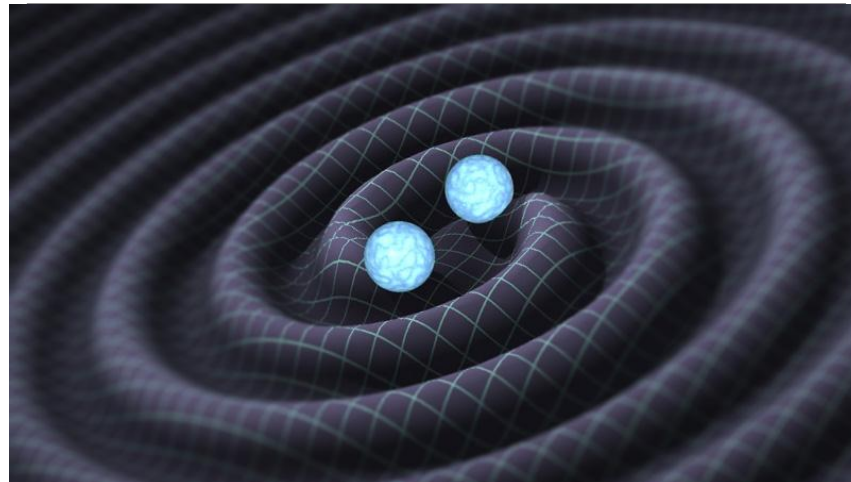


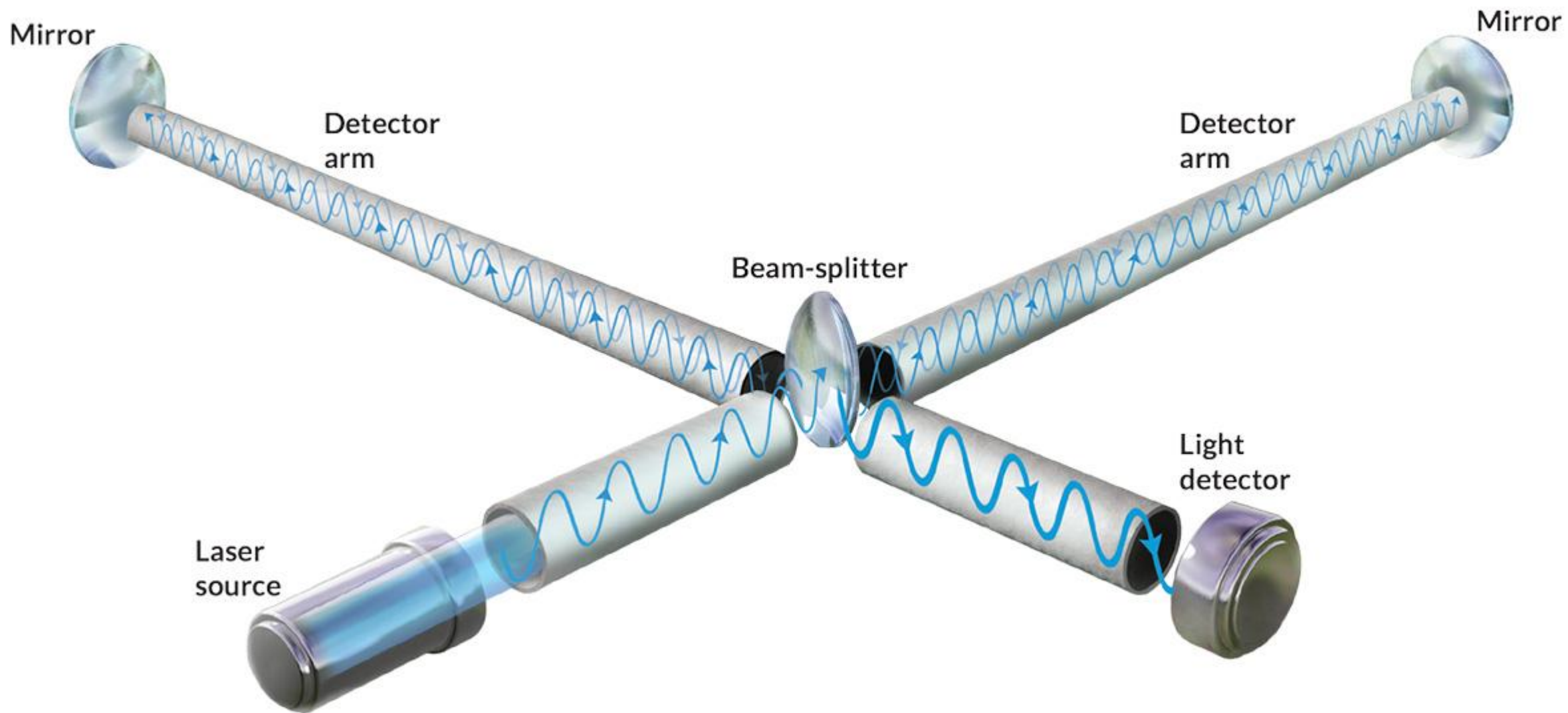


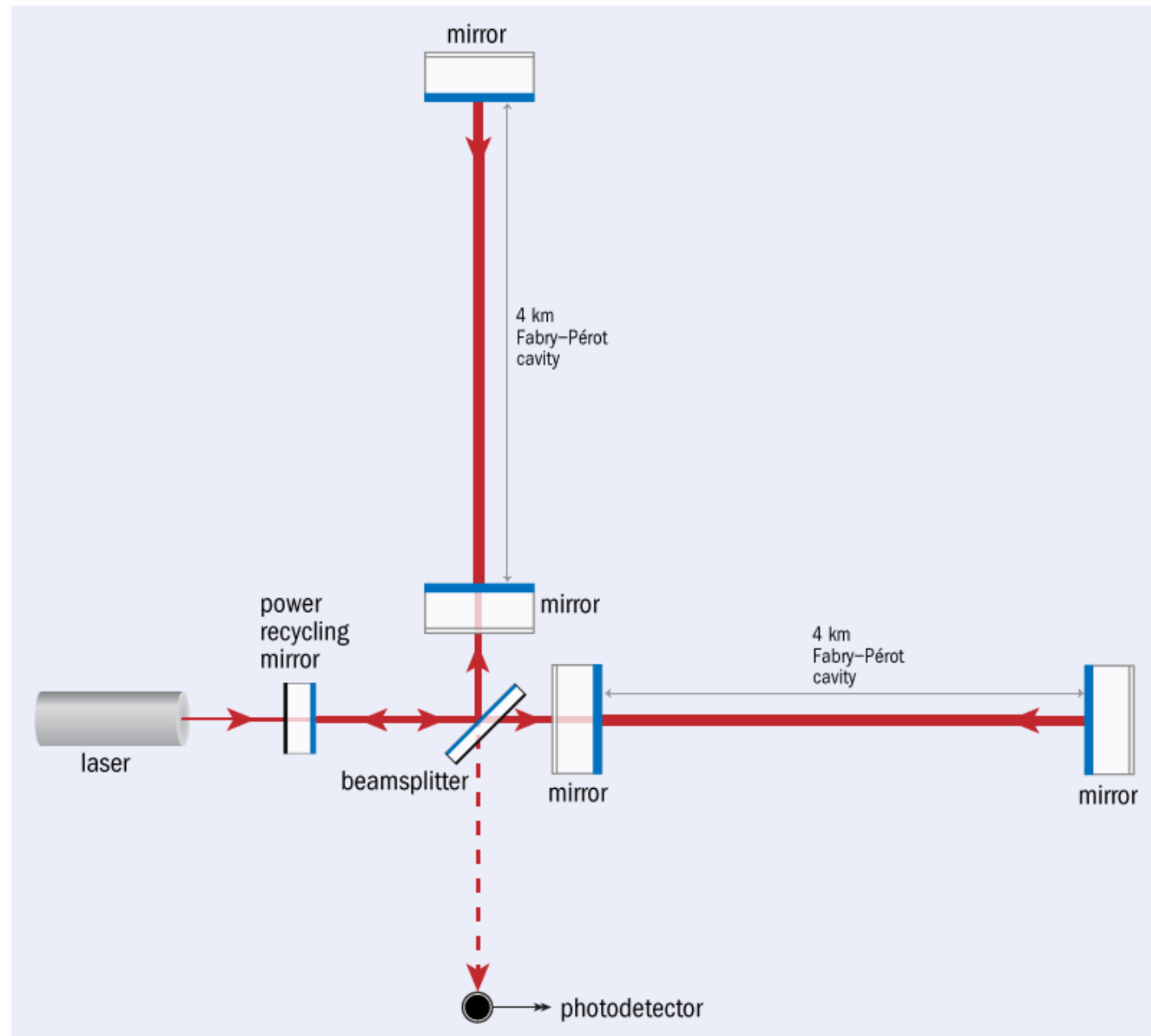
LASER DEL LIGO

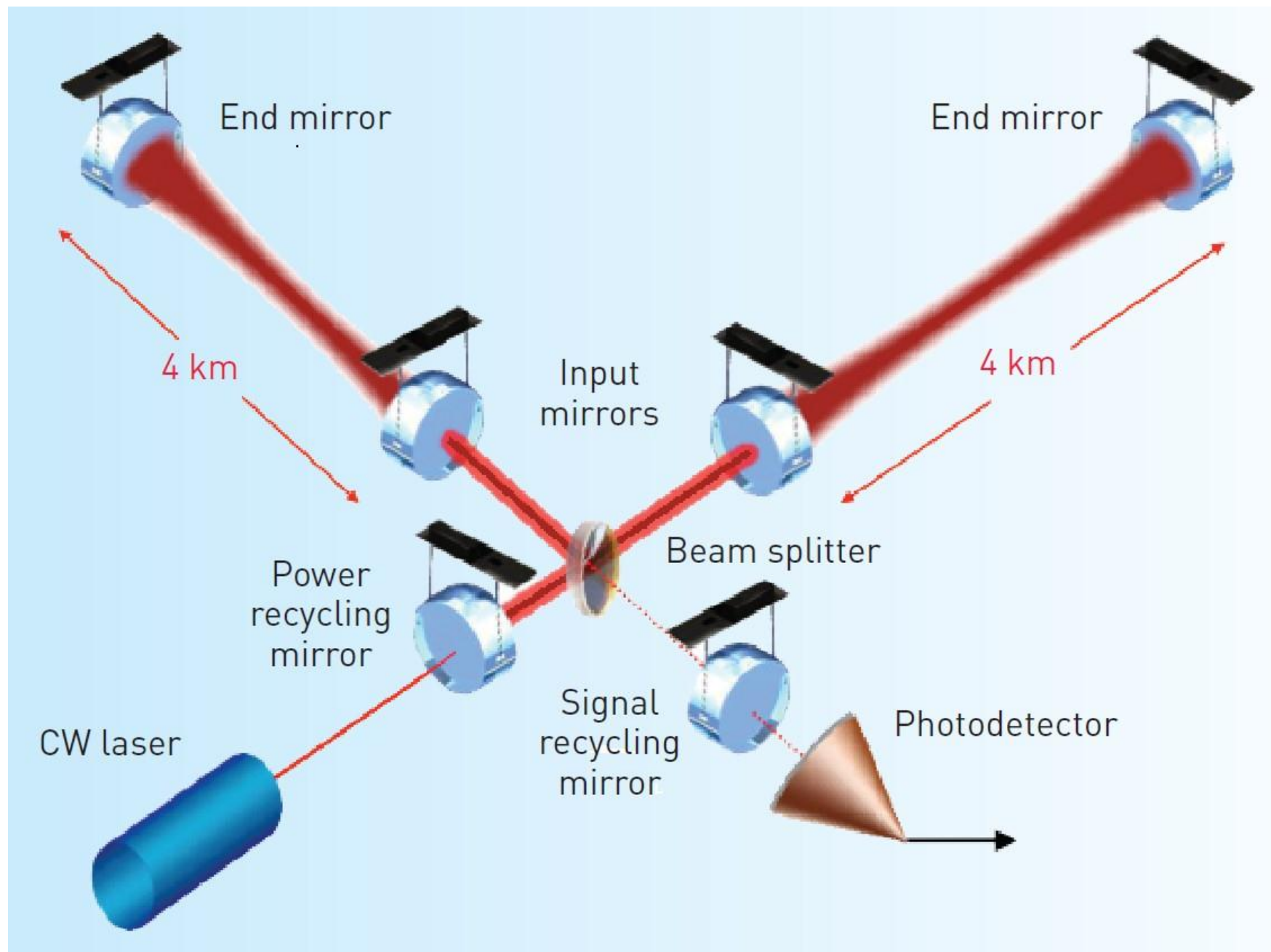
Pablo Roberto Zamorano Herrera



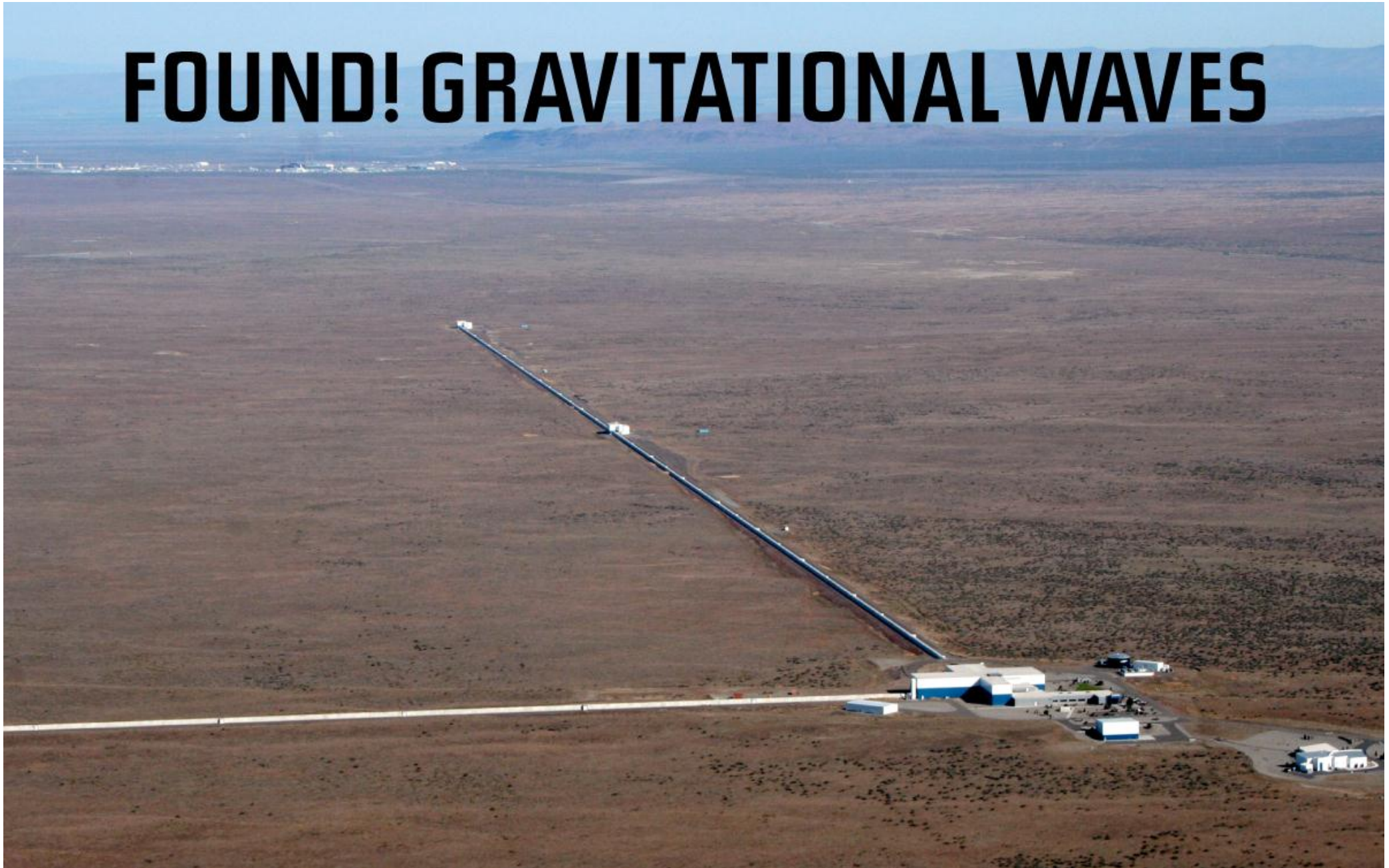
The Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (**LIGO**)





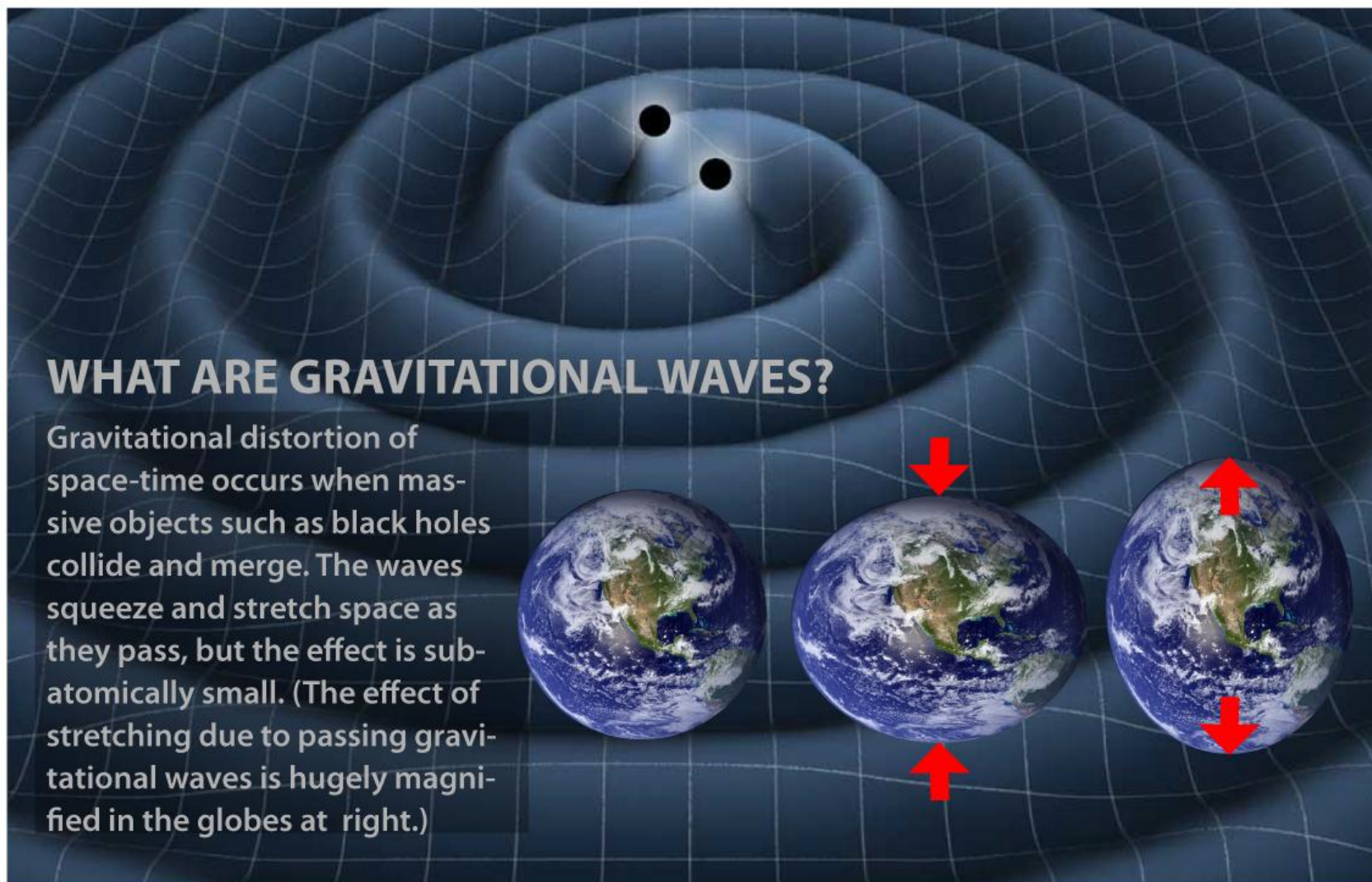


FOUND! GRAVITATIONAL WAVES





