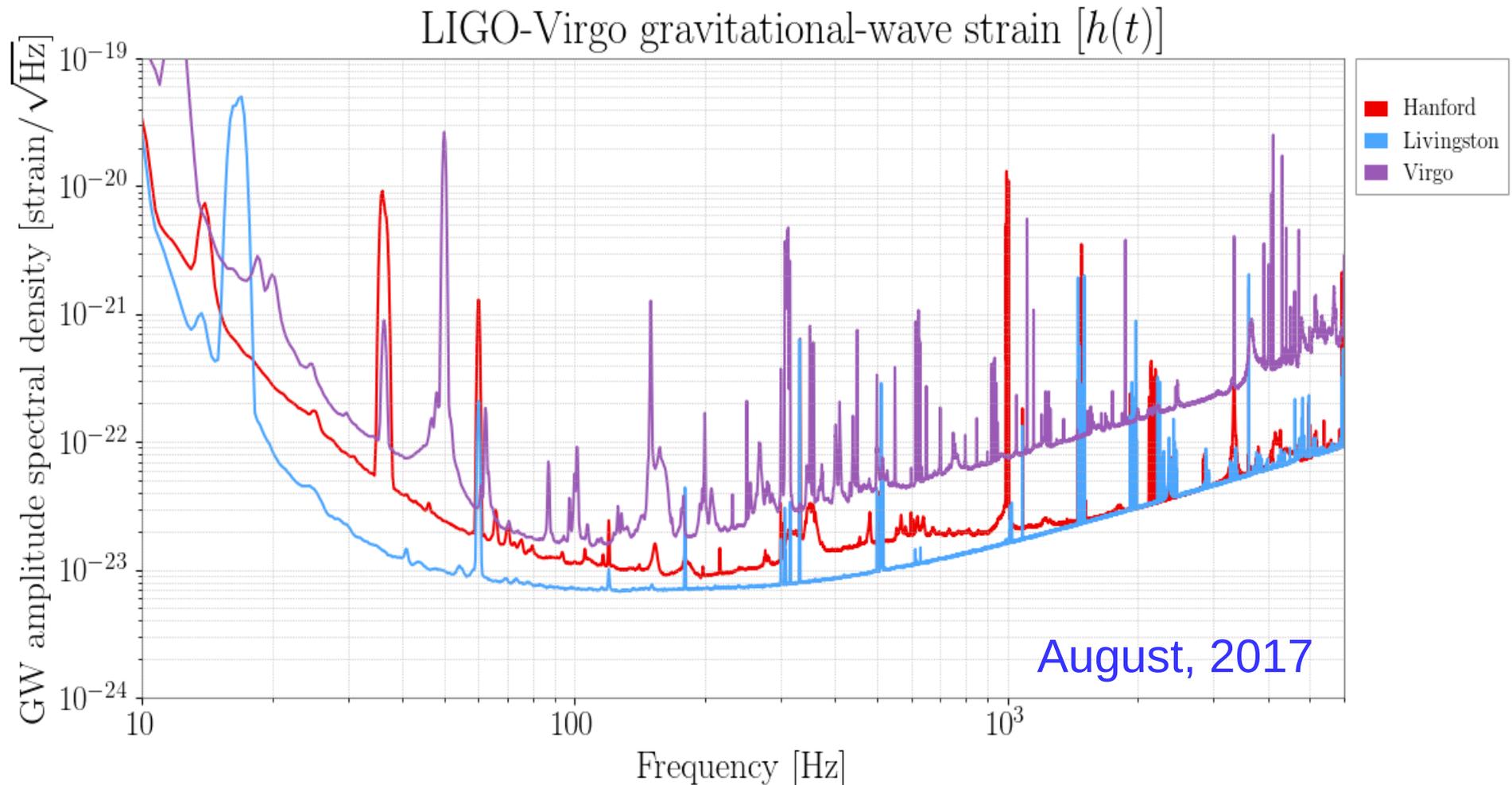
→ **SOLUCIÓN:** nuevo conjunto de señales de error poco sensibles a estos efectos