Researchers at the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO) have found evidence of gravitational waves, a key feature of standard models of how the universe works. (PHOTO: LIGO FACILITY IN WASHINGTON STATE).

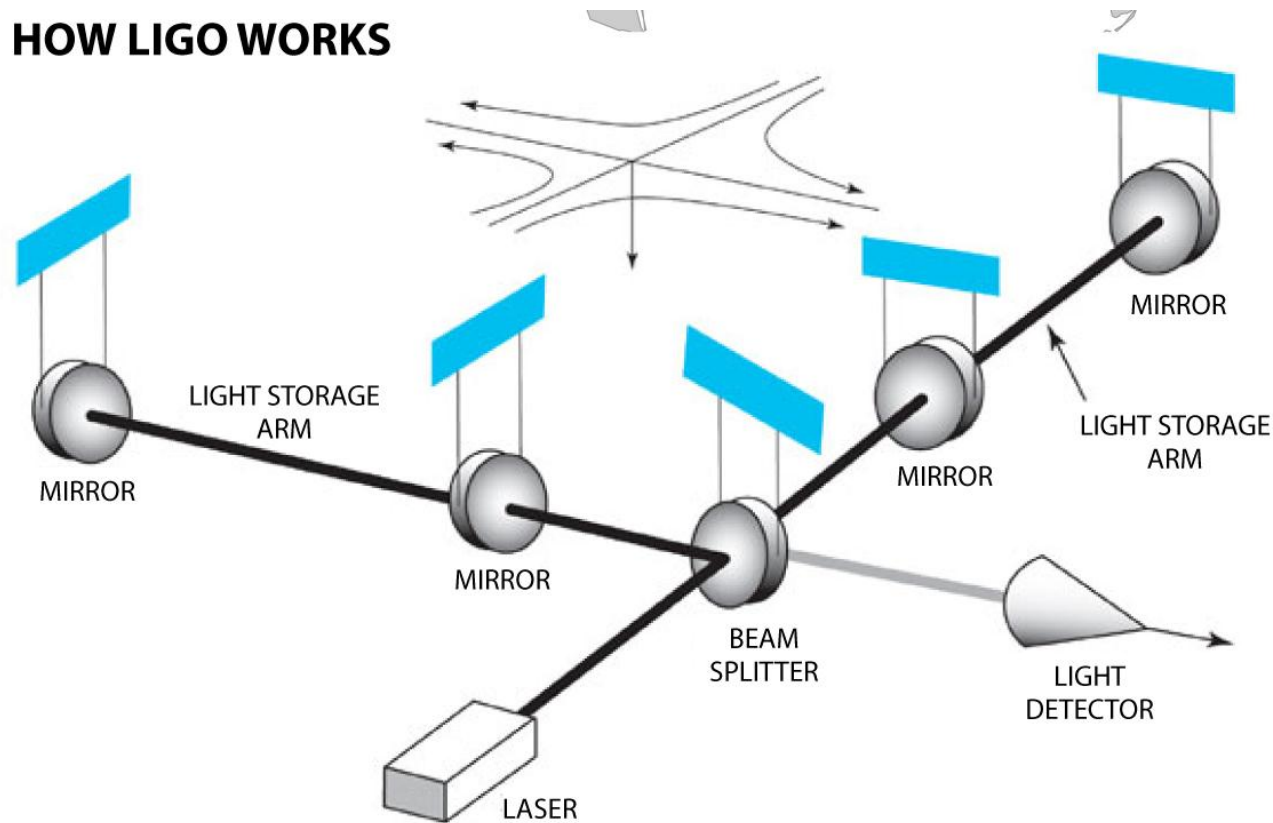


LIGO SITES

Gravitational waves, traveling at the speed of light, will have a difference of arrival time at the two LIGO observatories of up to 10 milliseconds. The delay allows scientists to calculate the origin of the waves.



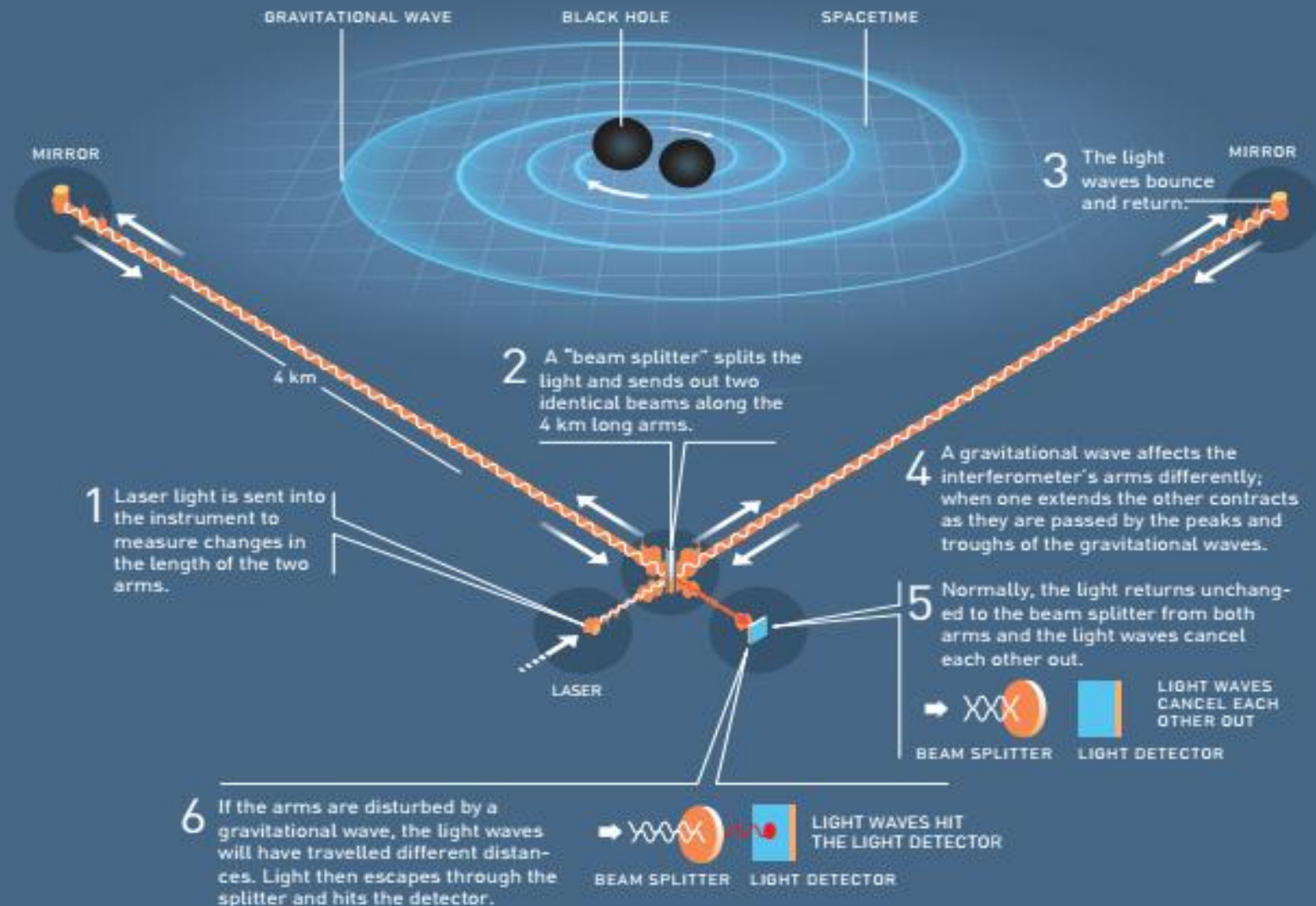
HOW LIGO WORKS



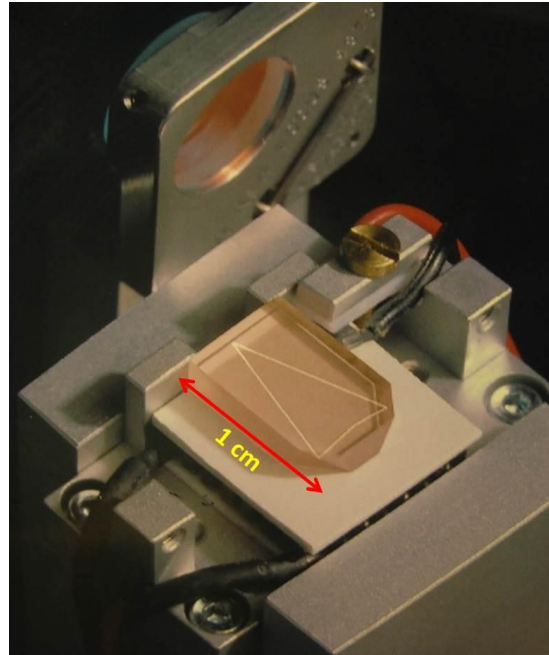
The **Laser Interferometer Gravitational Wave Observatory (LIGO)** searches for distortions in space-time that indicate the passage of gravitational waves through the Earth. A **laser beam** is split down two 2.5-mile (4 kilometers) arms containing mirrors. The laser beams reflect off of mirrors to converge at the crux of the arms, canceling each other out. The passage of a gravitational wave alters the length of the arms, causing the beams to travel different distances. The mismatch is measurable with a light detector. LIGO facilities in Louisiana and Washington state operate simultaneously; the two data points allow triangulation of a wave's source in the sky.

SOURCES: LIGO.ORG

LIGO - A GIGANTIC INTERFEROMETER

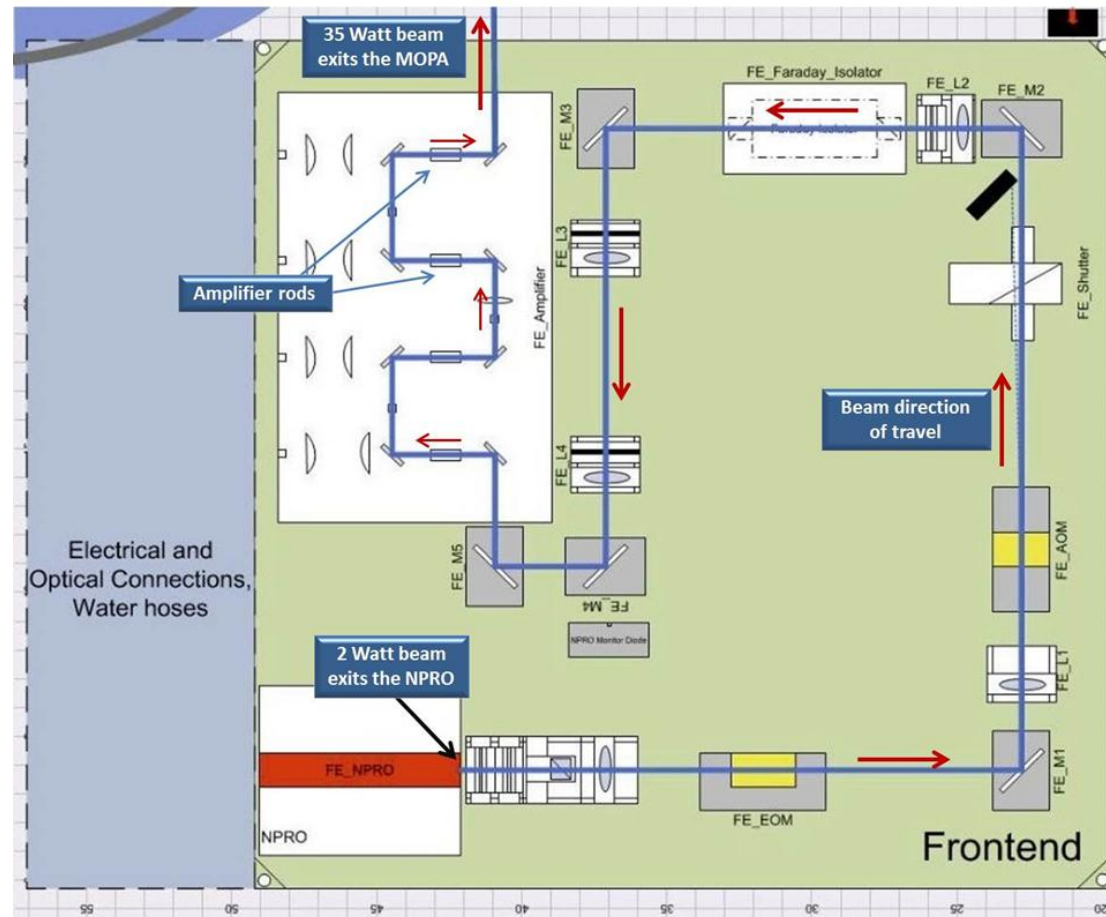


- El rayo de 200 W que ingresa a los interferómetros de LIGO comienza dentro de un diodo láser, el cual usa electricidad para generar un haz de 4 W, 808 nm de luz láser en infrarrojo cercano. Mientras que los diodos láser son el tipo de dispositivos que uno encuentra en los punteros láser de todos los días, a 4 vatios, LIGO es 800 veces más potente que la mayoría de los punteros láser estándar.

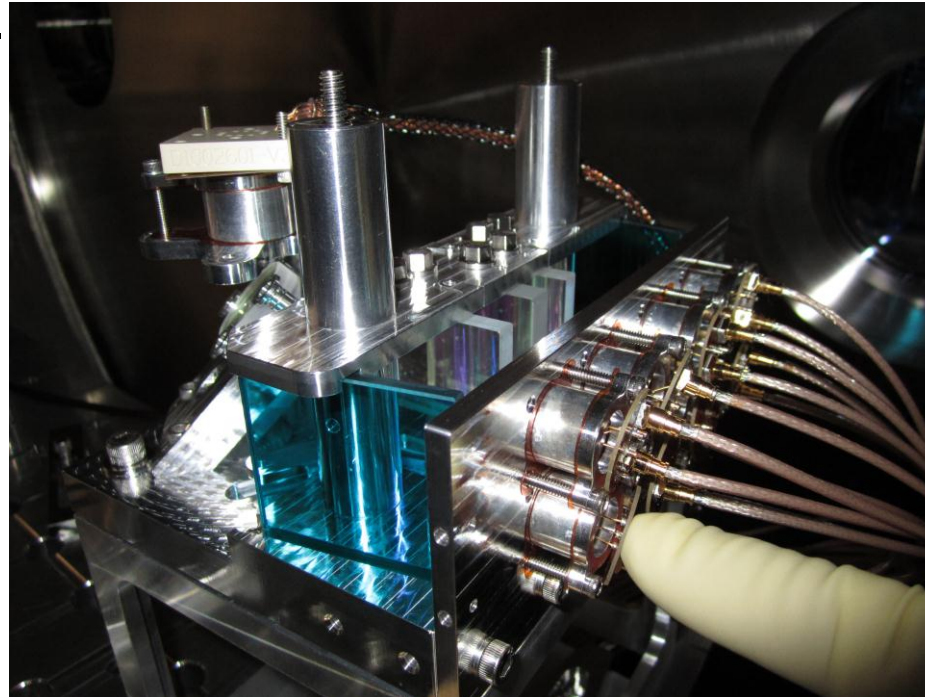


Mientras que 1064 nm es la longitud de onda objetivo para el láser de LIGO, necesita 100 veces más potencia antes de que pueda ingresar al interferómetro. Para llegar allí, el laser semilla de 2 vatios sufre dos etapas de amplificación que aumentan su potencia hasta casi 200 W.