Cronología de Virgo Avanzado

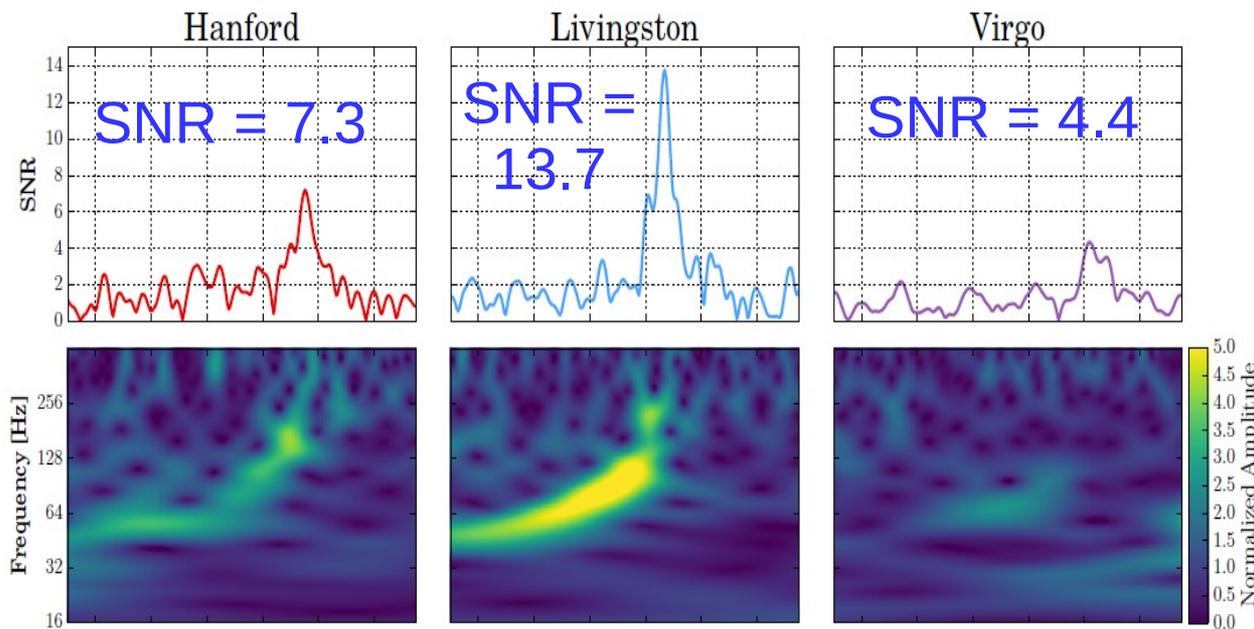


Sensibilidad de Virgo Avanzado en O2

- 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



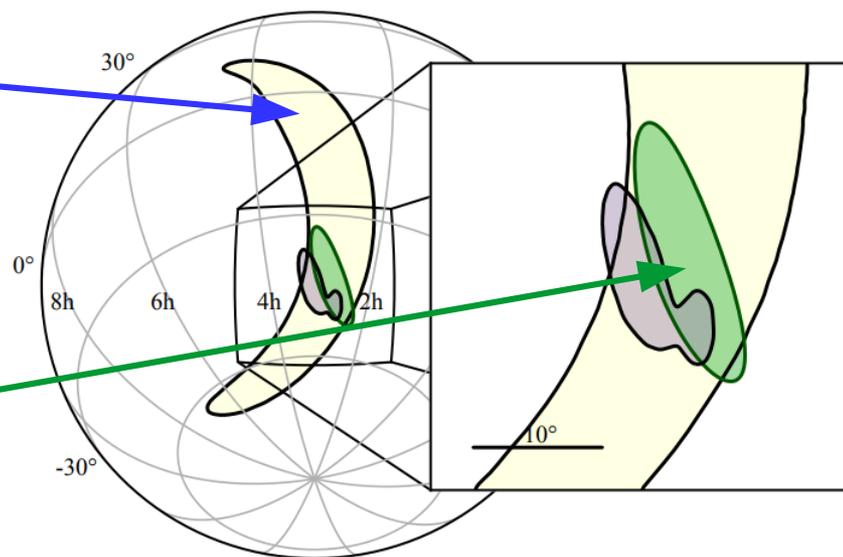
☞ Sistema binario de
Agujeros Negros

☞ Distancia: 330-670 Mpc

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

Localización en el cielo con los
detectores LIGO sólo (1160 deg²)

Localización en el cielo
con LIGO+Virgo (100 deg²)