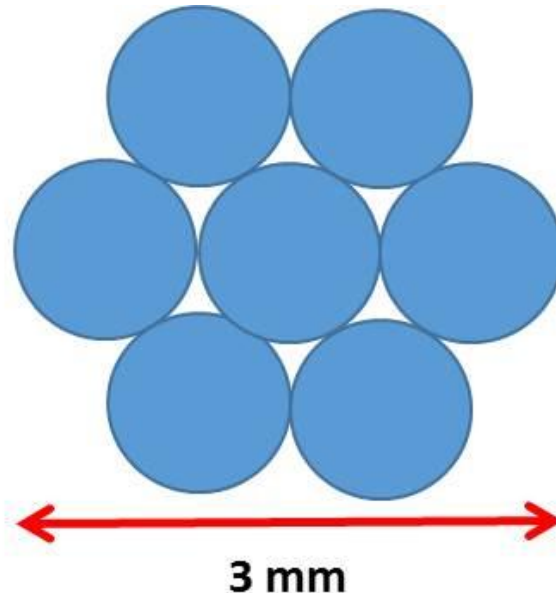
- En el primer paso multifacético de la amplificación, el haz semilla pasa a través de un dispositivo llamado Master Oscillator-Power Amplifier (MOPA). El MOPA contiene cuatro barras del amplificador de láser delgadas que comienzan el proceso de aumento de potencia. Estas varillas, compuestas de un material similar al vidrio hecho de neodimio, itrio, litio y flúor, son aproximadamente del tamaño del grafito dentro de un lápiz: solo 3 mm de diámetro y 5 cm de largo.

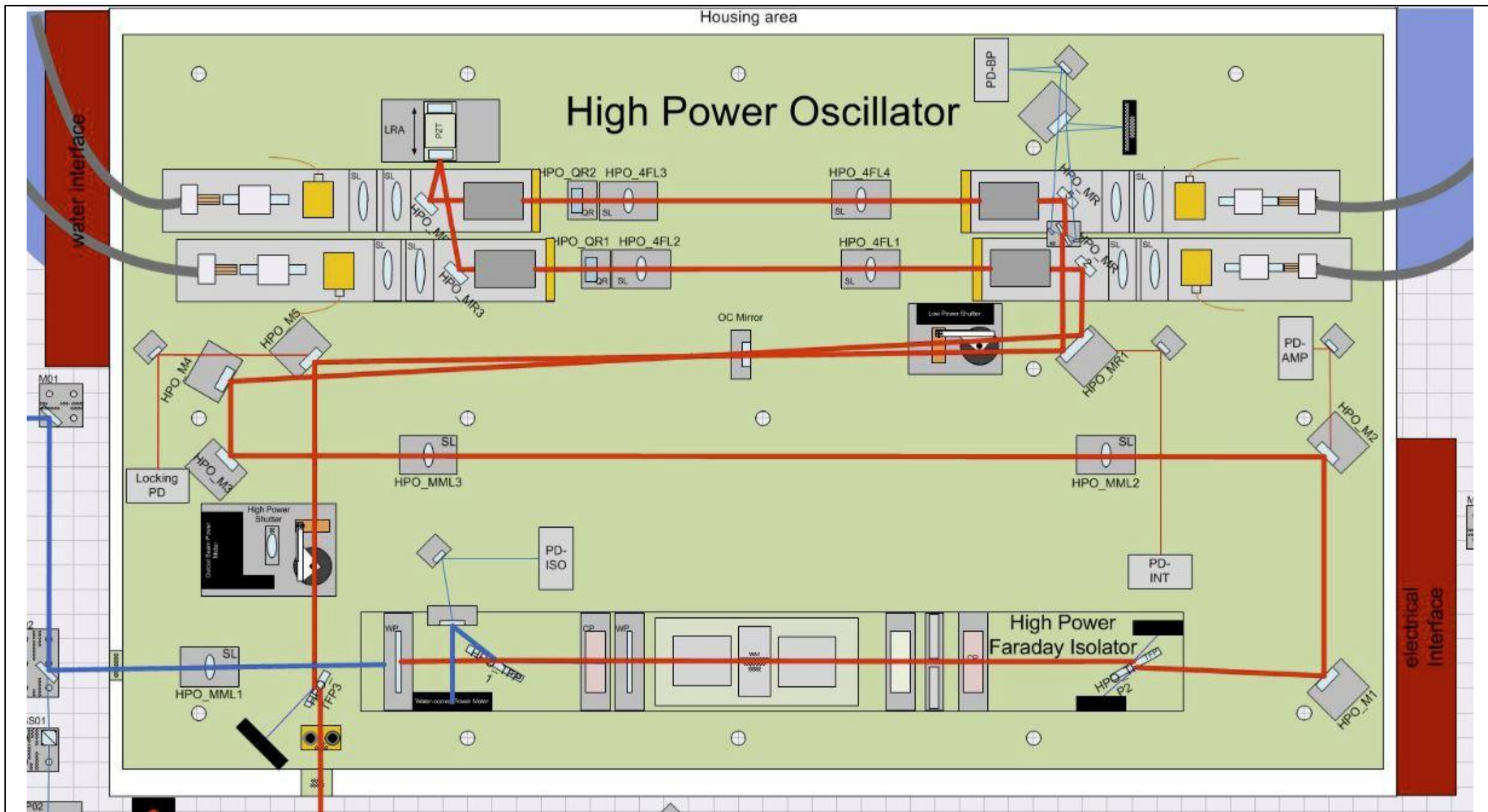


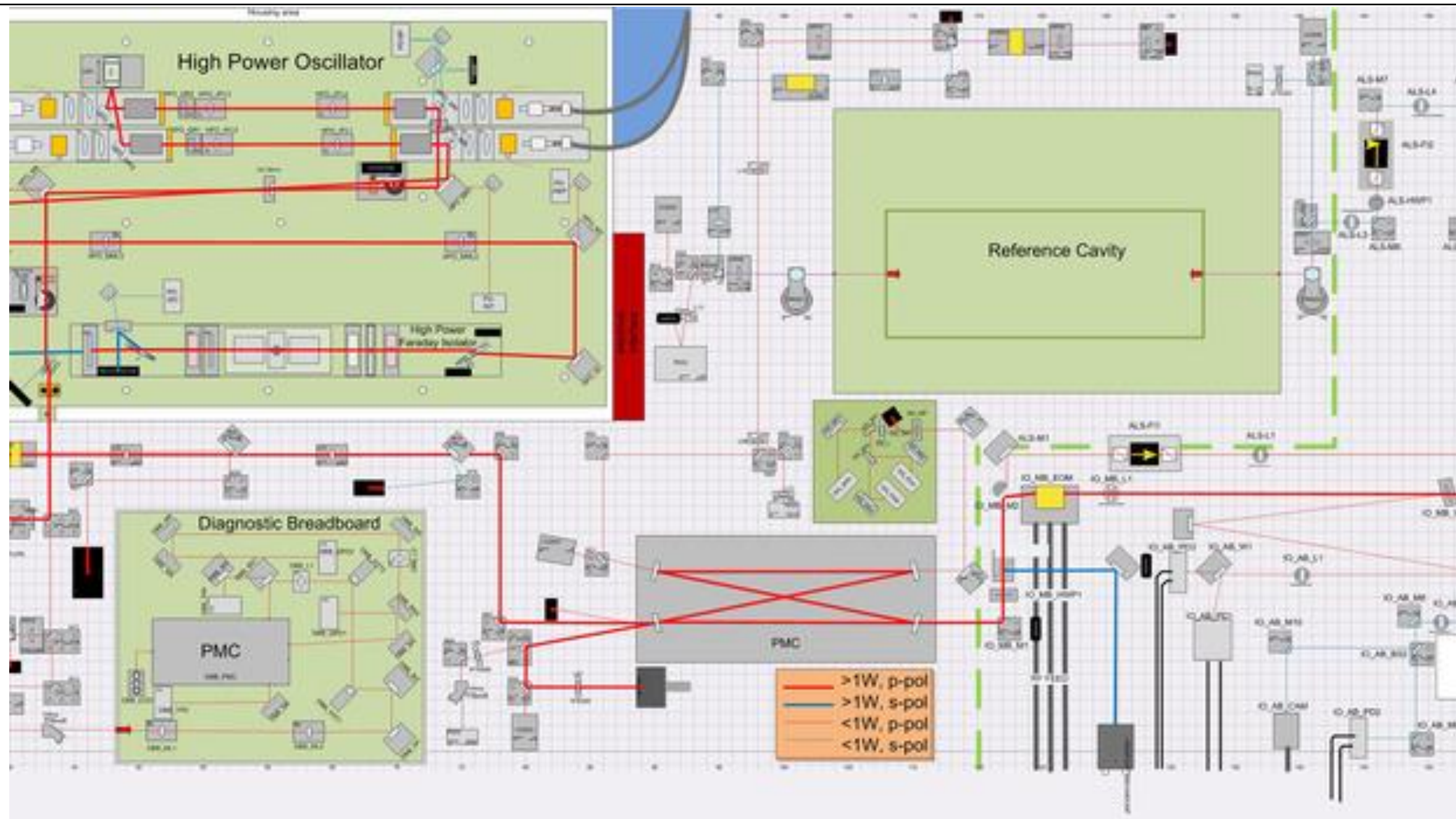
- Para amplificar el haz, las moléculas en cada barra se energiza primero brillando los láseres de 808 nm por separado en cada barra. El haz también viaja a través de la primera varilla, las moléculas de varilla responden emitiendo fotones de 1064 nm con las mismas propiedades (fase, longitud de onda) que el haz de semilla entrante. Estos nuevos fotones de 1064 nm se unen a los del haz de semillas que viajan en la misma dirección (más fotones significan más potencia). Este rayo más poderoso viaja a la segunda varilla donde este proceso de amplificación se produce nuevamente, luego nuevamente en la tercera y nuevamente en la cuarta vara. Como contribuciones de un río, en cada etapa de este proceso de amplificación, más y más fotones de la misma longitud de onda se unen al haz de la semilla, aumentando gradualmente su poder.