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

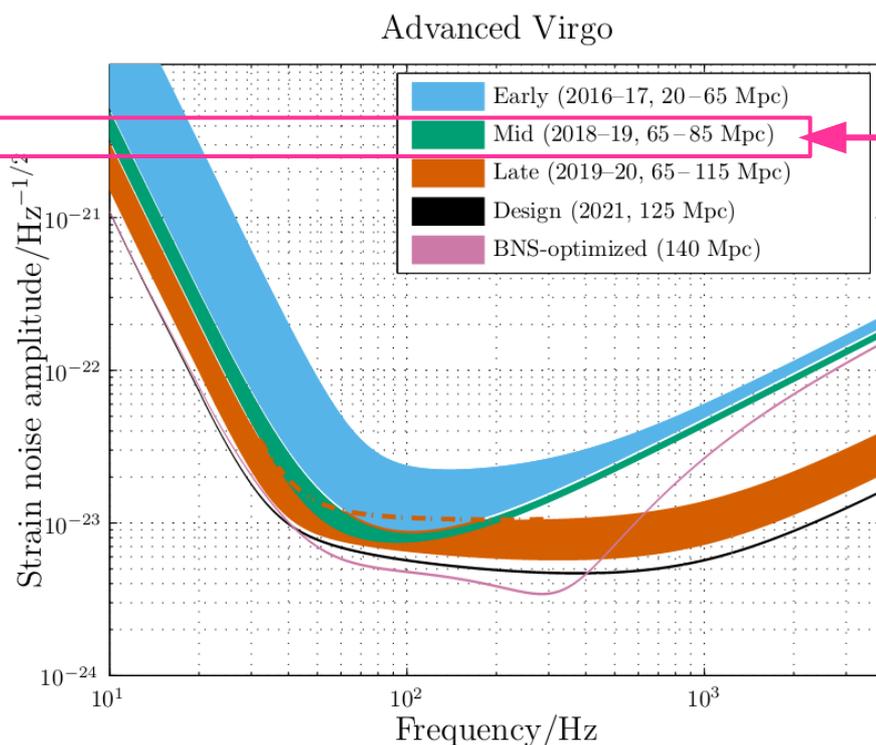
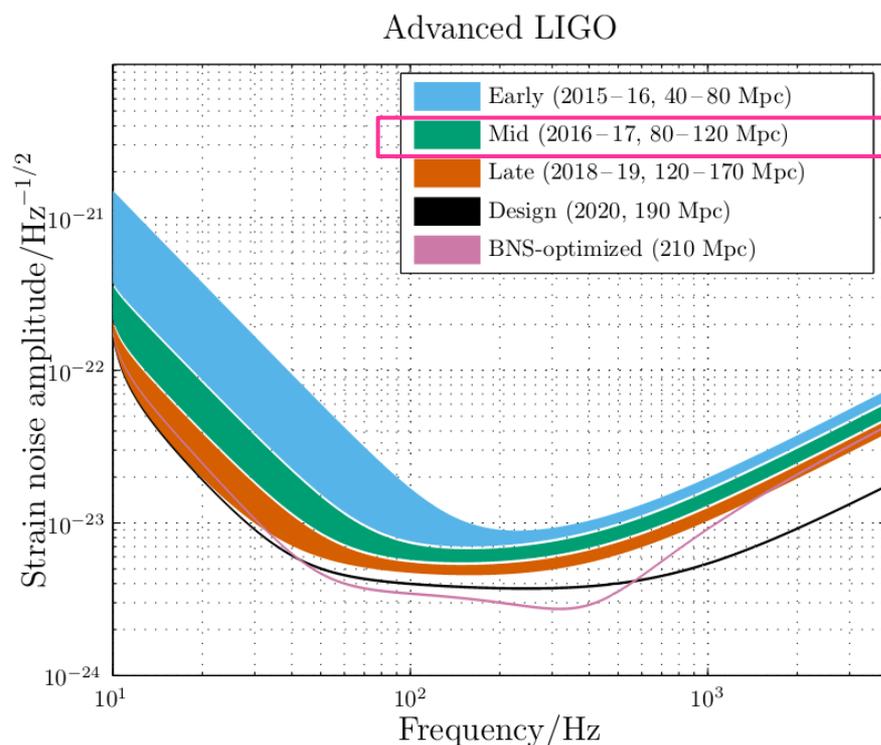
- Instalación / Commisisoning empezó en *septiembre de 2017*
- La toma de datos O3 está planificada para *febrero de 2019*