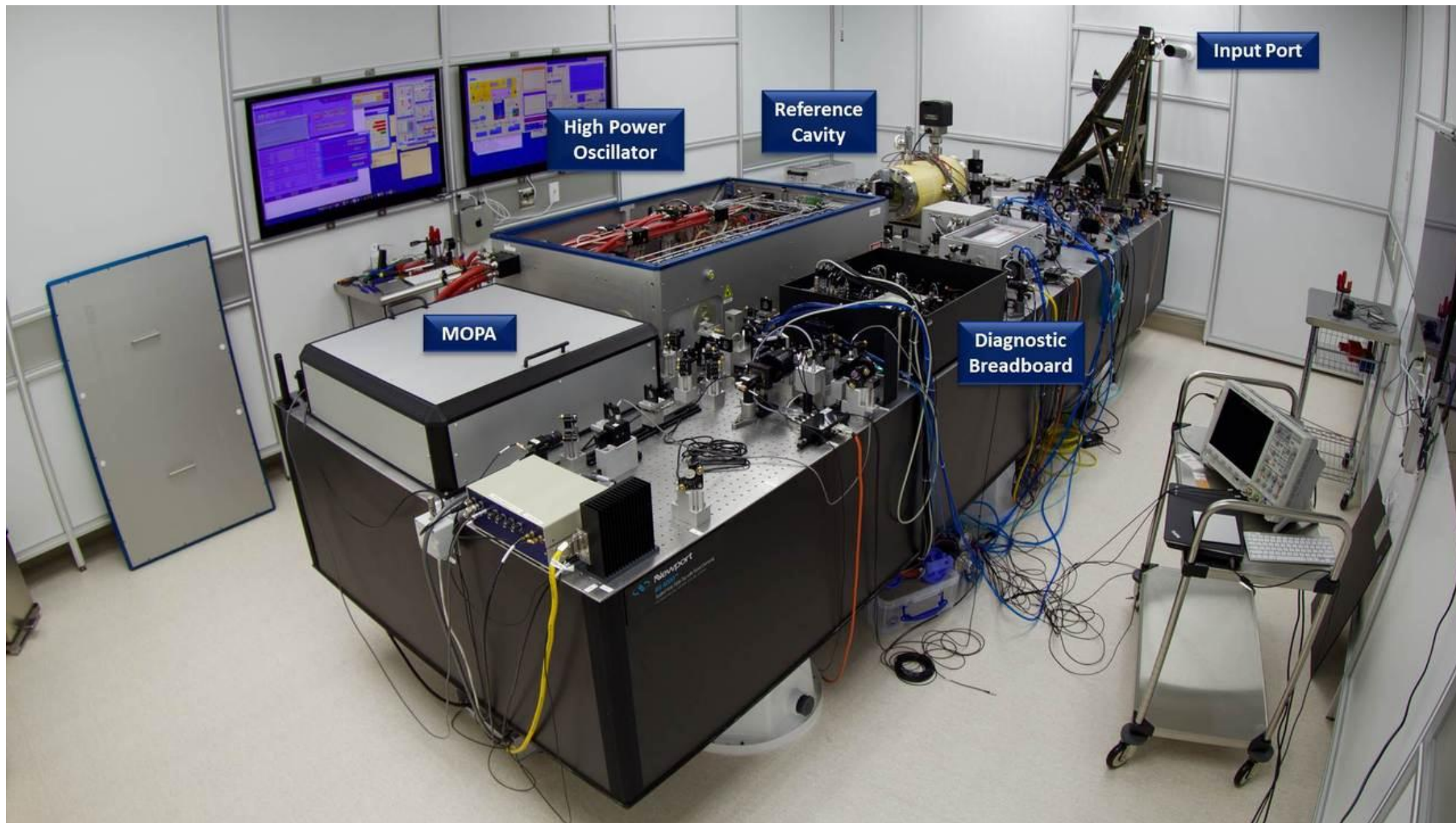


- La etapa final de amplificación de potencia se logra en otro dispositivo de cuatro varillas llamado oscilador de alta potencia (HPO). El HPO usa cuatro varillas de amplificador más, aproximadamente del mismo tamaño que las varillas MOPA pero hechas de un material diferente. A medida que el rayo pasa a través de estas varillas, al igual que en el MOPA, obtiene un aumento de potencia adicional a partir de la luz láser canalizada a través de haces de cables de fibra óptica dispuestos como una flor, y de solo 3 mm de ancho.
- Cada fibra transporta 45 vatios de potencia del láser, por lo que cada paquete entrega 315 vatios (7 fibras x 45 W cada uno) en cada varilla para cebarlo y emitir más y más luz láser. Cuando el haz sale del HPO, finalmente ha alcanzado su potencia deseada de 200 W.





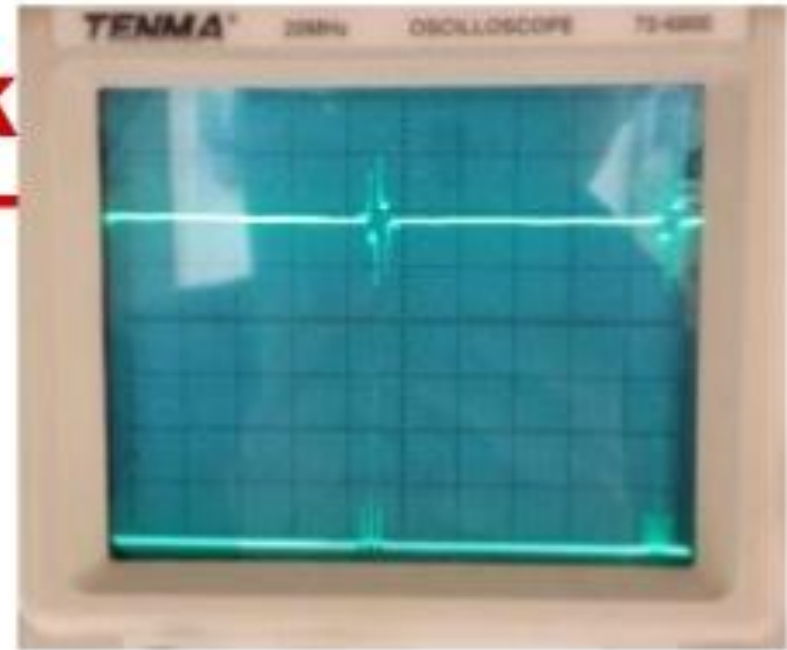




Pound-Drever-Hall Lock

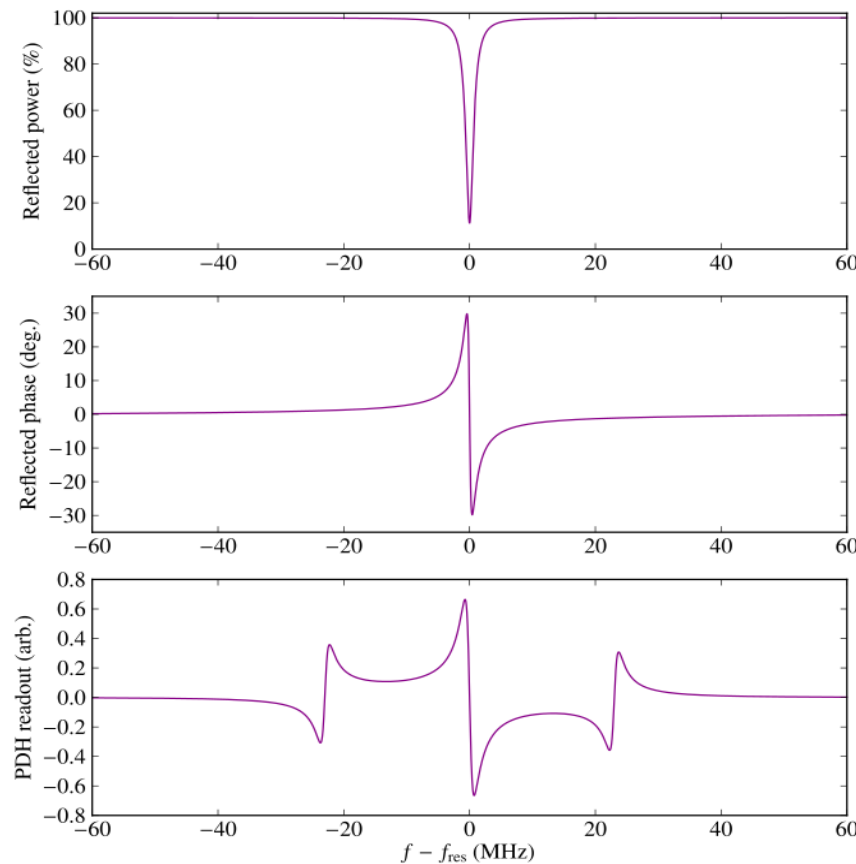
Commonly used technique in laser optics, basically implemented a feedback loop to correct the cavity of any errors.

By taking data using a photodetector, we could generate an error signal to show how much the frequency was off by, and autocorrect the laser.

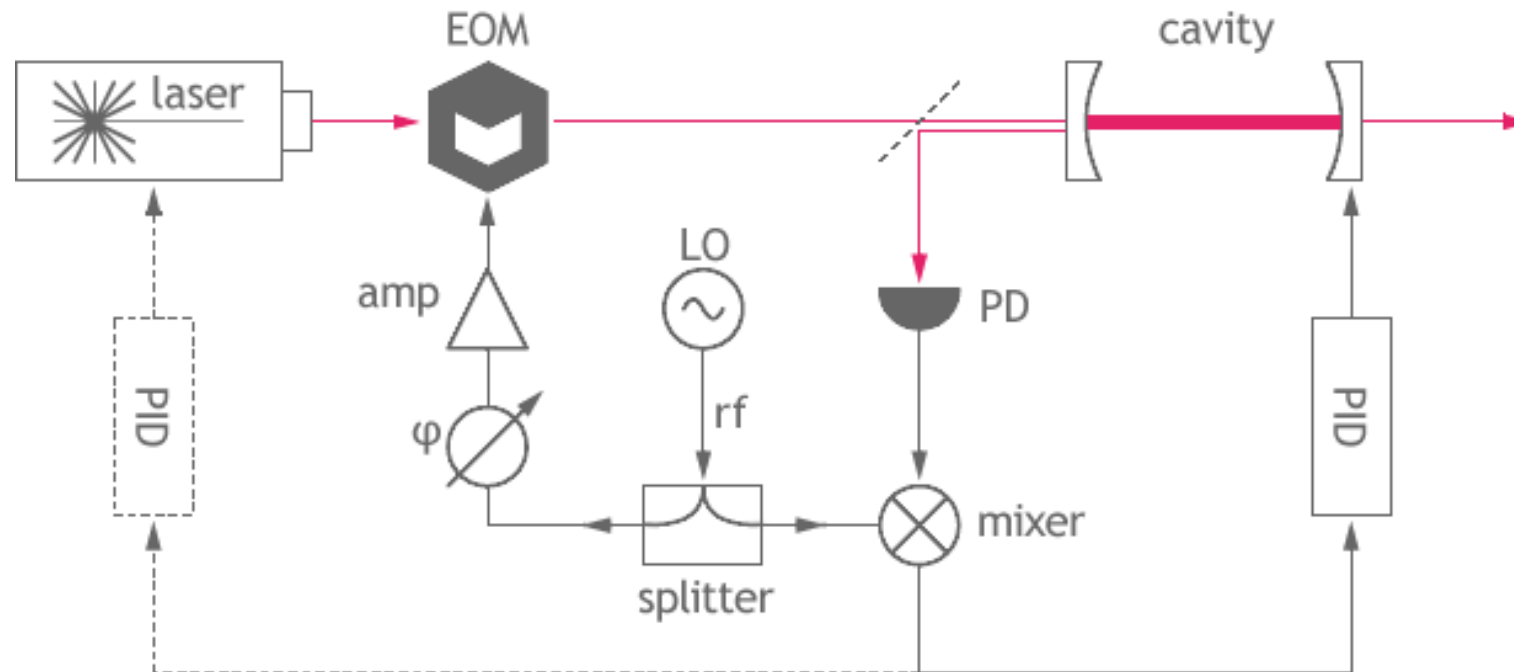


- Una necesidad común en los laboratorios que utilizan láseres es una fuente de láser altamente estable. Un posible método de crear un láser estable es usar una cavidad láser Fabry-Perot de estabilidad conocida como referencia.
- Si la frecuencia de un láser se puede ajustar dinámicamente para que coincida con el modo resonante de una cavidad, el láser entonces puede tener la misma estabilidad que la cavidad. Una técnica excelente para lograr esto es el Método de bloqueo "Pound-Drever-Hall", inventado en 1983. Fue concebido por Ron Drever, basado en similares técnicas de microondas utilizadas por R. V. Pound. La implementación práctica fue en gran parte desarrollada por Jan Hall en JILA.
- El método de bloqueo por láser más popular actualmente en uso, el Pound-Drever-Hall método originalmente entrega mejor que la estabilidad de 100 Hz. Implementaciones modernas con cuidado el aislamiento de la vibración ha logrado lograr una estabilidad sub-Hz. También es de destacar que este método puede ser adaptado para bloquear una cavidad a un láser estable a través de la actuación de longitud piezoeléctrica, que es útil en algunas circunstancias, como la medición precisa de pequeños cambios en la longitud de la cavidad.

- El objetivo del bloqueo por láser es bastante simple. Si se tiene un láser de frecuencia desconocida (inestable) y se desea modificar dinámicamente esto para que coincida con la frecuencia conocida de un modo de cavidad específica. Por lo tanto, la diferencia entre la frecuencia del láser y la frecuencia de resonancia de la cavidad, δf , debe ser constante medido, y usado para alterar apropiadamente la frecuencia del láser. La técnica de Pound-Drever-Hall es un método para lograr esto, y tiene la ventaja de ser insensible a la intensidad del láser fluctuaciones



- El método Pound-Drever-Hall lo evita: mientras que el coeficiente de reflexión es simétrico, la derivada de F con respecto a δf es antisimétrica a través de la resonancia. Esto proporciona una señal proporcional a la compensación de frecuencia, llamada señal de error, que indica de qué lado de la resonancia el láser. Para determinar la derivada en cualquier punto, uno simplemente puede variar la frecuencia ligeramente y ver cómo responde la intensidad reflejada. Por encima de la resonancia, con una F positiva derivada, la intensidad responderá en fase con las variaciones de frecuencia.



- La Figura 2 muestra una configuración básica que es capaz de implementar esto. La luz de un láser pasa a través de un modulador electro-óptico, que modula su fase dado por un oscilador (en la práctica, esto es más fácil que modular la frecuencia). Luego pasa a través de la cavidad y el haz reflejado es monitoreado por un fotodetector. Mezclando la señal del fotodetector y la salida del oscilador aísla la parte de la señal que mide la derivada de F , que luego se alimenta a un servoamplificador para ajustar apropiadamente la frecuencia del láser, bloqueando el láser a la resonancia de la cavidad.

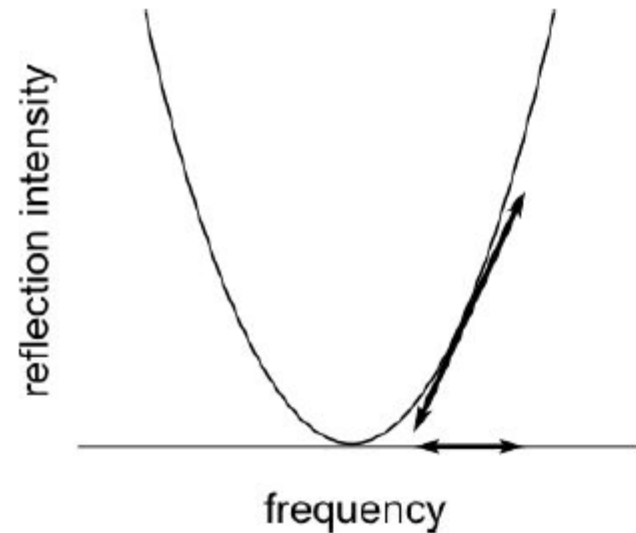


Figure 1. The reflection intensity near resonance as a function of frequency.

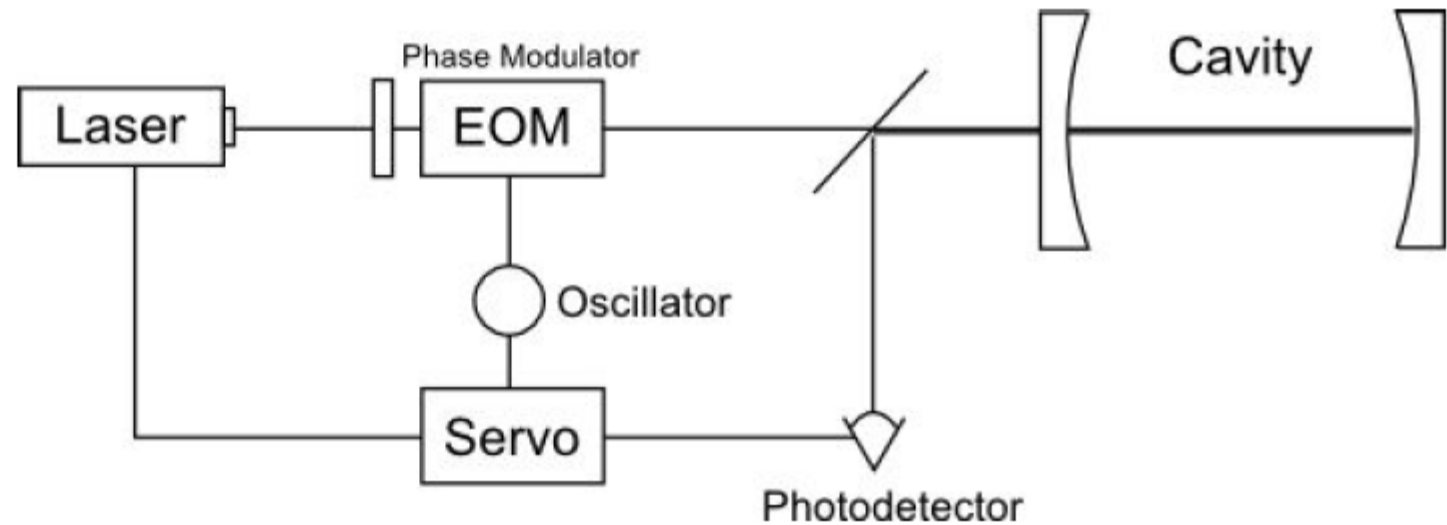
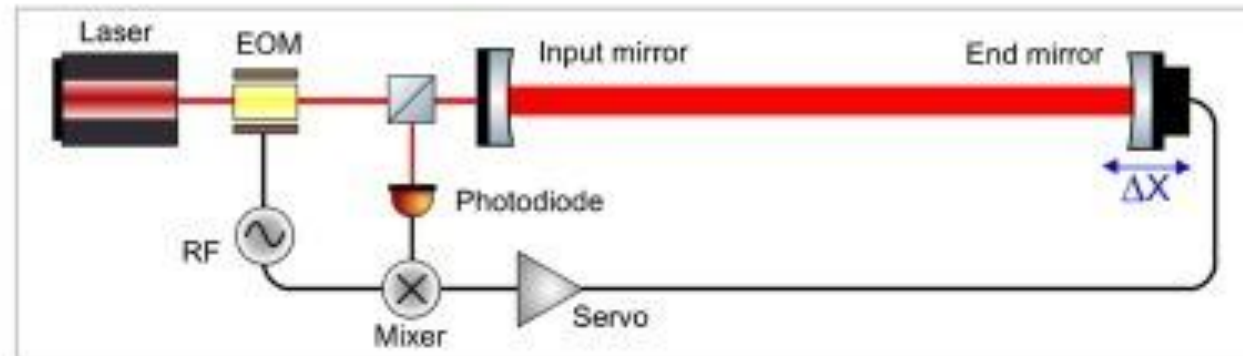
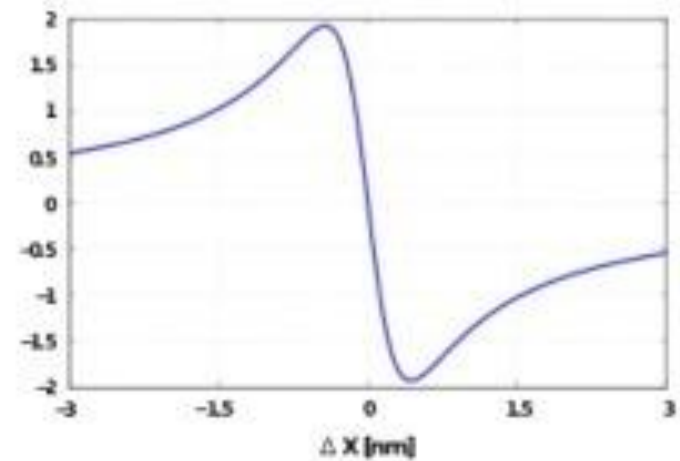
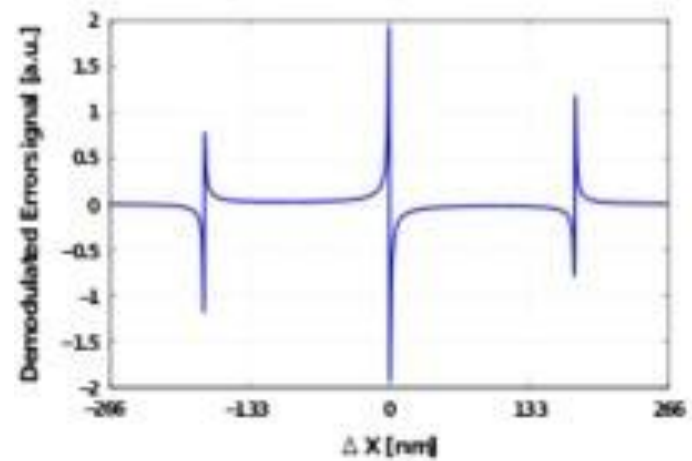
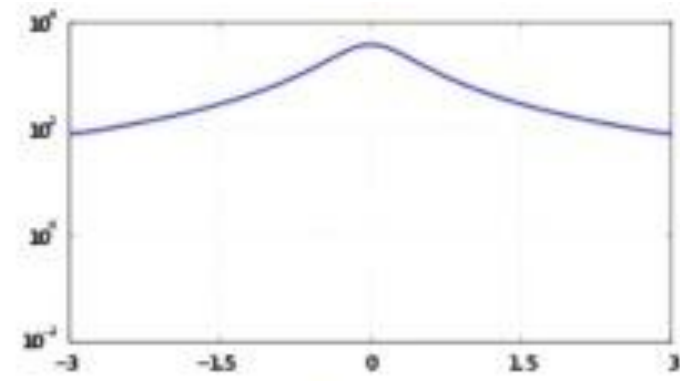
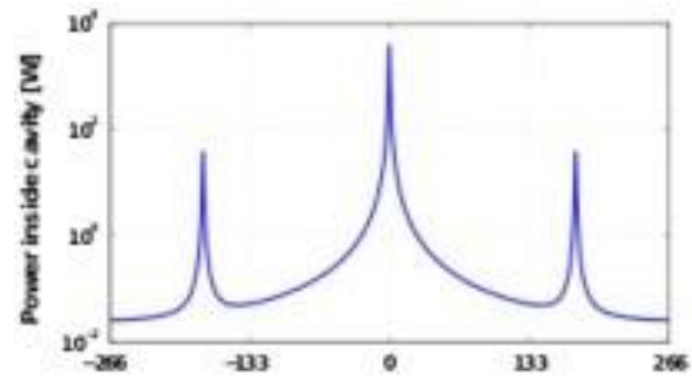
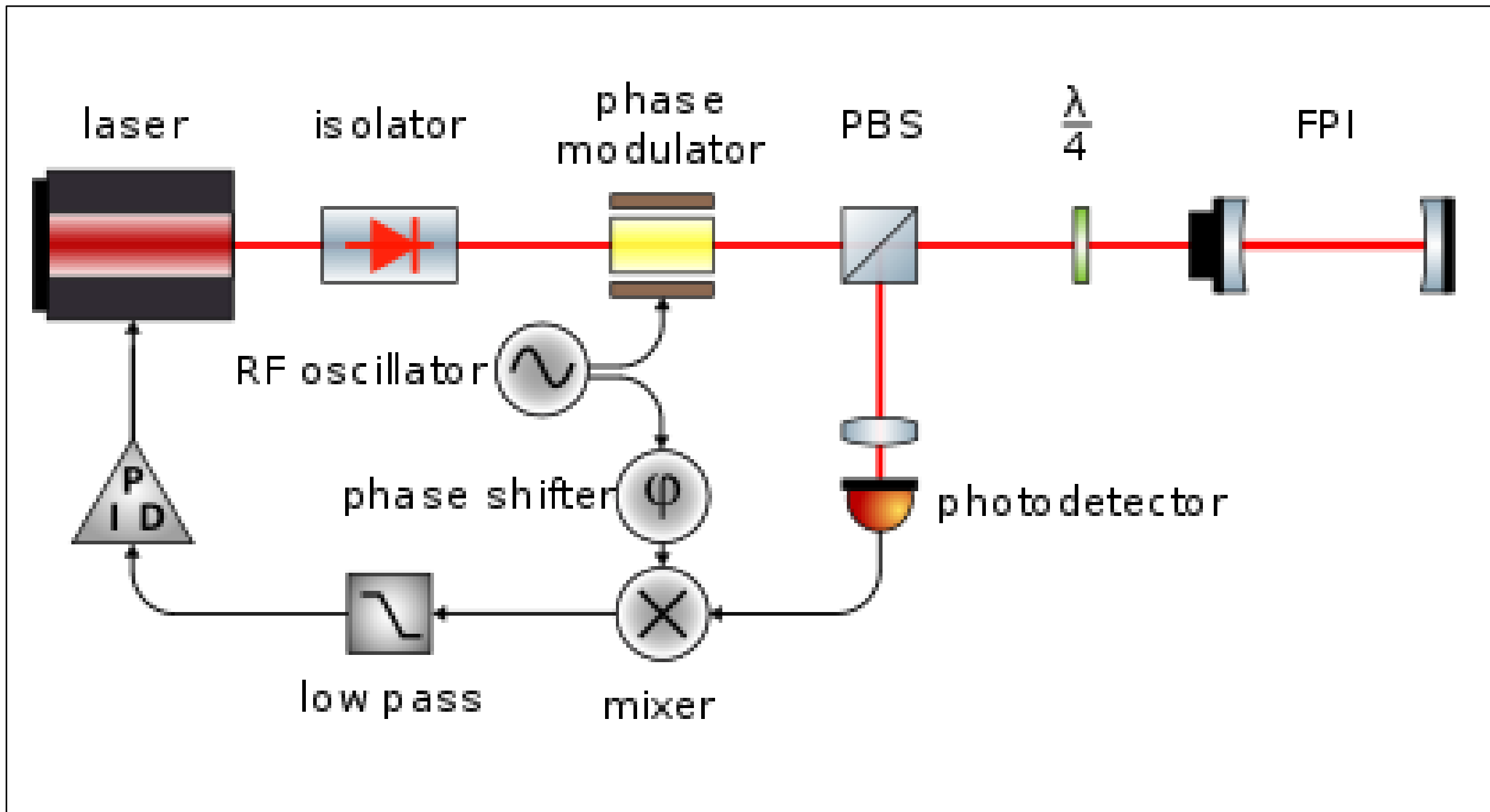