⏏ 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

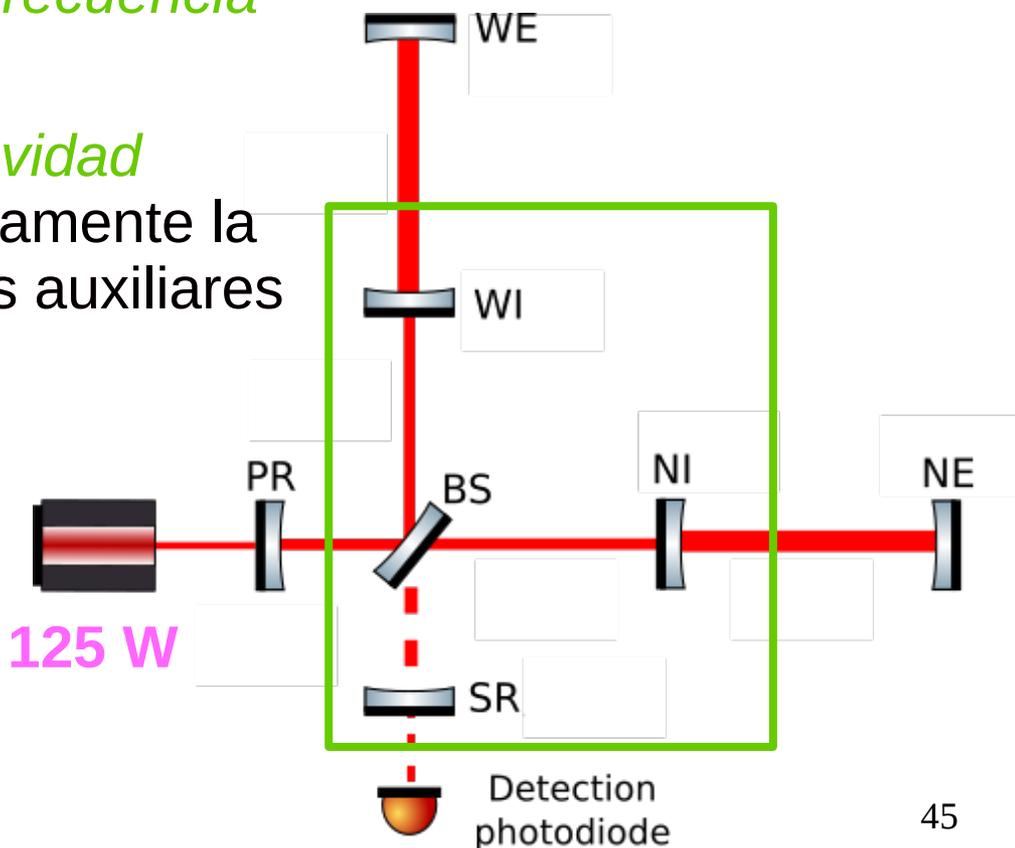
✓ Mejora la sensibilidad a *alta frecuencia* ($>50\text{Hz}$)

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

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

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

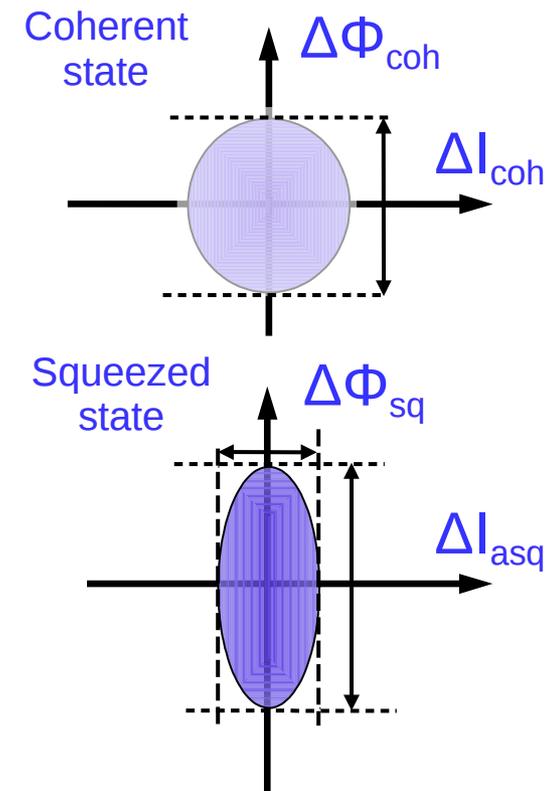
x *Presión de radiación* + *Efectos térmicos*



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...