Figure 2. A basic setup capable of implementing Pound-Drever-Hall locking.





Las figuras anteriores ilustran el principio de la técnica PDH. Se usa un modulador electroóptico (EOM) para imprimir las bandas laterales de modulación de fase de RF en la luz del portador láser. La frecuencia de estas bandas laterales debe elegirse de modo que las bandas laterales no sean resonantes en la cavidad y se reflejen directamente fuera de la cavidad. Por el contrario, para una longitud de cavidad próxima a la resonancia, la luz portadora entrará al menos parcialmente en la cavidad y encontrará un desplazamiento de fase que dependerá de la longitud microscópica de la cavidad. Luego se puede usar un fotodiodo en reflexión de la cavidad para detectar el latido de la luz del portador que sale de la cavidad y las bandas laterales de RF se reflejan fuera de la cavidad. Si la señal del fotodiodo se mezcla con la modulación de RF original, se puede crear una señal de error lineal bipolar para la longitud de la cavidad. Las dos inserciones superiores izquierdas de la muestran la potencia óptica dentro de la cavidad y la señal de error demodulada. Se pueden obtener tres cruces por cero, uno para cada una de las bandas laterales y el soporte que resuena en la cavidad. Las dos inserciones superiores derechas muestran la potencia de la cavidad y la señal de error ampliada alrededor de la resonancia de la portadora. El rango lineal de la señal de error, también denominado rango de bloqueo, en el ejemplo mostrado es aproximadamente una fracción de un nanómetro.

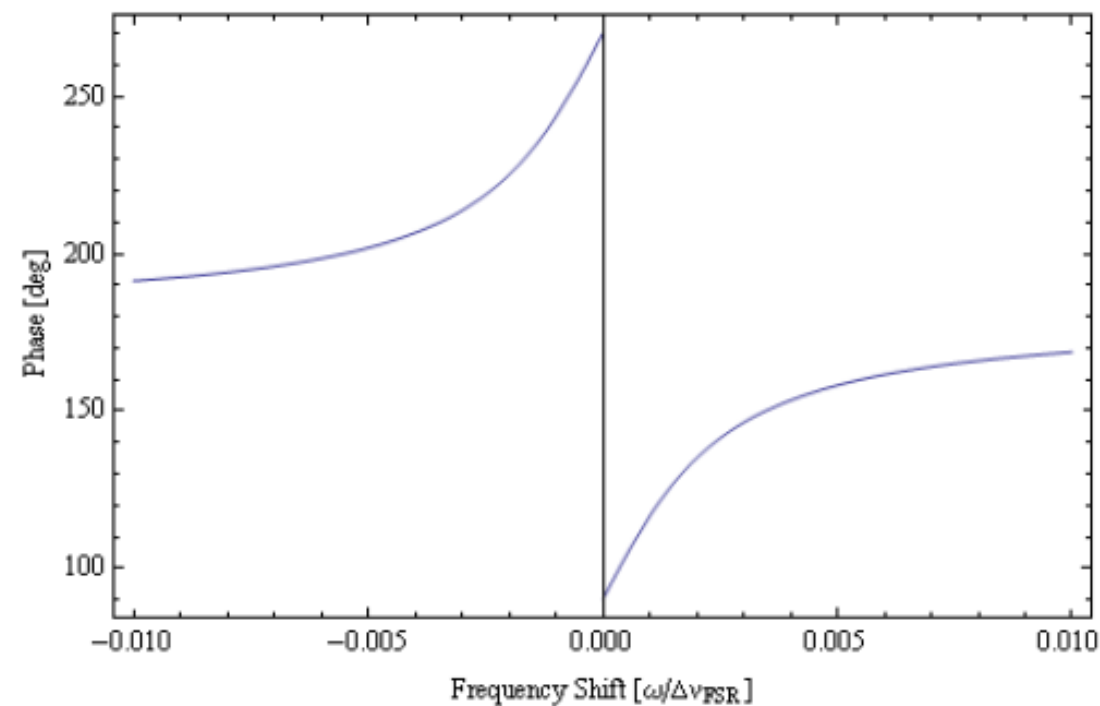
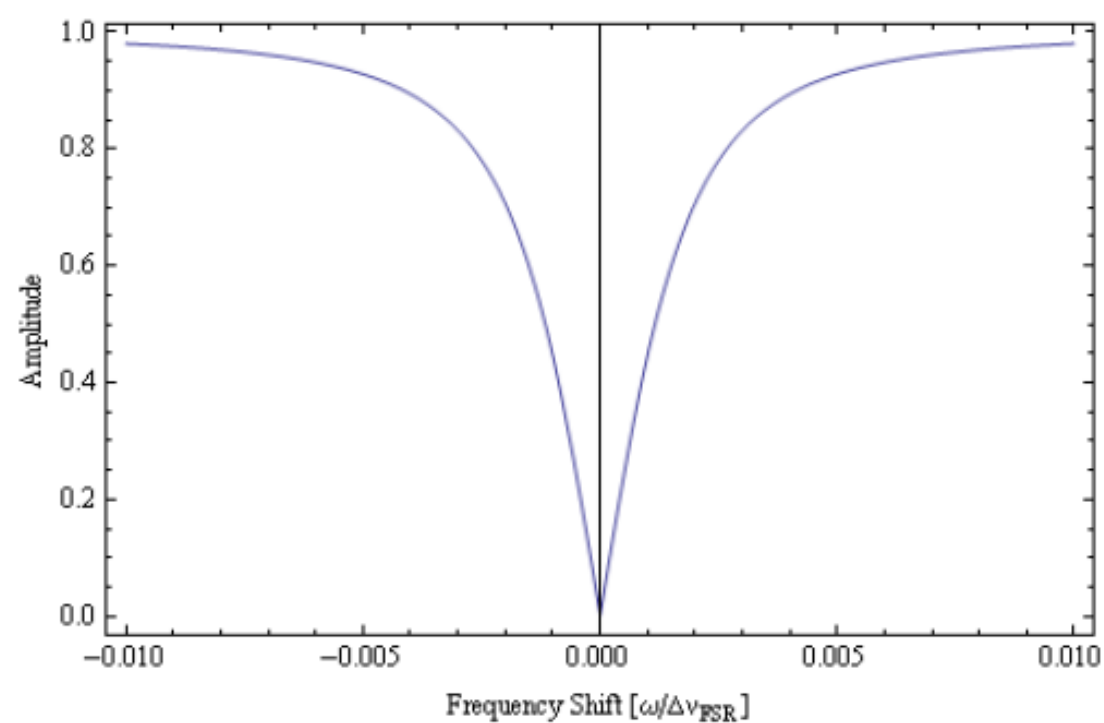
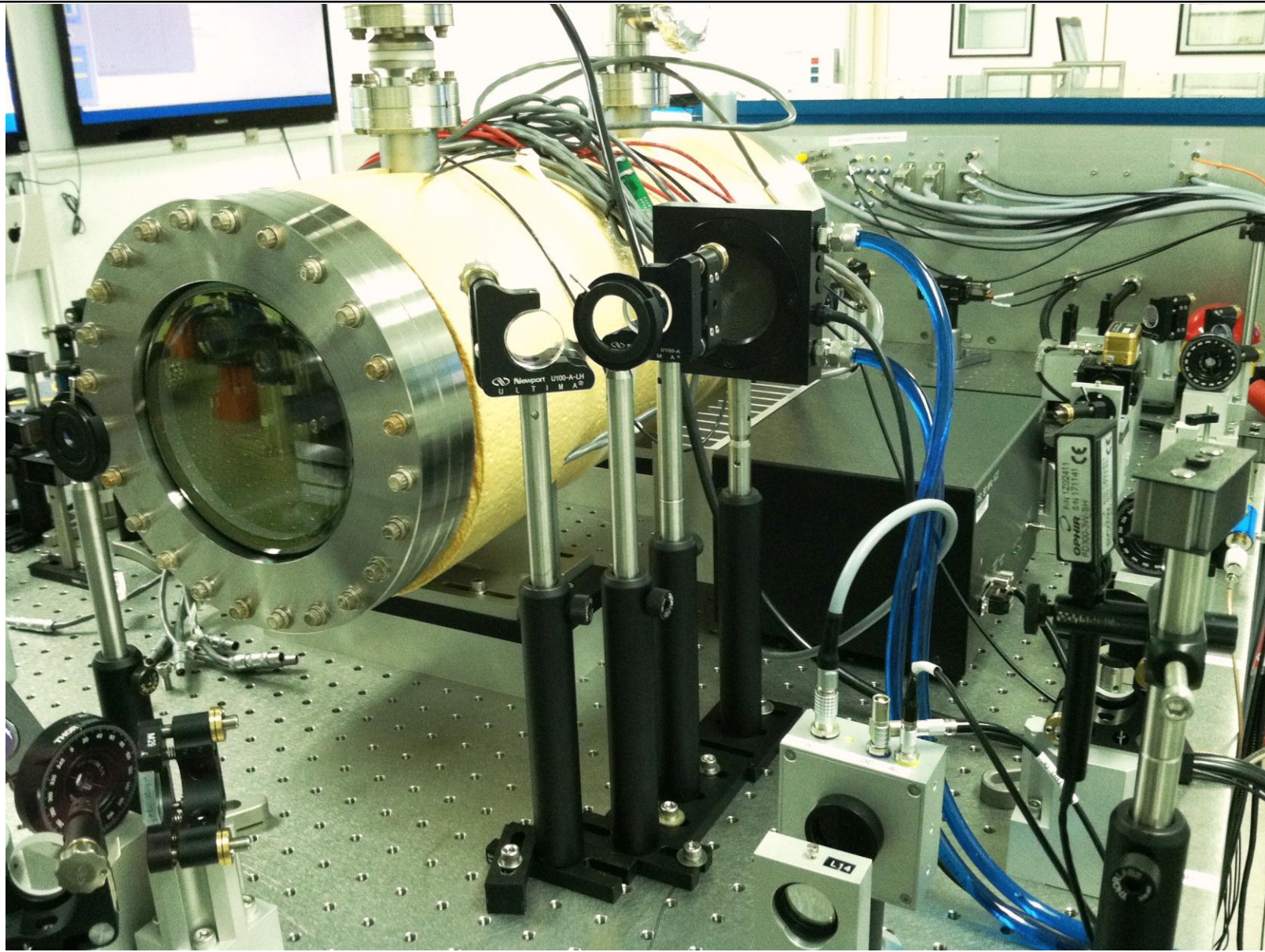
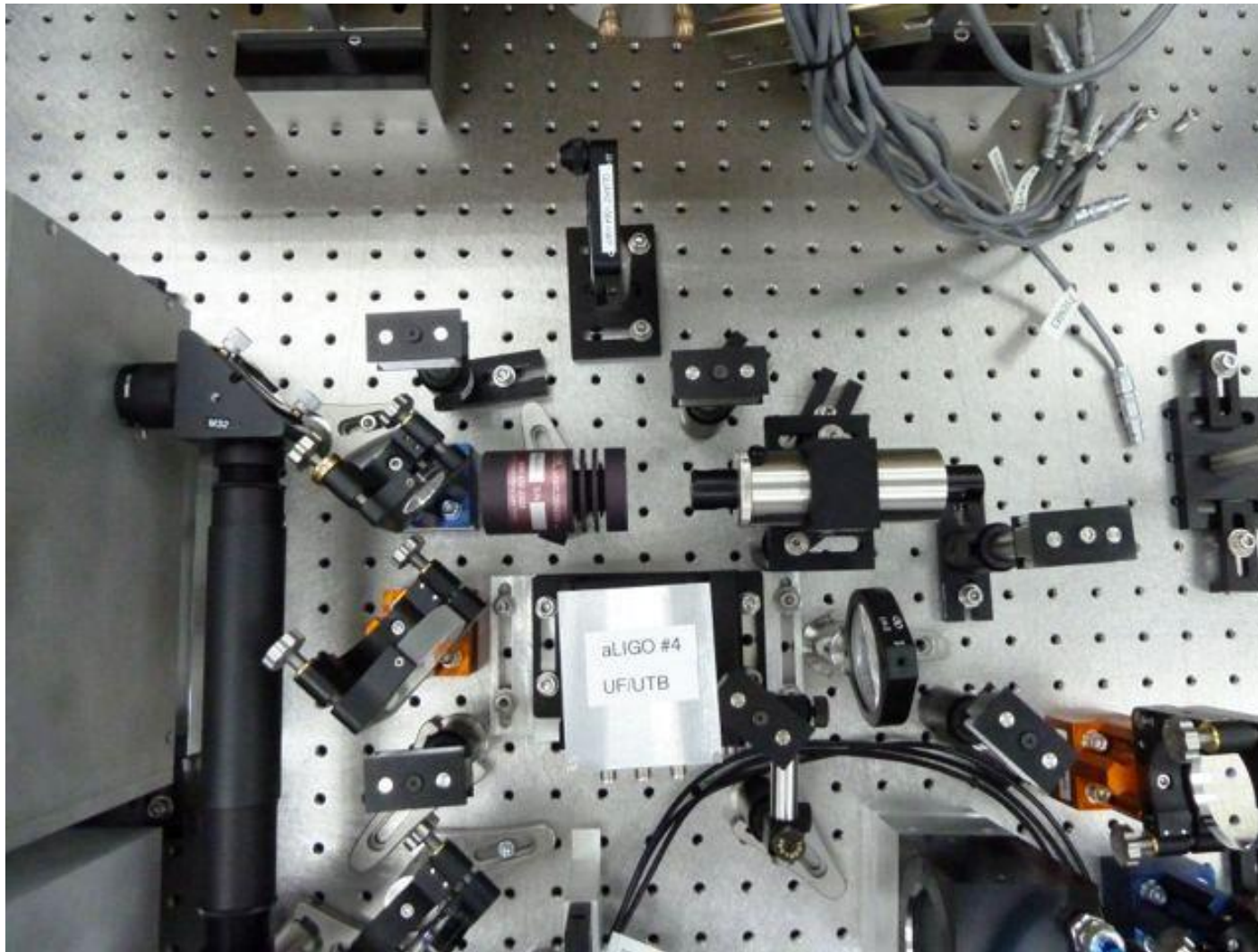


Figure 3. Plots of the amplitude and phase of the reflection coefficient $F(\omega)$, assuming r of 0.999.



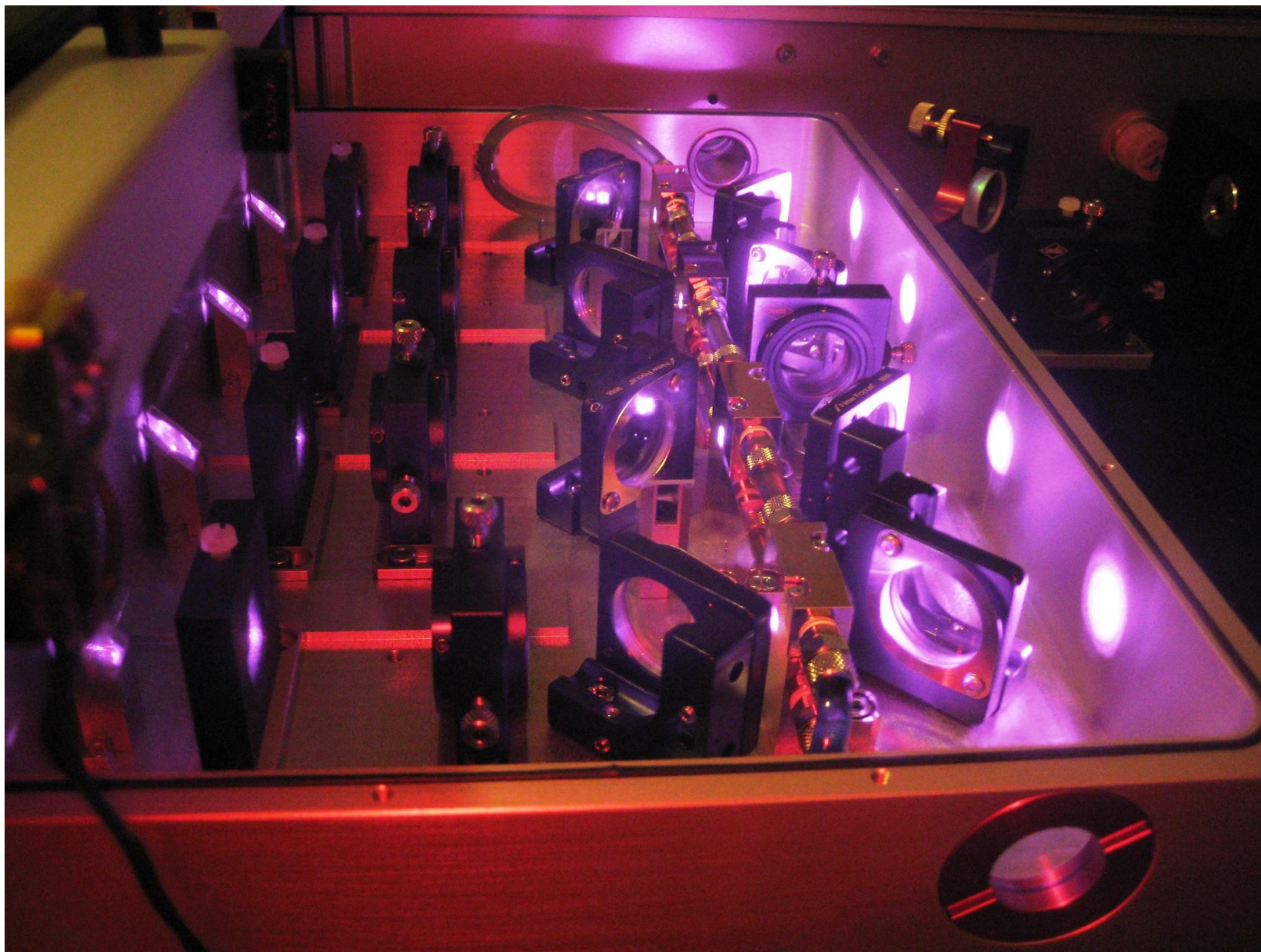
Reference cavity output



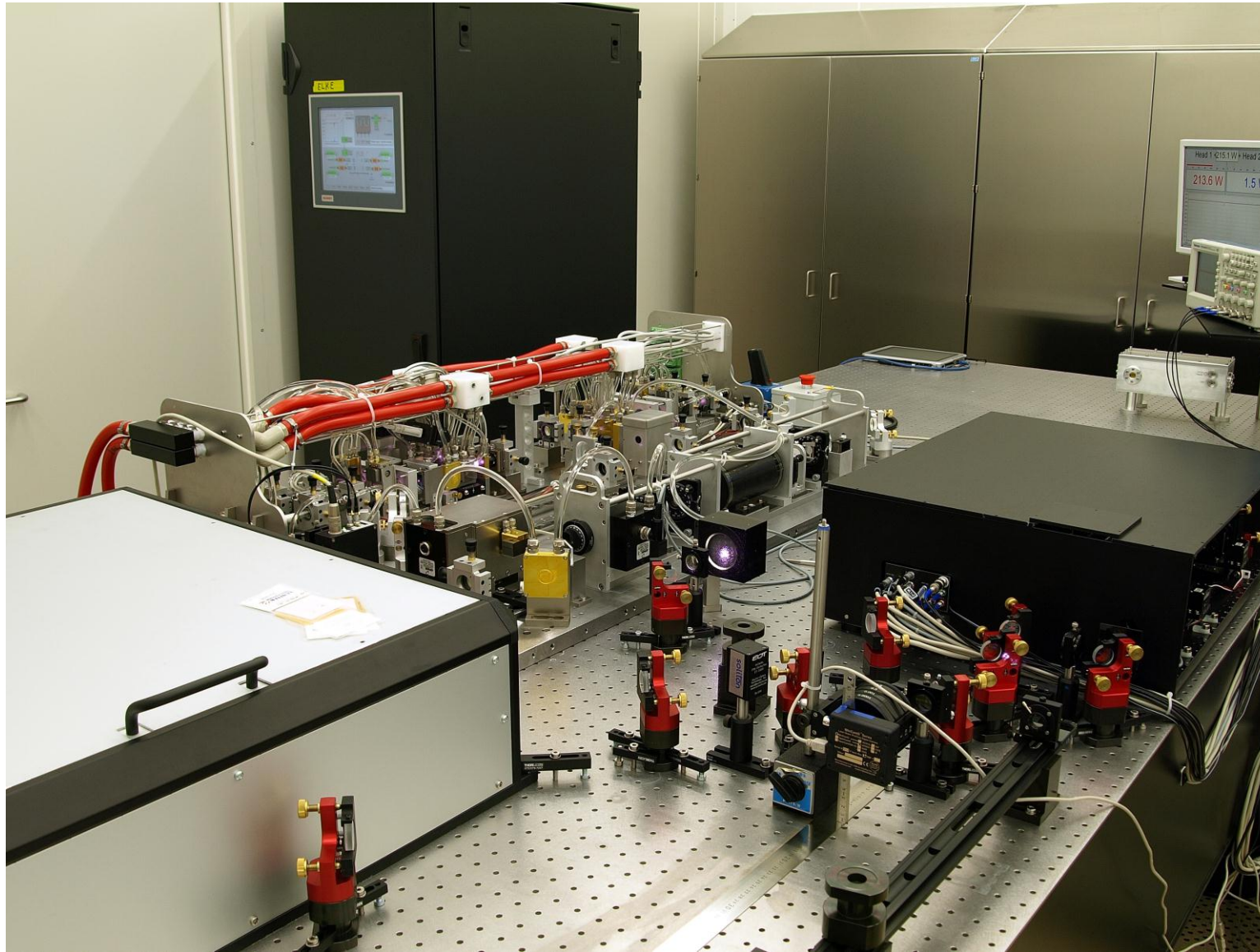
Electrooptic modulator (top view)



PSL assembly



35 W Enhanced LIGO laser



200 W aLIGO laser at AEI

Referencias

- <https://www.space.com/25445-how-ligo-lasers-hunt-gravitational-waves-infographic.html>
- <https://www.advancedligo.mit.edu/psl.html>